

**DISEÑO Y METODOLOGIA DE UN SISTEMA DE CALIBRACION Y
PATRONAMIENTO DE MACROMEDIDORES DE CAUDAL**



JULIAN FELIPE VARGAS GALVAN

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECHANICAS
BUCARAMANGA
2010**

**DISEÑO Y METODOLOGIA DE UN SISTEMA DE CALIBRACION Y
PATRONAMIENTO DE MACROMEDIDORES DE CAUDAL**

JULIAN FELIPE VARGAS GALVAN

**PROYECTO DE GRADO
Para optar por el título de Ingeniero Civil**

**DIRECTOR
LUIS FERNANDO CASTAÑEDA GALVIS
MAGISTER EN INGENIERÍA. ÁREA CIVIL
(UNIANDÉS)**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAICAS
BUCARAMANGA
2010**

DEDICATORIA

Quiero agradecer primeramente al gestor de todos mis logros y al principal respaldo durante todo el tiempo de mi carrera, DIOS.

A El dedico este triunfo.

A mis Padres que con su apoyo incondicional, su amor, su respaldo, aportaron la fortaleza necesaria para avanzar en el cumplimiento de un logro más en mi vida.

A mi hermana que fue un respaldo en oración y para quien espero ser un buen ejemplo

A mis grandes amigos que siempre estuvieron a mi lado añadiendo con sus palabras más motivación para alcanzar este logro.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
1 OBJETIVOS GENERALES Y ESPECIFICOS.....	18
1.1 OBJETIVO GENERAL.....	18
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
1.3 METODOLOGÍA.....	19
1.4 DIAGRAMA DE FLUJO.....	20
2 MEDICION DE CAUDALES EN REDES DE DISTRIBUCION.....	21
2.1 MACROMEDICIÓN.....	21
2.2 LA MACROMEDICIÓN EN EL CONTROL DE FUGAS.....	24
2.3 BENEFICIOS DE LA MACROMEDICIÓN.....	25
2.4 IMPORTANCIA DE LA MACROMEDICIÓN.....	25
2.5 INSTRUMENTOS UTILIZADOS PARA REALIZAR MACROMEDICIÓN.....	26
2.5.1 Instrumentos de Flujo Volumétrico.....	28
2.5.2 Otros medidores volumétricos.....	29
2.5.3 Exactitud, Ventajas y Desventajas de los medidores volumétricos:....	29
2.6 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO PARA MEDIDORES ELECTROMAGNÉTICOS Y ULTRASÓNICOS.....	29
2.6.1 Medidores de caudal electromagnéticos.....	29
2.6.2 Medidores ultrasónicos.....	31
2.6.3 . Exactitud de los Macromedidores usados por el Acueducto.....	33
3 CALIBRACIÓN DE MACROMEDIDORES.....	34
3.1 ¿QUÉ ES LA CALIBRACIÓN?.....	34
3.2 TASA, CANTIDAD Y TIEMPO.....	35
3.3 RESOLUCIÓN.....	36

3.4	TRAZABILIDAD, EXACTITUD Y LA INCERTIDUMBRE	36
3.5	VISUALIZACIÓN DEL RESULTADO	39
3.6	FRECUENCIA DE CALIBRACIÓN.	42
3.7	CONDICIONES PARA LA CALIBRACIÓN DE FLUIDOS.....	42
4	ESTADO DEL ARTE.....	44
4.1	MÉTODO USADO POR WL DELF HYDRAULICS (HOLANDA)	44
4.2	MÉTODO USADO POR CENAM (INSTITUTO DE METROLOGÍA EN MÉXICO)	47
4.3	MÉTODO USADO POR PTB BRAUNSCHWEIG (ALEMANIA).	49
5	DESCRIPCION NORMA ISO 4185	55
5.1	PRINCIPIO	55
5.1.1	Pesaje Dinámico.	60
5.1.2	Comparación del caudal instantáneo	60
5.2	LA PRECISION DEL METODO.....	60
5.2.1	La Incertidumbre global en el método de pesaje.	60
5.2.2	Requisitos para las mediciones precisas.	61
5.3	APARATOS.	61
5.3.1	Mediciones Auxiliares:	67
5.4	PROCEDIMIENTO	68
5.4.1	Método de Pesaje Estático:	68
5.4.2	Método de Pesaje Dinámico.	69
5.4.3	Disposiciones Comunes.....	69
6	INCERTIDUMBRE DEL METODO (NORMA ISO 4185).....	70
6.1	CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE GLOBAL DE LA MEDICIÓN DEL CAUDAL.....	70
6.1.1	Fuentes de Error	71
6.1.2	Cálculo de la incertidumbre en la medición del caudal.	78
6.1.3	Ejemplo de Cálculo de la incertidumbre.....	79
7	DESCRIPCION DEL BANCO DE PRUEBAS	83

7.1	MODELO.....	85
7.2	DESCRIPCION DEL SISTEMA.	86
7.3	MODELACION EN EPANET.....	87
7.4	USOS DE EPANET.....	88
7.5	EQUIPOS A UTILIZAR.....	89
7.5.1	. Tanque suministro o almacenamiento.	89
7.5.2	Tanque de cabeza constante.....	89
7.5.3	. Tanque de pesaje.	92
7.5.4	. Desviador de Flujo.	94
7.5.5	. Determinación de la densidad del agua.	95
7.5.6	Bombas.....	96
7.5.7	. Válvulas.	96
7.5.8	. Especificaciones Especiales.	96
7.5.9	. Adquisición de datos y cálculos del método.....	97
7.5.10	Incertidumbres presentes en el desarrollo del sistema.	99
7.5.11	Presupuesto.....	101
8	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	102
9	BIBLIOGRAFIA.....	104

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 2.1 Tipos de medidores utilizados para la medición de flujo.....	27
Tabla 2.2. Medidores Volumétricos, exactitud, desventajas y ventajas.	30
Tabla 7.1 .Incertidumbres alcanzadas de los componentes del sistema de calibración.....	100

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1. Definición de entradas y salidas de un sistema de distribución de agua.....	21
Figura 2.2. Elementos de un Medidor Electromagnético.	31
Figura 2.3. Modelo de un Medidor Ultrasónico	32
Figura 4.1. Diagrama esquemático usado para la calibración.	45
Figura 4.2. Tanque de pesaje recibiendo el agua que pasa a través del desviador de flujo.	46
Figura 4.3. Diagrama esquemático usado para la calibración	48
Figura 4.4. Facilidades del líquido en el Centro Nacional de Metrología.	49
Figura 4.5 Diagrama esquemático usado para la calibración	50
Figura 4.6 a. Corte de vista de las instalaciones de calibración de medidores de PTB.....	51
Figura 4.7. Instalaciones de medición de PTB. Tuberías de prueba, desviador de flujo, tanque de pesaje).....	52
Figura 5.1. Diagrama de una instalación para calibración por peso. (Método estático, suplido por el nivel de un tanque de cabeza constante).....	56
Figura 5.2. Diagrama de una instalación para medición de caudal por peso. (Usado para una máquina de prueba hidráulica; método estático suplido por el nivel de un tanque de cabeza constante)	57
Figura 5.3. Diagrama de instalación para calibración por peso (método estático, suministro directo de bombeo).....	58
Figura 5.4. Diagrama de una instalación para calibración por peso. (Método dinámico, suplido por el nivel de un tanque de cabeza constante).....	59
Figura 5.5. Ejemplo de diseño de un desviador.	62
Figura 5.6. Ley de operación del desviador.	64

Figura 5.7. Ley del tiempo de medición para la operación de un desviador el cual es idéntico en ambas dirección.....	65
Figura 6.1. Ejemplos de error de distribución en la calibración de la máquina de pesaje.	72
Figura 6.2. Grafica típica usada en la evaluación de ϵRp para un sistema de desviación.....	78
Figura 7.1. Imagen satelital de la ubicación del tanque en el café Madrid (vista 1).	83
Figura 7.2. Imagen satelital de la ubicación del tanque en el café Madrid (vista 2).	84
Figura 7.3 Esquema de Banco de Pruebas para calibración de macromedidores.	85
Figura 7.4 Esquema del sistema montado en EPANET.	87
Figura 7.5 Resultados del modelamiento del sistema realizado en EPANET 2.0.	88
Figura 7.6. Imágenes del Tanque ubicado en el Café Madrid propiedad del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga SA, ESP.	90
Figura 7.7. Diseño del tanque de cabeza constante con vertedero.	92
Figura 7.8. Sistema de pesaje integrado, vista de corte.	93
Figura 7.9. Vista en corte del desviador de Flujo,.....	95

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO. A.....	107
ANEXO. B.....	111
ANEXO. C.....	116
ANEXO. D.....	122
ANEXO. E.....	124
ANEXO. F.....	127

TITULO: DISEÑO Y METODOLOGIA DE UN SISTEMA DE CALIBRACION Y PATRONAMIENTO DE MACROMEDIDORES DE CAUDAL¹

AUTOR: JULIAN FELIPE VARGAS GALVAN**

PALABRES CLAVES: Caudal, índice de agua no contabilizada, macromedidores, calibración, métodos de calibración, instrumentos de medición, precisión, incertidumbre, comparación.

RESUMEN: El objetivo principal de este proyecto es diseñar un banco de pruebas para la calibración de macromedidores de caudal. Teniendo en cuenta la problemática que presenta actualmente el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga SA. ESP en la falta de precisión en la calibración de sus macromedidores de caudal y la falta de bancos de prueba para la calibración de los mismos en el país, se buscó implementar un método de calibración para estos macromedidores que redujera la incertidumbre en las mediciones para de esta manera alcanzar mayor confiabilidad en los procesos de medición, control del agua y también mayor control sobre los índices de agua no contabilizada.

Partiendo de la Norma ISO 4185/1980 "*Measurement of liquid flow in closed conduits*" que menciona métodos de calibración para dispositivos de medición de flujo, se estableció un método de calibración basado en la medición de caudal mediante un sistema dinámico de peso, que permite conocer la cantidad de masa del agua en un tiempo determinado. Teniendo los valores de caudal obtenidos a través de este método se pudieron realizar las respectivas comparaciones con el macromedidor de caudal bajo prueba.

En el proyecto se menciona el método tenido en cuenta, la descripción del banco de pruebas, los instrumentos de medición tenidos en cuenta para el cumplimiento de las condiciones hidráulicas del sistema y se presentan los resultados a través del modelamiento del sistema en EPANET, lo cual permite conocer el desarrollo completo del método y asimismo comprobar que es una excelente opción para la empresa.

¹ TRABAJO DE GRADO

** FACULTAD DE INGENIERIAS FISICOMECANICAS, ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL, DIRECTOR ING. LUIS FERNANDO CASTAÑEDA GALVIS.

ABSTRACT: DESIGN AND METHODOLOGY FOR CALIBRATION SYSTEM AND FLOWMETERS PATTERNS.²

AUTOR: JULIAN FELIPE VARGAS GALVAN**

KEYWORDS: Flow, rates of unaccounted wáter, flowmeters, Calibration, calibration methods, measuring instruments, uncertainty,

ABSTRACT: The aim objective of this project is to design a test for the flowmeters calibration. Taking into account the problems currently presented in the Bucaramanga Metropolitan Aqueduct SA. ESP in the lack of precision in the flowmeters Calibration and lack of testing facilities for calibration of them in the country, it searched to implement a calibration method for these flowmeters that would reduce the uncertainty in the measurements and in this way to achieve greater reliability in the measurement processes, water control and also more control about the rates of unaccounted water.

Based on the ISO 4185 Standard/1980 "*Measurement of liquid flow in closed conduits*" which mention the calibration methods for flow measurement devices, it established a calibration method based on flow measurement through a dynamic weight system, which allows to know the amount of water mass in a given time. Having the flow values obtained by this method the respective comparison could be made with the flow meter under test.

In the project is developed the method outlined by ISO 4185, it describes the testing bank, it specifies the measuring instruments considered for the performance of the hydraulic conditions of the System and it analyzes the results through model of the system in EPANET, which allows to know the full development of the method and also prove that is an excelent option to this company.

² WORK DEGREE

** FACULTY OF FISICOMECHANICAL ENGINEERING, SCHOOL OF CIVIL ENGINEERING, DIRECTRESS ING. LUIS FERNANDO CASTAÑEDA GALVIS.

INTRODUCCIÓN

La Macromedición en un sistema de Acueducto es fundamental, ya que con este procedimiento se puede cuantificar la cantidad de agua que se distribuye en un sector influenciado por la demanda de los usuarios. Asimismo, se puede cuantificar cuánta agua se pierde en la red por fugas y demandas clandestinas, realizando la diferencia entre la sumatoria de los caudales micromedidos en determinado sector y el caudal macromedido en el mismo.

Muchas empresas en el mundo están perdiendo mucho dinero al no tener un control de las aguas que no se contabilizan, pero muchas veces es el usuario el que tiene que pagarlo. Por esta razón es importante identificar los principales puntos para reducir el índice de agua no contabilizada ya que esto traería beneficios desde el punto de vista económico en la reducción en la tarifa de servicio.

Se puede decir que el proceso de macromedición brinda una gran ayuda, ya que permite tener más control y un mejor manejo en el sistema hidráulico que contiene un sector. Entendiendo la influencia de los macromedidores en los sistemas hidráulicos, es importante tener un buen funcionamiento de los mismos, buscando precisión en las mediciones realizadas. Es por ello que la calibración de los macromedidores se convierte en una parte fundamental para obtener los resultados que se esperan en todo el contenido de este proceso.

Este proyecto busca establecer la primera etapa de un sistema de calibración y patronamiento de macromedidores para el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. ESP, debido a la problemática actual que se vislumbra en la incertidumbre en la calibración de algunos macromedidores, ya que se presentan niveles de error en las mediciones. Este modelo se diseñara con base en un

sistema hidráulico localizado en el Barrio Café Madrid de la Ciudad de Bucaramanga (Tanque café Madrid). El tanque Café Madrid cuenta con una capacidad de 172 m³, una altura de 3 metros, área de 57.33 m², cuya entrada se realiza mediante una tubería en hierro dúctil de diámetro 6" y la salida con una tubería de hierro fundido de 6".

Actualmente en el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga se están realizando patronamientos en los equipos, comparando las mediciones con un equipo estándar, y al realizar las pruebas se encuentra que el intervalo de error de algunos equipos supera el límite permisible para realizar mediciones apropiadas. Por tal razón el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga vislumbra la necesidad de implementar un método más exacto que reduzca la incertidumbre en la calibración de estos equipos y para ello se requiere implementar un sistema de calibración y patronamiento así como una metodología para calibrar dichos macromedidores, con base en la Norma ISO 4185 "*Measurement of liquid flow in closed conduits*" permitiendo la medición correcta de caudal a lo largo de la red, lo cual se verá reflejado en la determinación de IANC (Índice de Agua no Contabilizada) confiables, logrando así la cuantificación apropiada de las pérdidas técnicas de la red.

Hoy en día el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga cuenta con 22 macromedidores de caudal, dos electromagnéticos, dieciocho ultrasónicos y dos ultrasónicos portátiles, los cuales son usados en el proceso de sectorización, análisis del balance de aguas, y de insumo en el proceso de calibración de modelos hidráulicos los cuales permiten ajustar los parámetros visualizados en campo con los parámetros obtenidos en un modelo y tomar decisiones de operación y mantenimiento en la red de distribución.

En el proceso de tener un control más completo de los sistemas que componen una red de distribución, el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga cuenta con

un programa de gestión integral de redes que permite alcanzar un mayor nivel de control en las deficiencias que se puedan presentar durante la producción y distribución del agua. Este programa unido a la precisión en los procesos de medición se convierte en un gran aporte para el desarrollo integral de control de la empresa.

1 OBJETIVOS GENERALES Y ESPECÍFICOS.

1.1 OBJETIVO GENERAL

Aplicar una metodología para la calibración y patronamiento de macromedidores de caudal, usando como referencia la metodología planteada por la norma ISO 4185 "Measurement of liquid flow in closed conduits", buscando a través de este método reducir las incertidumbres generadas en los procesos de calibración para macromedidores de caudal que se realizan actualmente en el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga SA, ESP.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

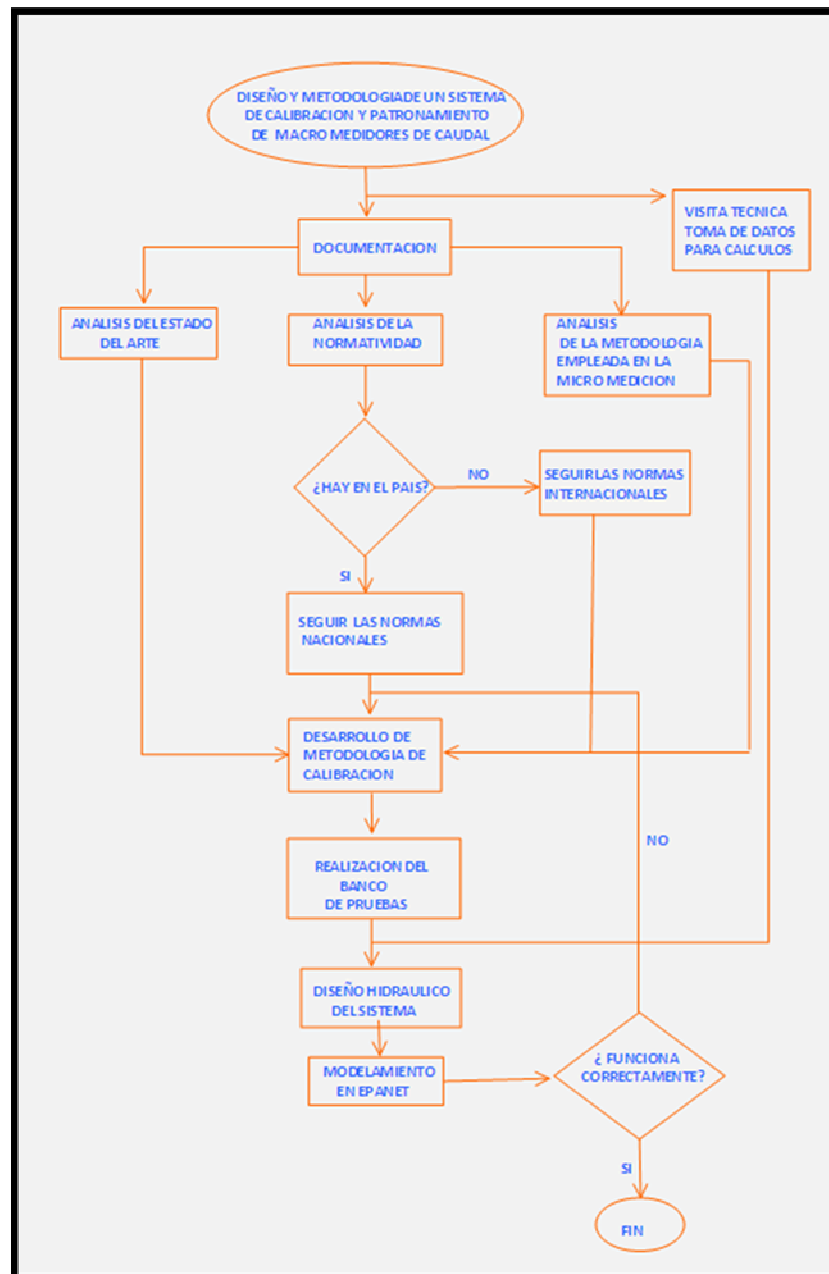
- a) Análisis del estado del arte y la normatividad existente para la calibración de los macromedidores de caudal.
- b) Establecer un método para poder realizar las respectivas calibraciones basadas en las normas, ISO-ICONTEC
- c) Establecer el diseño hidráulico del banco de pruebas para las calibraciones, planteando una solución que se acomode al tanque ubicado en la Zona de Café Madrid en el norte de la ciudad de Bucaramanga
- d) Diseñar el montaje del banco de prueba para los macromedidores de caudal.
- e) Realizar un modelamiento en Epanet del sistema anteriormente diseñado.

1.3 METODOLOGÍA

- a) Realizar un análisis del estado del arte, acerca de las investigaciones que se han hecho en este campo.
- b) Revisar y clasificar la normatividad existente que rige las calibraciones de macromedidores en el mundo y si las hay en el país.
- c) Realizar las visitas técnicas necesarias al tanque ubicado en el Café Madrid en la zona norte de la ciudad de Bucaramanga, con el fin de recolectar datos necesarios para el diseño del sistema hidráulico requerido.
- d) Desarrollar una metodología de calibración de los macromedidores de caudal tomando como base las anteriores consideraciones.
- e) Realizar un análisis y diseño del banco de prueba para las mediciones.
- f) Realizar el diseño del sistema de calibración y patronamiento, usando los conocimientos de hidráulica de redes.
- g) Modelar Epanet 2.0, con el fin de tener claridad en el comportamiento del sistema y prever comportamientos al cambiar las variables que influyen en la macromedición como son las bombas, las tuberías, caudales, etc.

1.4 DIAGRAMA DE FLUJO

Figura 1.1. Diagrama de Flujo para el Diseño y Metodología de Calibración de Macromedidores de Caudal



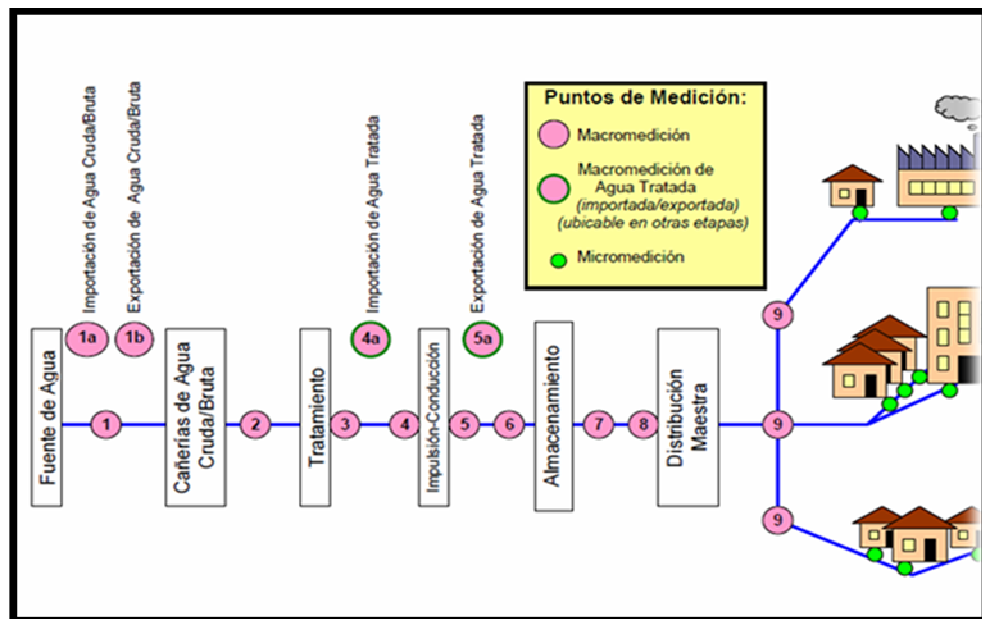
2 MEDICIÓN DE CAUDALES EN REDES DE DISTRIBUCIÓN.

2.1 MACROMEDICIÓN

La Macromedición es la medición de grandes caudales, destinados a totalizar la cantidad de agua que ha sido tratada en una planta de tratamiento y la que está siendo transportada por la red de distribución en diferentes sectores.³

Se entiende por, las actividades de procesamiento, medición, almacenamiento e incorporación de datos respecto a caudales, presiones y niveles de agua en el sistema de abastecimiento.⁴

Figura 2.1. Definición de entradas y salidas de un sistema de distribución de agua.



³ BUSINESSCOL [Online]: Productos-Glosarios. Disponible de internet:

<http://www.bussinescol.com/productos/glosarios/servicios%20publicos>.

⁴ GONZALES, Caicedo Alberto. Proyecto de desarrollo técnico de las instituciones de abastecimiento de agua potable y alcantarillado. Importancia de la macromedición. emcali, 1986

Es indispensable para todo acueducto contar con un mecanismo que pueda brindar una evaluación completa acerca de la producción, distribución, y facturación, del agua que se provee a una población abastecida. Es por eso que se hace necesario que exista una correcta medición, ya que sin esto no hay manera de controlar y evaluar las cantidades de agua producida, distribuida, vendida, facturada, cobrada y contabilizada, lo que trae consecuencias a la empresa que por lo general son de carácter económico.

Se puede concluir que es un logro para cualquier compañía obtener la medición de los caudales generales suministrados a la red de distribución, es decir obtener la medición de los volúmenes que se entregan a los diferentes sectores de distribución con el fin de alcanzar la precisión en los datos que se generan en el proceso de abastecimiento, lo cual permitirá obtener mejores resultados que mostraran datos más precisos y más reales para de esa manera llegar a la optimización de los recursos.

Por lo tanto la macromedición facilita:

- El diagnóstico, el planeamiento, el diseño, la operación, el mantenimiento y la comercialización del agua.
- Permite determinar el rendimiento y los costos unitarios de: La producción, la distribución y la comercialización del agua.

Existe un parámetro de control llamado IANC a través del cual se puede conocer la relación entre los volúmenes de agua producida y facturada. Este valor se obtiene mediante la medición de los volúmenes entregados a los sectores de distribución (macromedición) y el volumen facturado a los usuarios.⁵

⁵ETAPA, Empresa municipal de telecomunicaciones, agua potable, alcantarillado y saneamiento. IANC, Índice de agua no contabilizada, [citado 2007]. Disponible en internet: http://www.etapa.net.ec/Agua/agua_ucanc_mac.aspx

$$\text{IANC \%} = \frac{V_p - (V_f + V_e)}{V_p} * 100$$

Ecuación 2.1

Dónde:

IANC % = Porcentaje de IANC (Índice de Agua No Contabilizada.)

V_p = volumen producido o macromedido: distribuido desde plantas y/o reservas

V_f = Volumen Facturado

V_e = Volumen estimado (volumen de agua que no factura la empresa debido a problemas como daños, etc.)

Este porcentaje de agua no contabilizada se puede obtener mediante la relación entre el volumen producido (proceso de macromedición) y el volumen facturado (proceso de micromedición). Además de ello se tiene en cuenta un volumen estimado que corresponde al volumen de agua que es utilizado por los usuarios pero que no es medido por la empresa debido a problemas como: daños en los medidores, casas cerradas, lugares sin medidor, etc.

Existen tres grandes causas reconocidas que conllevan a que este índice sea menor o mayor. La primera es por error en medición, ya sea en la macromedición o en la micromedición, estas representan entre un 30% y 40% de las pérdidas de una empresa de acueducto. La segunda causa son las fugas, las cuales aportan un 25% y un 35% a la pérdida y la tercera causa son las conexiones clandestinas, fraudes o robos.

La primera y tercera causa, es agua consumida, pero que no se alcanza a medir. En pocas palabras es agua que no se pierde pero que genera pérdidas de tipo económico a la empresa.

Asimismo debido a los problemas que se presentan por la falta de efectividad en la medición de volúmenes de agua, es necesario darle la debida importancia a los procesos de medición y de esta manera solucionar los niveles de pérdidas.

De ahí parte el interés de tener procesos de medición que presenten lecturas lo más precisas posibles para de esta manera evitar problemas de carácter hidráulico y aportar al desarrollo económico de la población.

2.2 LA MACROMEDICIÓN EN EL CONTROL DE FUGAS.

Cuando se habla de pérdidas por fugas, se refiere al volumen de agua que se suministra a las redes de distribución pero que no es consumido por los usuarios.

Si se tiene un efectivo proceso de macromedición en donde se conocen los caudales y las presiones en los diferentes puntos que conforman el sistema, se puede detectar fácilmente las pérdidas generadas por fugas.

Las principales causas de las fugas en un sistema pueden ser⁶:

- Las malas condiciones de las tuberías.
- Rupturas en las tuberías.
- La calidad de los materiales usados cuando se conforma el sistema.
- Movimiento Sísmico.
- Mala operación del sistema, (al generarse sub-presiones o sobre-presiones teniendo en cuenta el rango de presiones establecido en el diseño.)
- Deficiencia en la mano de obra del transporte y la instalación.

⁶ BENAVIDES, Oscar Andrés. Aspectos técnicos de Agua no Contabilizada en Colombia. Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería civil y ambiental, diciembre 2003.

Si no existe un buen programa de macromedición no se tiene la posibilidad de detectar y reparar las fugas que se generan en el sistema. A diferencia de los resultados que se pueden obtener si se conocen aquellos sectores en donde es necesario realizar acciones para la detención y control de fugas.

2.3 BENEFICIOS DE LA MACROMEDICIÓN.

- La macromedición permite tener un control más efectivo de los instrumentos de toma (compuertas, válvulas, etc.).
- La macromedición permite determinar el rendimiento de la conducción del agua trayendo como resultado un conocimiento de fugas o de pérdidas por robo que se puedan presentar a lo largo de la aducción de aguas crudas.
- La macromedición es indispensable para determinar el rendimiento de una planta de tratamiento.
- La macromedición facilita la optimización del funcionamiento de la red pues se puede determinar la ubicación de los lugares que tienen grandes pérdidas, consumo irracional o desperdicio.
- La macromedición es necesaria para determinar los costos de funcionamiento y de producción de una planta de tratamiento.
- La macromedición permite conocer el valor real del agua suministrada para calcular el agua no contabilizada y sus componentes.

2.4 IMPORTANCIA DE LA MACROMEDICIÓN.

El efecto de la precisa medición del agua sobre la producción de la misma, se considera de gran importancia ya que se necesita tener un control general de lo

que se produce vs lo que se ofrece, para de esa manera evaluar los resultados obtenidos y así alcanzar mayor efectividad en la producción , distribución, facturación entre otros procesos.

Toda empresa que trabaja en el abastecimiento de agua para una población, enfrenta diversos problemas en este sentido, ya que no alcanzan los niveles deseados de precisión en las mediciones que realizan del agua que se produce. Es por eso que si no existe una correcta medición, no habrá manera de controlar ni de evaluar los resultados.

Vemos por tanto, que la macromedición en sí, facilita el diagnóstico, el planeamiento, el diseño, la operación, el mantenimiento y la comercialización total del agua de un sistema. Además de ello, permite determinar el rendimiento y el conocimiento de los costos unitarios de la producción, distribución y comercialización, sin contar con la importancia que esta tiene en la planificación, el diseño, el control de pérdidas, etc.

2.5 INSTRUMENTOS UTILIZADOS PARA REALIZAR MACROMEDICIÓN.

Una de las principales dificultades de hacer la macromedición para un sistema de abastecimiento de agua, radica en que los caudales no son constantes en el tiempo por lo que se debe recurrir a instrumentos que puedan medir estos caudales de manera continua.

Hoy en día se hace énfasis en los macromedidores de carácter electrónico como son, los electromagnéticos, electrónicos, y ultrasónicos, aunque también existen otros de carácter más sencillo o primitivo como son los vertederos, canales, hidrómetros, orificios, Venturi y pitómetros, los cuales son de carácter hidráulico.

Hoy en día una planta por lo general alterna los dos sistemas aunque en nuestro país todavía existen plantas en donde no se han implementado los macromedidores de carácter electrónico, ya sea porque su producción no lo amerita, o por que no cuentan con los recursos económicos necesarios para implementar y mantener estos equipos.

Para realizar la macromedición es necesario utilizar instrumentos que permiten medir los caudales variables a lo largo del tiempo en una red.

Existen dos clases de instrumentos: Los medidores de flujo volumétrico y los medidores de flujo másico, los cuales se describen en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Tipos de medidores utilizados para la medición de flujo.

	Sistema	Medidor
Medidores de flujo volumétrico	Presión diferencial Medidores conectados a tubo U o a elementos de fuelle o diafragma	Placa Orificio
		Tobera
		Tubo Venturi
		Tubo Pitot y Tubo Annubar
	Área variable	Rotámetros
	Velocidad	Turbina
		Ultrasonido
	Tensión inducida	Magnético
	Desplazamiento positivo	Rueda oval, helicoidal
Torbellino (Vortex)	Medidor de frecuencia	
Fuerza	Placas de impacto	
Medidores de flujo másico	Térmico	Diferencia de temperatura en sondas de resistencia
	Coriolis	Tubo en vibración

2.5.1 Instrumentos de Flujo Volumétrico⁷

Su principal objetivo es medir el volumen de agua que pasa por una tubería, lo cual se puede hacer mediante dos formas:

- **Forma Directa:** Mediante dispositivos de desplazamiento positivo que son esencialmente instrumentos de cantidad de flujo, que se utilizan para medir líquidos en procesos discontinuos⁸
- **Forma Indirecta:** Mediante dispositivos de Presión diferencial

2.5.1.1 Tipos de medidores Volumétricos.

Medidores de accionamiento mecánico

- Medidores de tipo pistón
- Medidores de paletas deslizantes
- Medidores de engranajes
- Medidores de rueda oval
- Medidores helicoidales
- Medidores de turbina

Medidores de presión diferencial

- Tubos Venturi
- Tubos Dall
- Placas orificio
- Boquillas de flujo
- Tubos Pitot
- Codos
- Medidores de área variable

⁷ QUIMINET.COM. Medidores de caudal volumétrico [Online], [citado 6 de octubre de 2006]. Disponible en internet http://www.quiminet.com/ar7/ar_zgthgsAhgsA-los-medidores-de-caudal-volumetrico.htm

⁸JAMES, Orice. Instrumentación para medición y control, Tomo III Editorial McGraw-Hill.

- Medidores de placa

2.5.2 Otros medidores volumétricos

- Medidores de caudal electromagnético
- Medidores ultrasónicos:
 - Medidores ultrasónicos por impulsos
 - Medidores ultrasónicos utilizando el efecto Doppler

2.5.3 Exactitud, Ventajas y Desventajas de los medidores volumétricos⁹:

(Ver tabla 2.2)

2.6 PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO PARA MEDIDORES ELECTROMAGNÉTICOS Y ULTRASÓNICOS.

2.6.1 Medidores de caudal electromagnéticos

Utiliza el mismo principio básico que el electromagnetismo, es decir, cuando un conductor se mueve a través de un campo magnético se genera una fuerza Electromotriz en el conductor, siendo su magnitud directamente proporcional a la velocidad media del conductor en movimiento. Si el conductor es una sección de un líquido conductor circulando por un tubo aislado eléctricamente, a través de un campo magnético y se montan los electrodos diametralmente opuestos en la pared de la tubería, tal como se muestra en la Figura 2.2, la fuerza electromotriz generada a través de los electrodos es directamente proporcional a la velocidad media del fluido¹⁰.

⁹UNIVERSIDAD La pampa (Argentina). Facultad de Ingeniería, material laboratorio mecánica de fluidos. Disponible en Internet http://www.ing.unlpam.edu.ar/~material/fluidos/pdf/clase_medidores_flujo.pdf

¹⁰ UNIVERSIDAD La pampa (Argentina). Facultad de Ingeniería, material laboratorio mecánica de fluidos. Disponible en Internet http://www.ing.unlpam.edu.ar/~material/fluidos/pdf/clase_medidores_flujo.pdf . 26p.

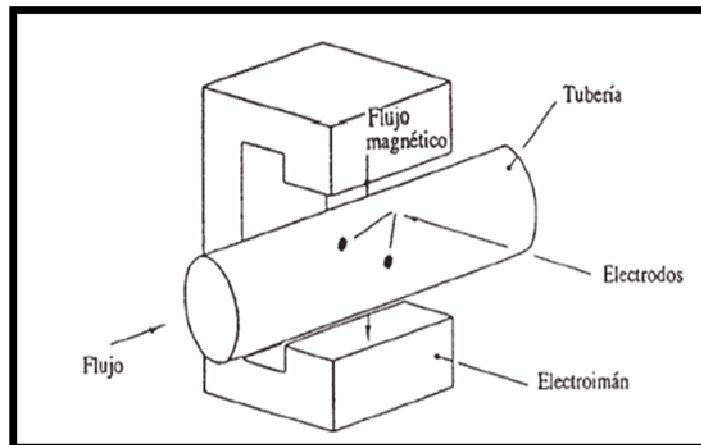
Tabla 2.2. Medidores Volumétricos, exactitud, desventajas y ventajas.

TIPO	EXACTITUD	DESVENTAJAS	VENTAJAS
Placa de Orificio.	2-3 %	El coeficiente de descarga puede cambiar con el tiempo debido al desgaste y la acumulación de suciedad. Se puede obstruir y reducir el diámetro del orificio	Es económico y el 50% de los medidores de caudal utilizados en la industria son P.O. (Placa de orificio)
Tobera	0.95-1.5%	Es más costosa que la P.O. (Placa de Orificio)	Con respecto a la P.O. (Placa de Orificio) Es menos propensa a la obstrucción por lo cual tiene un mayor tiempo de vida útil. La pérdida de presión permanente es menor.
Tubo Venturi	0.75%	Es más costosa que la P.O. (Placa de Orificio)	La pérdida permanente de presión es mucho menor que la que ocasionan el orificio y la tobera.
Medidor de desplazamiento positivo	1.5%	No se utiliza para gases Tiene baja fricción y es de bajo mantenimiento. Ocasiona una pérdida permanente de presión.	El fluido debe ser líquido limpio y debe poseer cierta viscosidad. Se utiliza como totalizador. En el 10% de las aplicaciones industriales
Medidores de turbina	1%	No se utiliza para control. Genera una caída de presión apreciable, pero menor que la P.O (Placa de Orificio)	El fluido debe ser limpio y poco abrasivo. Sirve para líquidos y gases
Medidor Magnético	0.5%	Requiere de altos costos de instalación y mantenimiento El fluido debe ser conductor eléctrico. La tubería debe ser de plástico en la sección donde se coloca el medidor	No es intrusivo. Se utiliza en tuberías de diámetro grande. Se utiliza para fluidos limpios, y sucios en flujo laminar y turbulento.
Medidor tipo Vortex	Líquido. 0.75% Gases 1%	Variabilidad del rango 15:1, 25:1. Susceptible a vibraciones. Operan con bajo consumo de energía y requieren de poco mantenimiento.	Es intrusivo Se debe utilizar con fluidos limpios y poco abrasivos, en tuberías de diámetro entre 1 y 6".

Tomado de: Facultad de Ingeniería, material laboratorio mecánica de fluidos. UNIVERSIDAD La pampa

Cuando un conductor se mueve a través de un campo magnético se genera una fuerza electromotriz en el conductor, siendo su magnitud directamente proporcional a la velocidad media del conductor en movimiento.

Figura2.2. Elementos de un Medidor Electromagnético.



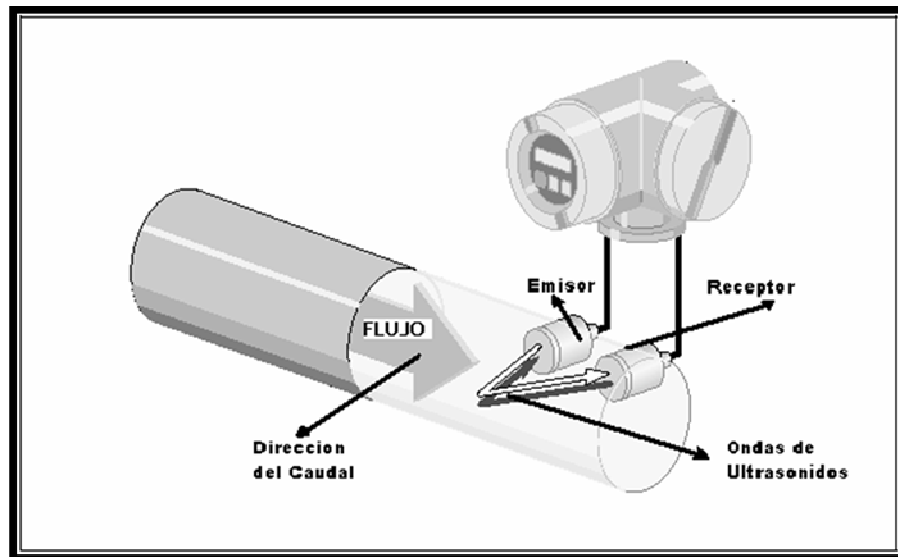
Tomado de: Facultad de Ingeniería, material laboratorio mecánica de fluidos. UNIVERSIDAD La pampa

2.6.2 Medidores ultrasónicos

Estos medidores utilizan emisores y receptores de ultrasonido situados ya sea dentro o fuera de la tubería, son buenos para medir líquidos altamente contaminados o corrosivos, porque se instalan exteriormente a la tubería. Los medidores tienen una exactitud de $\pm 0,5\%$ a $\pm 5\%$ y una variabilidad del rango entre 20:1 a 75:1 con escala lineal.

Esta técnica es un método no invasivo. Puede utilizarse con fluidos conductores, aunque se usa más para medir fluidos corrosivos y con sedimentos. Estos instrumentos están sujetos externamente a la tubería lo que le da una ventaja con respecto a los electromagnéticos.

Figura2.3. Modelo de un Medidor Ultrasónico



Tomado de: Facultad de Ingeniería, material laboratorio mecánica de fluidos. UNIVERSIDAD La pampa

Condiciones de Funcionamiento:

Se deben cumplir unas especificaciones antes del punto a medir, guardando unas distancias específicas en la conducción expresada con relación al diámetro de la tubería de 10 a 20 veces, o en algunos casos de 5 veces el diámetro.

Desventajas:

Al igual que en el caso de los medidores magnéticos, los medidores de caudal ultrasónicos no presentan obstrucciones al flujo, no dan lugar a pérdidas de carga, por lo que son adecuados para su instalación en grandes tuberías de suministro de agua, donde es esencial que la pérdida de carga sea pequeña.

Ventajas:

Los transductores son incorporados en el cuerpo del medidor, sin necesidad de juntas de contacto con el fluido. No se necesita tubería en derivación ni válvulas de aislamiento, ya que todos los elementos activos pueden reemplazarse sin

contacto alguno con el líquido. Para tuberías de diámetro superiores a 400 mm ofrecen una solución competitiva.

2.6.3. Exactitud de los Macromedidores usados por el Acueducto.

Como se mencionó anteriormente el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga cuenta con 22 Macromedidores de Caudal, (ultrasónicos (18), electromagnéticos (2) y ultrasónicos portátiles (2), cuyas marcas son Endress & Hausser y Kronhe).

A continuación se presenta la exactitud de dichos macromedidores, según sus manuales:

- **Proline Prosonic Flow 93T Portable (Macromedidor Ultrasónico)**

Si es necesario, el dispositivo puede ser suministrado con un certificado de exactitud (informe de la medición). Para certificar la exactitud del dispositivo, una medición se realiza bajo condiciones de referencia. La prueba de precisión, se realiza bajo los siguientes límites de error del dispositivo (a una velocidad de flujo > 0,3 m / s y un número de Reynolds > 10000):

Tabla 2.5. Prueba de precisión del dispositivo.

Sensor	Diámetro Nominal	Errores garantizados de los dispositivos
Prosonic P	DN 15	+ ó - 0,5% o.r. + ó - 0,05 % o.f.s.
	DN 25, DN 40, DN 50, DN 100	+ ó - 0,5% o.r. + ó - 0,05 % o.f.s.

Tomado del manual Proline Prosonic Flow 93T Portable.

o.r = ó de la lectura

o.f.s = valor de la escala completa (Prosonic P (DN 50 a 4000) = 15 m/s; Prosonic P (DN 15 a 65) = 10 m/s).

3 CALIBRACIÓN DE MACROMEDIDORES¹¹

La siguiente información fue adquirida a través de la norma ISO TC 30/SC 9 (Guía práctica para calibración de macromedidores) que se ha convertido en la mejor guía para el desarrollo de este tema.

3.1 ¿QUÉ ES LA CALIBRACIÓN?

La calibración es el conjunto de operaciones que en condiciones específicas establecen la relación entre valores obtenidos por un medidor o sistema de medición y los valores dados por un patrón.

La medición del caudal y el proceso de calibración no se basan en una sola operación. La medición de la cantidad de flujo depende de la cantidad básica medida y una serie de factores de influencia. También el dispositivo de flujo tiene que ser calibrado a través de un rango de caudales. Todo esto se combina en un conjunto de operaciones las cuales se unen para ofrecer la calibración.

Como el flujo y los factores de influencia (por ejemplo, temperatura y viscosidad), influyen en el desempeño del medidor, la calibración se lleva a cabo en condiciones específicas y éstas deben ser definidas.

Una calibración no es una operación absoluta. Se trata de una comparación entre el dispositivo que está siendo calibrado y un patrón. A través de esta comparación, se da una relación entre las mediciones dadas por el dispositivo en proceso de medición y las mediciones dadas por el patrón. Estas mediciones pueden ser

¹¹INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. "Calibración de Macromedidores (una mejor guía práctica)". Norma ISO/TC 30/SC 9. Portugal, 2003.

establecidas y expresadas de muchas maneras lo cual da una confianza significativa de como el dispositivo trabajará estando en uso.

Como la medición del flujo de fluidos es dinámica y todos los dispositivos de medición son afectados de alguna manera por las condiciones de uso, será imposible producir una norma que reproduzca plenamente las condiciones bajo las cuales el medidor será usado en la práctica. Los dispositivos de flujo se ven afectados por la temperatura, la viscosidad, perfil de flujo, fluctuaciones del caudal y pulsaciones. También se ven afectados por el medio ambiente, vibración, cambios de temperatura etc. Diferentes dispositivos se ven afectados de diferentes maneras.

Como una calibración es una comparación entre un dispositivo de flujo y el patrón, la relación resultante entre los dos será obtenida bajo condiciones especificadas y debe llevarse a cabo una determinación de la relevancia entre los dos al final de la aplicación. La selección de la norma debe ser un compromiso para alcanzar las mejores condiciones de uso. La norma también debe ser compatible con el desempeño, las características del medidor que será probado y el resultado deseado.

3.2 TASA, CANTIDAD Y TIEMPO.

El mecanismo por el cual un dispositivo de medición de caudal hace una lectura de flujo es dinámico. El sensor reacciona a la corriente de flujo que atraviesa el dispositivo para realizar unas lecturas relacionadas con el caudal de agua o la cantidad que pasa a través de él. Es evidente que la medición de caudal se relaciona con la medición del intervalo de tiempo en el cual atraviesa la cantidad medida. En la práctica el uso final del dispositivo tiene diferentes expectativas para el comportamiento y por lo tanto para la calibración. Establecer esta relación es

vital para relacionar el tiempo de respuesta del dispositivo en el método de calibración.

La interpretación del tiempo de respuesta es relativamente sencilla para los contadores mecánicos. La interfaz mecánica entre el líquido y el indicador puede ser descrita y definida en términos de impulso y arrastre que afectan el medidor cuando el flujo cambia. Con el advenimiento de la electrónica ha sido más difícil llegar a establecer este principio.

Si el tiempo de respuesta del dispositivo no coincide con el plazo en que una prueba de calibración se toma en un punto, puede ser vista una pobre compensación de repetitividad o calibración, aunque posiblemente no afecten el rendimiento en el servicio.

3.3 RESOLUCIÓN.

Aunque pueda parecer obvio, la resolución del dispositivo debe ser suficiente para que una calibración coincida con la incertidumbre requerida. Para ello, el patrón debe ser capaz de medir el líquido suficiente para ajustarse a la resolución y la incertidumbre del dispositivo en medición. Por ejemplo, si un medidor de flujo tiene una resolución de 1 litro, cualquier patrón utilizado para la calibración debe tener un volumen de forma significativo de más de 1000 litros para alcanzar una incertidumbre de 0,1 %.

3.4 TRAZABILIDAD, EXACTITUD Y LA INCERTIDUMBRE

Como una calibración es una comparación de la lectura de un dispositivo con el de un patrón, tenemos que considerar qué tipo de propiedades se requerirán para el patrón. En primer lugar, el patrón ha de medir la misma cantidad que el dispositivo. No tiene sentido comparar las lecturas de la masa del medidor, con el volumen de un tanque sin poder medir la densidad del agua. En la medición del caudal, el

patrón es un sistema compuesto de una medida de cantidad y medidas auxiliares de las condiciones de flujo, las propiedades y los factores de influencia.

Otra característica del patrón es que debe demostrarse que reproduce la medida que pretende hacer con cierto grado de confianza. Para ello todas las medidas en el sistema tienen que mostrar la trazabilidad de un alto nivel de mediciones y en última instancia normas nacionales e internacionales.

La precisión del patrón o la calibración del mismo será requerida con frecuencia. Muchos dirán que el término exactitud no tiene cabida en una discusión de calibración. Sin embargo en la práctica, 'exactitud' es el término que se puede usar para expresar la expectativa, y la especificación general de manera que se entiende que tiene poco significado científico. La precisión expresa cuan cerca está el valor obtenido al "verdadero" valor del patrón.

Para expresar plenamente la "exactitud" de un patrón o una calibración, es la "incertidumbre" la que debería ser nombrada. Para la medición de flujo la confianza en que extiende el resultado dentro de la incertidumbre es normalmente citado por $k=2$, que es aproximadamente el 95% de confianza. Cada norma debe ser evaluada por la incertidumbre en la determinación de su cantidad medida como de hecho debe ser el resultado de una calibración.

La figura de la incertidumbre citada para una calibración se determinará a partir de una evaluación detallada de todos los componentes del sistema y el uso del mismo. Esto especificaría el estado para que el parámetro de la incertidumbre se cita. Esta puede ser la cantidad medida por el patrón o la cantidad que pase a través del medidor de flujo. Esta última es la incertidumbre que se necesita inicialmente. Se hace énfasis en que esto no es la incertidumbre de los resultados de calibración. La resolución del medidor, los factores de influencia y, finalmente,

la repetitividad y linealidad de los resultados de la calibración, todo debe ser incluido para proporcionar la incertidumbre de la calibración.

El propósito de la calibración consiste en estimar la incertidumbre asociada con las mediciones del medidor en su aplicación final. Es evidente que la calibración sólo proporcionará un componente de esta incertidumbre en la medición final. Una responsabilidad recae en el usuario final al utilizar la incertidumbre de calibración, junto con una comprensión del uso del medidor en comparación con las condiciones de calibración, para proporcionar este resultado final. Todos los resultados de la calibración debe tener una incertidumbre declarada y esto debería estar en el informe presentado. La declaración debe ser clara e inequívoca en cuanto a lo que se incluye y que es citado en el resultado.

También es importante mencionar que la incertidumbre puede variar en todo el rango del medidor de flujo. La cantidad de líquido contenido en la norma puede contribuir a diferentes incertidumbres, o el rendimiento del medidor puede variar. Al especificar la incertidumbre requerida de una norma relativa a la del medidor, es un consejo general que la norma deba tener una incertidumbre 10 veces más pequeña que el requisito del dispositivo a ser calibrado. Aunque este es un buen principio, en la medición de flujo, a menudo no es posible lograr esto debido a las altas expectativas de los medidores de caudal. Un patrón con una incertidumbre de un factor tres veces más bajo que el requisito puede ser la única solución práctica.

En algunas situaciones, sobre todo en las pruebas de campo, la incertidumbre del patrón puede ser menor que la incertidumbre esperada del medidor. Cuando esto sucede, la incertidumbre de la calibración lograda debe ser mayor que el del patrón por lo tanto aumenta la incertidumbre de la medición final. No es una situación ideal, pero sí una situación que necesariamente puede ser la única solución práctica.

3.5 VISUALIZACIÓN DEL RESULTADO

Para mostrar el resultado de una calibración, se tiene que conocer el proceso de salida de datos del medidor. Los medidores de flujo pueden indicar el caudal de maneras diferentes. Puede haber un indicador mecánico o electrónico que indique el caudal de agua, o una salida electrónica a base de pulsos, frecuencia o corriente.

La salida puede ser en forma de una presión diferencial. Donde la salida se basa en el caudal de agua. (Frecuencia, caudal o presión diferencial.). Las lecturas de salida deben ser mostradas y promediadas durante cada punto de la prueba de calibración. Si la salida de datos se basa en la cantidad que pasa, (es decir, total de pulsos o exhibición de la cantidad), la lectura de la pantalla tiene que ser comparada con una cantidad de fluido medido por el patrón. Si la pantalla es una representación visual, claramente el flujo tiene que ser detenido al leer la pantalla, pero si la salida es eléctrica, la apertura de la puerta electrónica puede coincidir con una medida dada por el patrón. El resultado de una calibración normalmente se da en forma tabular mostrando la lista de las mediciones del estándar y el dispositivo. El grado en que se dan los factores de influencia y los datos obtenidos dependen de las especificaciones de la calibración.

La presentación del medidor y las lecturas estándar no son las más útiles para interpretar el resultado de la calibración. Por lo tanto, es normal para el cálculo algún tipo de diferencia o factor. Este indicador de rendimiento se puede utilizar para mostrar el resultado de modo que refleje mejor el desempeño del medidor a través del rango de caudal y así corregir la salida de datos del medidor para su uso en un futuro.

Una serie de diferentes indicadores de rendimientos son usados. A continuación se presentan algunos:

- **Factor-K:** Usado para medidores con salidas de pulso proporcionales a la cantidad que pasa por el sistema. K-Factor es expresado como pulsos por unidad de cantidad.
- **Factor:** Factor numérico, que multiplica el resultado incorrecto de la medición por el error sistemático.

$$F = \frac{Q_s}{Q_i} \quad \text{O} \quad F = \frac{V_s}{V_i}$$

Ecuación 3.1

Donde F es el factor de medición; Q es el caudal, V es el volumen, i es indicado por el dispositivo y s es el valor medido en la norma.

Al igual que con el factor K , este es el número con el que se multiplica la salida para dar la “verdadera” lectura.

- **Error:** el error es la diferencia entre el valor indicado en el medidor y el valor determinado por la norma. Error relativo es el error dividido por el valor determinado por el patrón, es normalmente utilizado y expresado en porcentaje

$$E = \frac{Q_i - Q_s}{Q_s} * 100$$

Ecuación 3.2

El error puede ser definido para medidores con salidas eléctricas de pulsos, frecuencia voltios o mi. En este caso, el valor indicado se calcula a partir de la lectura de salida y la relación predeterminada (normalmente lineal) entre el valor de salida y la cantidad equivalente o caudal. Por ejemplo se puede suponer que $20\text{mA} = 10\text{ l/s}$ y $4\text{ mA} = 0\text{ l/s}$. El valor de Q_{ind} se calcula a partir de la corriente medida y la relación lineal.

- **Coefficiente de descarga (Cd):** el indicador de rendimiento Cd es usualmente definido para medidores de presión diferencial, tales como placas de orificio y boquillas. El Cd es la relación entre el flujo real y el flujo teórico. El caudal teórico es definido en términos del diámetro efectivo de la garganta del dispositivo. Como no se conoce Cd, calculando Cd las proporciones varían entre 0,5 a 1 dependiendo del dispositivo. Los Orificios típicos dan un Cd poco más de 0,6 y boquillas en torno al 0,9. El Cd sin embargo es relativamente constante para cualquier dispositivo en particular, sólo varían ligeramente en el rango de flujo.
- **Caudal de agua:** Para expresar el funcionamiento de un dispositivo, debe ser expresado el rendimiento del rango de caudal que atraviesa el mismo. El caudal de agua se expresa normalmente en términos de cantidad por unidad de tiempo y se eligen las unidades adaptándolas a la aplicación. Alternativamente se puede tener en cuenta el número de Reynolds, que puede añadir nuevas dimensiones a la curva de rendimiento por la contabilidad de la viscosidad y la densidad.

3.6 FRECUENCIA DE CALIBRACIÓN.

Especificar la frecuencia para calibrar un medidor de flujo es una pregunta común y de vital importancia ya que la calibración puede ser un ejercicio costoso pero tener un medidor de flujo con lecturas erradas puede ser aún más costoso. Desafortunadamente no hay una respuesta precisa a la pregunta. En algunas aplicaciones la respuesta es fácil. Una tercera parte o la norma definirán la frecuencia de calibración. Para la mayoría de las aplicaciones es el mismo usuario el que debe examinar y definir su propio razonamiento para justificar los intervalos de calibración. La decisión es compleja y se basa en una serie de factores. El objetivo es definir un intervalo de calibración que permita minimizar el riesgo de una lectura incorrecta del medidor lo cual genera un impacto significativo en el proceso de medición.

Otros factores que afectan la decisión pueden ser la historia del medidor o cuando el proceso está cerrado por mantenimiento. Para las aplicaciones de control de entidades dedicadas a este proceso, el requerimiento de una tercera parte o de un regulador puede requerir intervalos de calibración como una condición de operación.

Siempre es bueno tener los dos gráficos de calibración, y los gráficos de control del desempeño del medidor. Esto ayudará en la selección de intervalos y también mostrará los cambios en la indicación del rendimiento de la degradación del medidor y el rendimiento antes de fallar. No se desconoce que estos gráficos indican también calibraciones que son atípicas.

3.7 CONDICIONES PARA LA CALIBRACIÓN DE FLUIDOS.

- **Propiedades del Fluido**

Como todos los medidores de flujo deben interactuar de alguna manera con el líquido que fluye, la naturaleza del fluido y la forma en que se distribuye en el medidor debe afectar al rendimiento.

Por esta razón es conveniente calibrar utilizando el mismo fluido y la misma tubería para que el medidor funcione normalmente. Esto no es posible y por lo tanto el mejor compromiso económico debe establecerse en la elección de la calibración. Esta se basará en el derecho final del medidor, la incertidumbre requerida y un conocimiento del comportamiento de tipo medidor.

Las propiedades del fluido, tales como, la densidad, la temperatura, la conductividad, la presión también pueden ser consideradas cuando se replica el uso del medidor en una calibración.

- **Perfil del Flujo.**

Como un líquido pasa a través de una tubería, la distribución de velocidad a través de la tubería se altera para acercarse a un 'plenamente desarrollado' perfil que depende del diámetro de la tubería, la aspereza y la viscosidad del fluido. La presencia de cualquier cambio de un tubo recto alterará el perfil de manera drástica, curvas, válvulas de doble codo etc, todo ello contribuye a la introducción de remolino o asimetría de la distribución de velocidades. Como la forma en que interactúa con el sensor de líquido puede ser altamente dependiente del perfil de velocidad, estos efectos deben ser considerados en la calibración. La mayoría de las instalaciones de calibración permiten longitudes de tubería recta adecuada y el uso de enderezadores de flujo para aproximarse a las condiciones de flujo ideal si están afectados los tipos de calibración del medidor.

4 ESTADO DEL ARTE.

En el mundo se han creado algunas metodologías basadas su gran mayoría en las normas ISO establecidas a nivel internacional como patrones que deben regir cualquier tipo de mediciones.

A continuación se nombran algunos de los laboratorios más reconocidos a nivel nacional e internacional en la calibración de macromedidores.

4.1 MÉTODO USADO POR WL DELF HYDRAULICS (HOLANDA)¹²

Este Método se basa en la norma ISO 4185 “*Measurement of liquid flow in closed conduits*”. Especifica un método para la determinación del caudal a partir de la masa entregada en un tanque de pesaje en un intervalo de tiempo conocido.

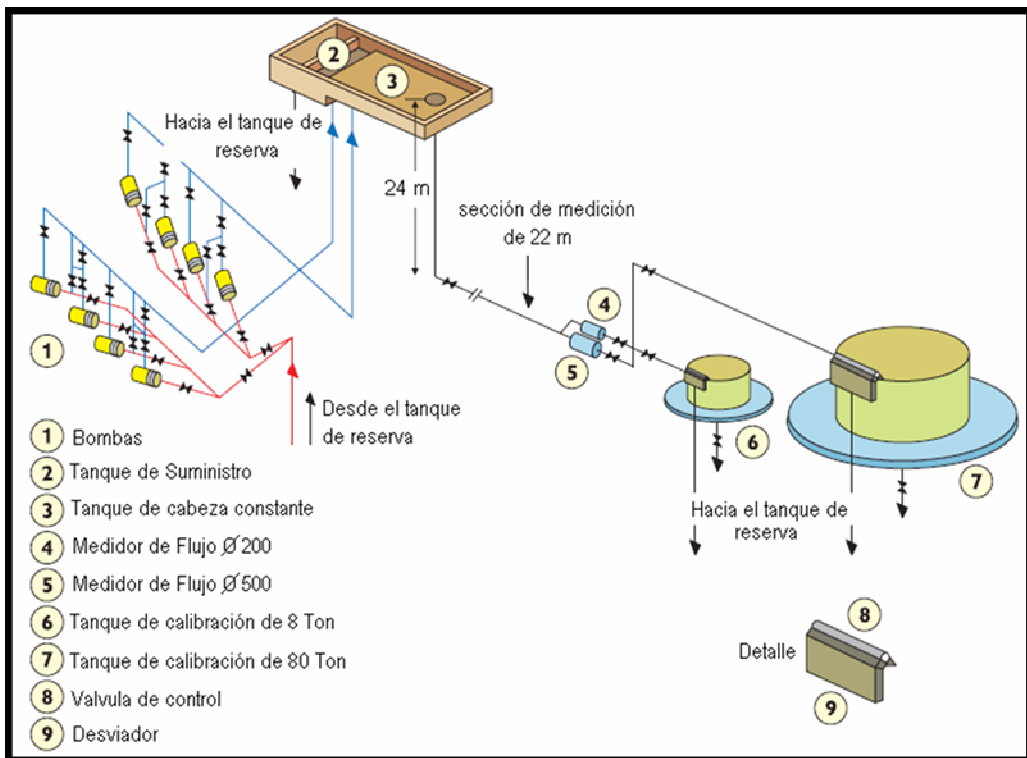
Trata en particular de los aparatos de medición, el procedimiento, el método para calcular el caudal y las incertidumbres asociadas con la medición. No cubre los casos de líquidos corrosivos o tóxicos.

Las pruebas se realizan en un dispositivo de calibración de medidores de flujo. Un diagrama esquemático de este equipo se muestra en la Figura 4.1.

¹²Delf Hydraulics laboratory. Calibración de Medidores (procedimiento de análisis y error), Holanda p.2-5. Disponible en internet <http://www.wldelft.nl/facil/flowcal/im/fcc.pdf>

El procedimiento inicia a partir del bombeo de agua que se encuentra inicialmente en un tanque y que se dirige hacia un tanque de cabeza constante. Desde allí, el agua fluye desde los tanques a fin de mantener un flujo constante de agua suficiente y de allí se bombea a la cabeza constante del tanque.

Figura4.1. Diagrama esquemático usado para la calibración.



Tomado de: Delf Hydraulics laboratory. Calibración de Medidores (procedimiento de análisis y error), p.1

A fin de mantener un flujo constante de agua suficiente se bombea al tanque de cabeza constante. El caudal se ajusta con una válvula de control especial situada en el extremo final de la sección de pruebas sobre la superficie que desvía el flujo ya sea en el tanque de peso o en el depósito de suministro.

El macromedidor está calibrado por el peso de la cantidad de agua que pasa por el medidor de flujo durante cierto tiempo de medición.

Por otra parte, hablando de los equipos de medición tenemos que la determinación de la tasa de flujo de masa requiere la medición del incremento de masa y el tiempo de llenado. La determinación de la tasa de flujo volumétrico requiere una medición de la densidad de líquidos. Si el medidor de flujo es una presión diferencial del caudal medido, las mediciones de Δp son necesarias, a fin de obtener el coeficiente de descarga.

En la figura 4.2 se muestra el tanque de pesaje que tiene el laboratorio Delf-Hydraulics recibiendo la cantidad de masa del agua que sería medida teniendo en cuenta el tiempo de llenado.

Figura 4.2. Tanque de pesaje recibiendo el agua que pasa a través del desviador de flujo.



Tomado de: Delf Hydraulics laboratory. Plataforma de calibración para macromedidores de caudal, (Holanda).

La adquisición de datos (lecturas), procesamiento de datos y métodos de cálculo se hacen por medio de un SCADA. Estos datos se leen en la computadora a través de una tarjeta datos mediante un programa de medidores de flujo con salida de señal y de medidores de flujo basada en la diferencia de presión (placas

de orificio, toberas y tubos Venturi). El procesamiento de datos se realiza en línea usando los siguientes métodos de cálculo:

La incertidumbre estándar de las mediciones se determinan teniendo en cuenta la EA4 / 02. (Expression of the Uncertainty of Measurement in Calibration)¹³.

La incertidumbre expandida de la tasa de flujo volumétrico se determina a partir de las incertidumbres en la medición de peso, medición de tiempo de llenado, sus correcciones y la densidad de medición. La relación de las incertidumbres en el peso, el tiempo de llenado y la densidad es de aproximadamente 3: 3: 2.

Por lo tanto, estas incertidumbres son igualmente importantes, resultando en una incertidumbre expandida mejor que el 0,05%.

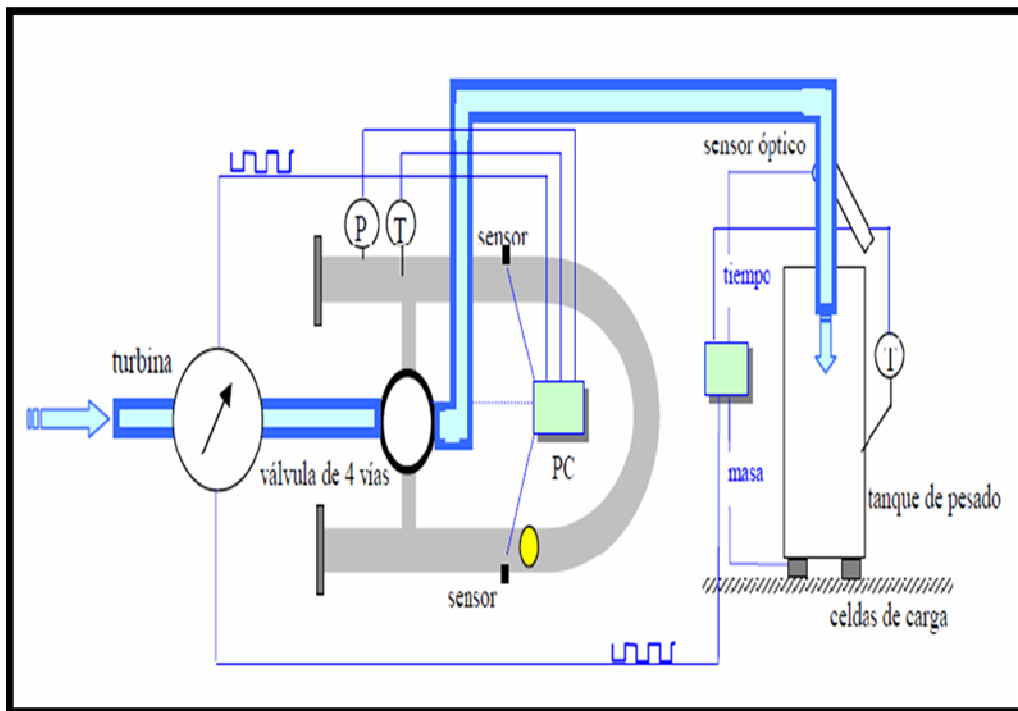
4.2 MÉTODO USADO POR CENAM (INSTITUTO DE METROLOGÍA EN MÉXICO)

“El centro nacional de metrología (CENAM) ubicado en la ciudad de Querétaro en México maneja una metodología basada en el peso estático de la masa colectada de líquido, la cantidad de líquido colectada por unidad de tiempo es determinada gravimétricamente para obtener el flujo másico. El flujo volumétrico que pasa a través de un área de sección transversal en un intervalo de tiempo definido (ver figura 4.3) se determina mediante la densidad del líquido. El patrón Nacional para flujo de líquidos mantiene trazabilidad hacia los patrones nacionales de las magnitudes de masa, tiempo y temperatura y hacia los patrones nacionales en las magnitudes derivadas de densidad, presión y humedad mantenidos por el Cenam.”¹⁴

¹³ EUROPEAN Co-operation for accreditation. Incertidumbre en las mediciones. EA4/02, Europa, 2010.

¹⁴ CENAM, Centro nacional de metrología. Comparación interna entre el sistema gravimétrico de pesaje estático y el sistema volumétrico de desplazamiento positivo tipo pistón. Querétaro México, octubre de 2004, p.25-27.

Figura4.3. Diagrama esquemático usado para la calibración



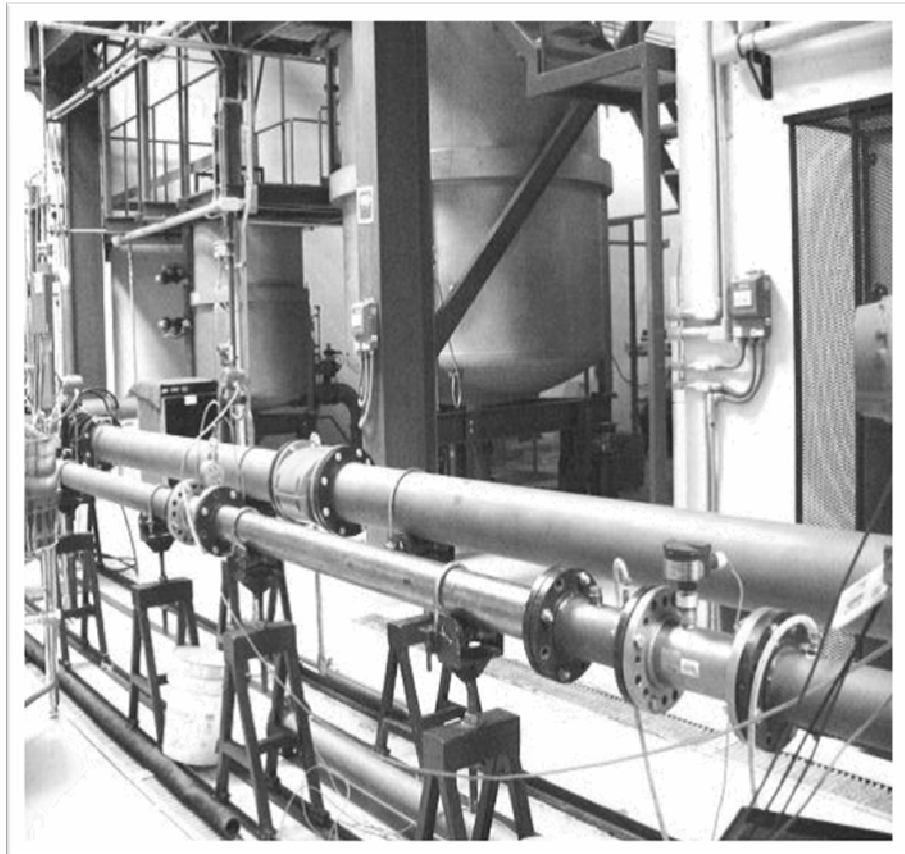
Tomado de comparación interna entre el sistema gravimétrico de pesaje estático y el sistema volumétrico de desplazamiento positivo tipo pistón. CENAM, Centro nacional de metrología.

A través de este método se pueden comparar los datos obtenidos por el dispositivo, para de esta manera tener una lectura estándar que para ellos se ha convertido en un patrón a nivel de ese país.

El CENAM cuenta con sus instalaciones en México en donde realizan las respectivas mediciones y comparaciones que les permiten alcanzar niveles de exactitud confiables, que los han convertido en el principal centro de metrología

del país teniendo como presentación las buenas instalaciones acreditadas y aprobadas por el gobierno federal.

Figura 4.4. Instalaciones del Centro Nacional de Metrología.



Tomado de: Comparacion de mediciones de flujo entre Cenam y PTB. Centro Nacional de Metrología,2006.

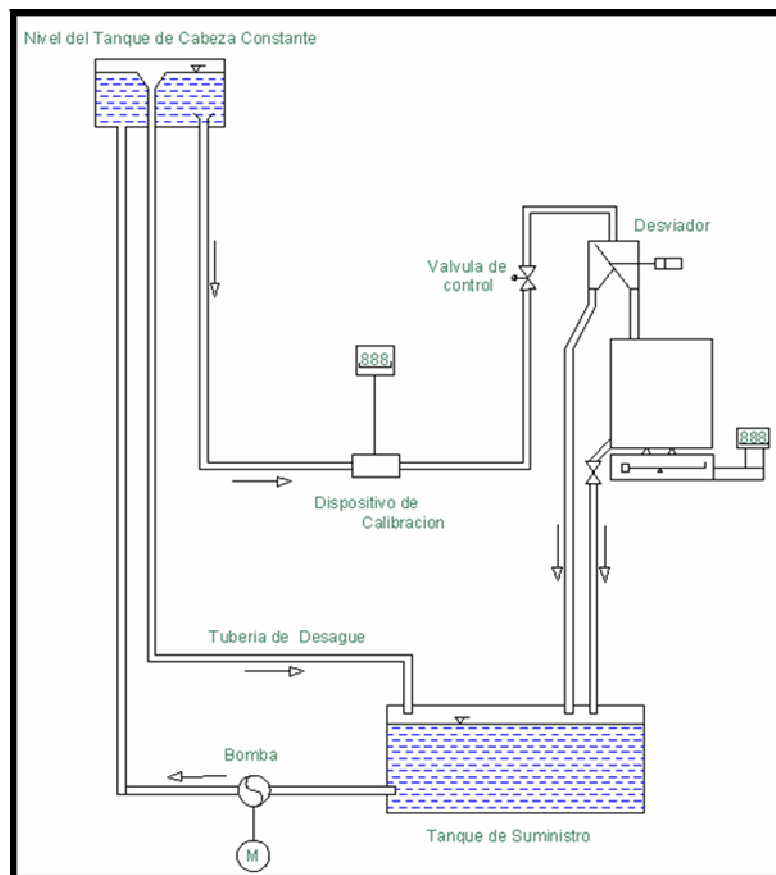
4.3 MÉTODO USADO POR PTB BRAUNSCHWEIG (ALEMANIA).¹⁵

El campo de ensayo hidrodinámico representa la norma nacional primaria para la realización de la medición volumétrica y del flujo másico, así como el volumen y la masa total del flujo de líquidos, con el agua como fluido de prueba. La instalación se ha diseñado para la calibración de medidores de flujo con diámetros nominales

¹⁵ PTB Braunschweig. El concepto de un nuevo patrón para la medición de flujo, Alemania, 1998, p.2-5.

de DN 20 a DN 400, y caudales desde 0,3 hasta 2100 m³ / h. La realización de las magnitudes sometidas a medición comprende una incertidumbre expandida de medida tan bajas como 0,02 %.

Figura4.5 Diagrama esquemático usado para la calibración



Tomado y Modificado de. El concepto de un nuevo patrón para la medición de flujo, PTB Alemania, 1998

Para garantizar que la incertidumbre de medida sea baja, se hicieron dos instalaciones de medición estándar en el campo de prueba - una de ellas (con un sistema de peso con desviadores) que trabajan en el principio gravimétrico y la otra (un medidor) en el principio volumétrico. Una directa (interna) comparación de las mediciones entre la medición de dos instalaciones permitirán la detección y

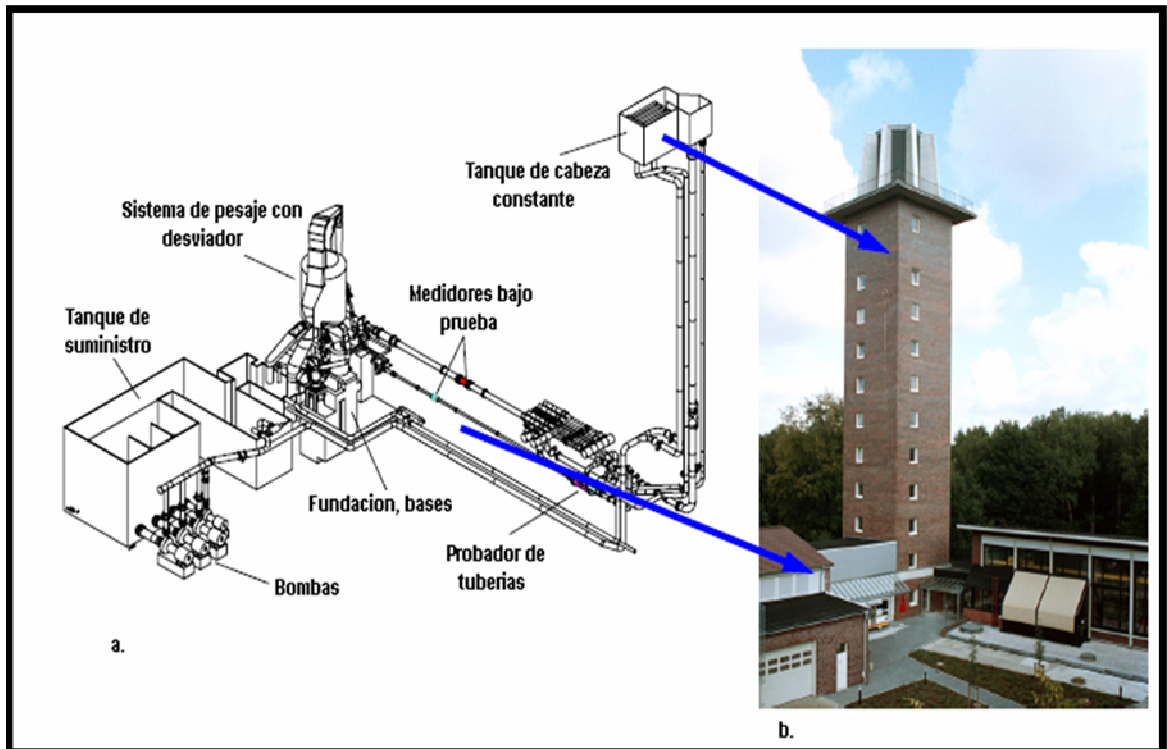
determinación de los valores concretos de los efectos que influyen en las cantidades que se ejercen sobre la incertidumbre de medición.

Una de las principales tareas que tiene el instituto es calibrar el flujo secundario descrito en algunas normas y también busca probar la exactitud de interoperación de las instalaciones de calibración en laboratorios de ensayo acreditados. Hoy en día para las instalaciones de los laboratorios de prueba se exigen incertidumbres de medición de 0.1%, o incluso el 0.05%. Por esa razón se creó el banco de pruebas (ver figura 4.6 y 4.7) alcanzando una incertidumbre de 0.02 %. Estas incertidumbres se refieren a la masa o volumen de líquido que pasa a través del medidor sometido a prueba o de la tasa de flujo promedio calculado durante un tiempo determinado.

Figura 4.6 a. Corte de vista de las instalaciones de calibración de medidores de PTB.

b. Torre Willie Wien. (Edificio donde se encuentra ubicado el tanque de cabeza constante ubicado en el noveno piso a 35 m de

altura)



Tomado de: modelado de la incertidumbre en la calibración de macromedidores de caudal y la aplicación de requisitos y su realización técnica para el flujo de agua, PTB, Alemania, 2007.

Figura 4.7. Instalaciones de medición de PTB. Tuberías de prueba, desviador de flujo, tanque de pesaje)



Tomado de: modelado de la incertidumbre en la calibración de macromedidores de caudal y la aplicación de requisitos y su realización técnica de flujo del agua, PTB, Alemania, 2007.

La baja incertidumbre en la medición es necesaria para:

- Para garantizar la uniformidad en el campo de la metrología y pruebas tanto en el ámbito nacional como en el mercado europeo (funciona como un estándar de flujo principal del país),
- para permitir que el trabajo de investigación se lleve a cabo simultáneamente con la aprobación de modelo, cuando la teoría de los instrumentos de medición de mayor precisión se aprueban,
- por ejemplo, para las investigaciones básicas de los factores de influencia debida, a las perturbaciones del flujo aguas arriba del medidor o al comportamiento dinámico de los medidores de flujo. Estos factores pueden conducir a errores y hay que tenerlos en cuenta.

5 DESCRIPCION NORMA ISO 4185

La Norma ISO 4185 introduce algunos términos, los cuales tienen un significado especial en el desarrollo de la norma. Estos términos son presentados en el ANEXO B.

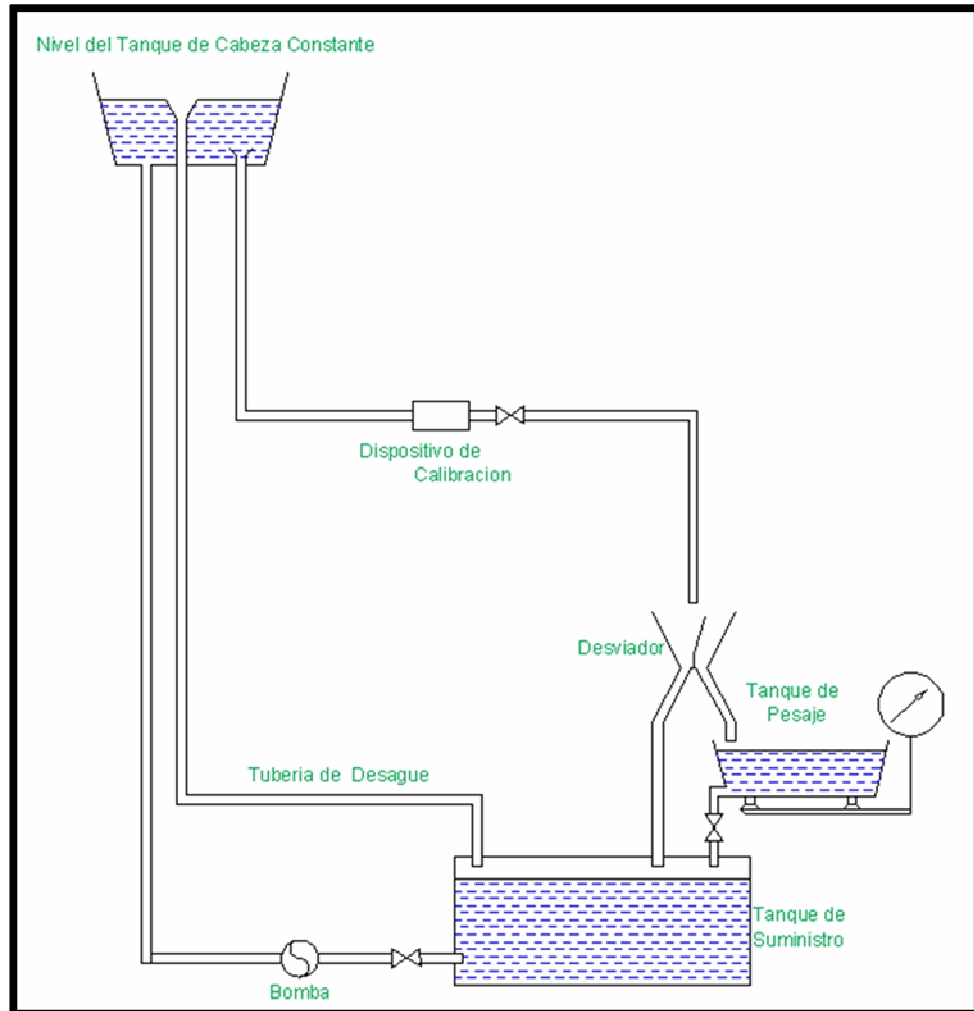
5.1 PRINCIPIO

El principio del método de medición de caudal por el peso estático (para esquemas de las instalaciones típicas, (ver las figuras 5.1, 5.2 y 5.3) es:

- determinar la masa inicial del tanque de pesaje, además de los líquidos residuales;
- desviar el flujo hacia el tanque de pesaje (hasta que se considera que contiene una cantidad suficiente para alcanzar la precisión deseada) por la operación del desviador, que acciona un temporizador para medir el tiempo de llenado;
- determinar la masa final del tanque más el líquido recogido en ella.

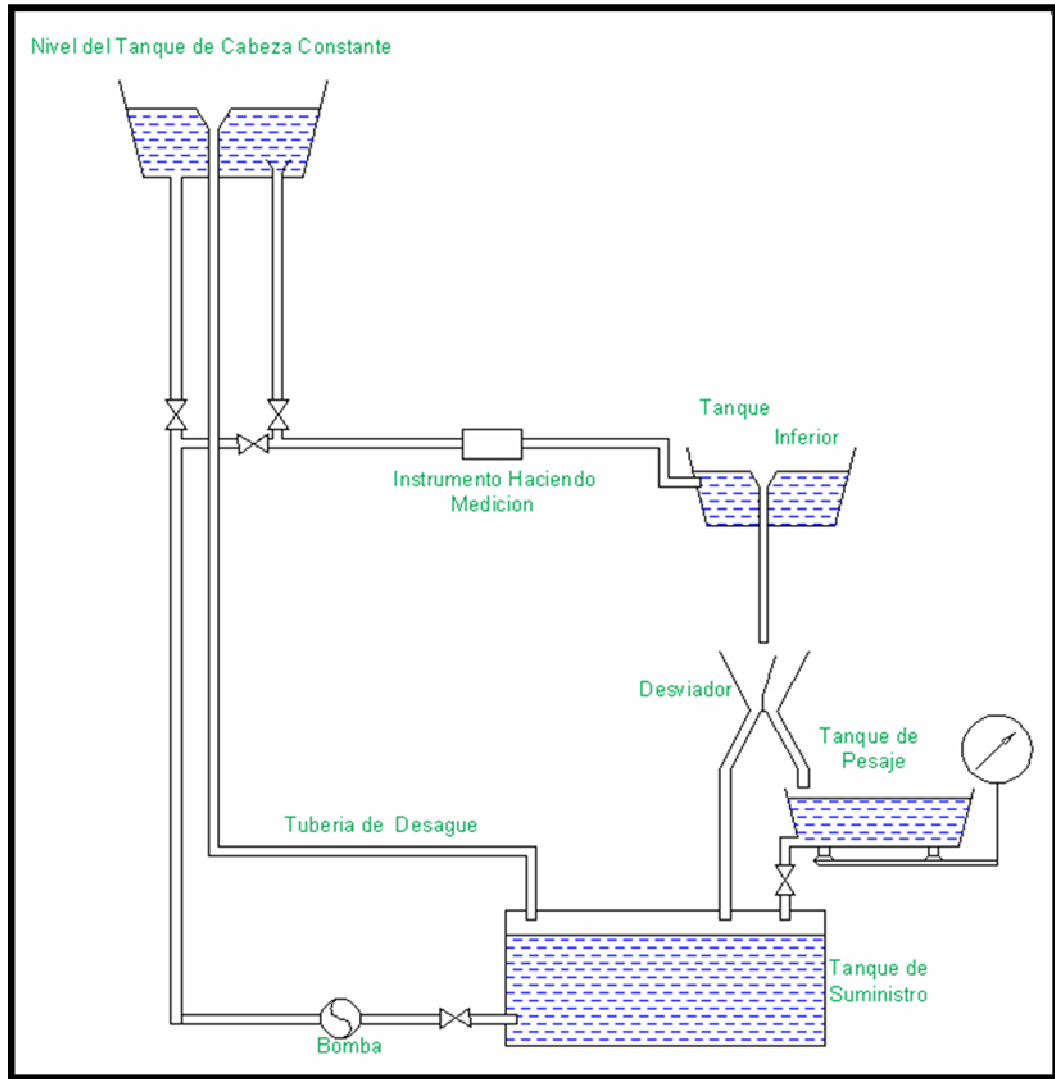
El caudal se deriva entonces de la masa recogida, el tiempo de recolección y otros datos como se indica en el anexo B.

Figura 5.1. Diagrama de una instalación para calibración por peso. (Método estático, suplido por el nivel de un tanque de cabeza constante).



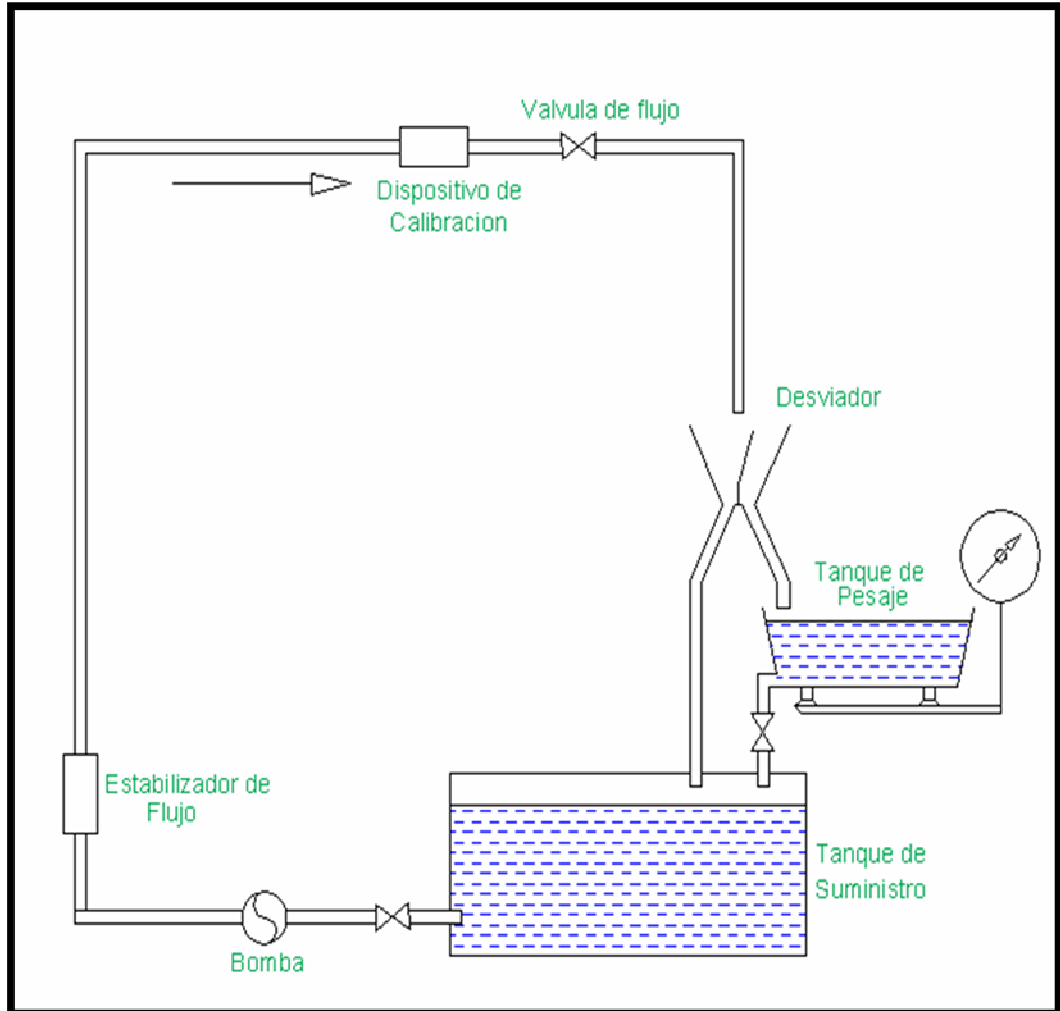
Tomado de Norma ISO 4185 Figura 1A, p.3.

Figura 5.2. Diagrama de una instalación para medición de caudal por peso. (Usado para una máquina de prueba hidráulica; método estático suplido por el nivel de un tanque de cabeza constante)



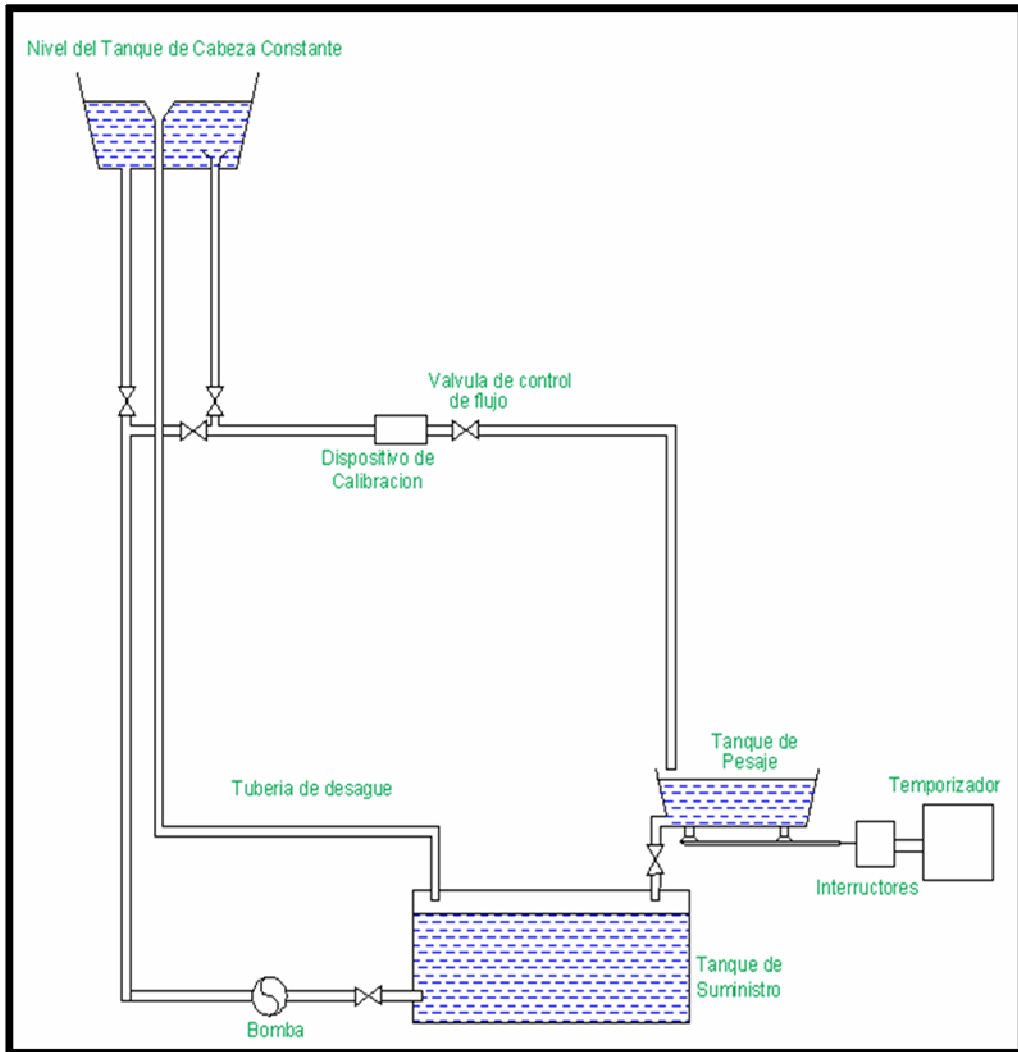
Tomado de Norma ISO 4185 Figura 1B. p.4.

Figura 5.3. Diagrama de instalación para calibración por peso (método estático, suministro directo de bombeo)



Tomado de Norma ISO 4185 Figura 1D. p.5.

Figura 5.4. Diagrama de una instalación para calibración por peso. (Método dinámico, suplido por el nivel de un tanque de cabeza constante).



Tomado de Norma ISO 4185 Figura 1D. p.6.

5.1.1 Pesaje Dinámico.

El principio del método de medición de caudal mediante un sistema dinámico de peso (ver figura 5.4 para un diagrama esquemático de una instalación típica) es:

- Permitir que el líquido sea recolectado en el tanque con una pre-determinada masa inicial, cuando el temporizador se pone en marcha;
- Detener el temporizador cuando se ha recolectado una pre-determinada masa final de líquido.

El caudal se deriva entonces de la masa recolectada, el tiempo tomado y otros datos como se indica en el anexo B.

5.1.2 Comparación del caudal instantáneo

Conviene, sin embargo, destacar que sólo el valor del caudal para el llenado está dado por el método de pesaje. Los instrumentos de medición en el circuito de flujo alcanzan valores instantáneos de caudal que pueden ser comparados con la tasa media del caudal solo si se mantiene estable el flujo durante el intervalo de medición o si los valores instantáneos son medidos correctamente durante la totalidad del periodo de llenado.

5.2 LA PRECISION DEL METODO.

5.2.1 La Incertidumbre global en el método de pesaje.

El método de pesaje da una medida absoluta del líquido, el cual en principio solo requiere la medición de la masa y el tiempo. Teniendo en cuenta que se toman las precauciones mencionadas en 5.2.2, este método puede ser considerado como el más exacto de todos los métodos de medición de caudal y por esta razón este es usado a menudo como método de calibración. Cuando la instalación se construye correctamente, se mantiene en óptimas condiciones y se utiliza continuamente, se puede alcanzar una incertidumbre de $\pm 0,1\%$ (Con un 95% de los límites de confianza para la parte aleatoria de la incertidumbre).

5.2.2 Requisitos para las mediciones precisas.

El método de pesaje da una medida precisa de caudal siempre que:

- No hay fugas en el circuito de flujo y no hay fugas que no se miden de fuga de líquido a través del desviador.
- No hay acumulación (o disminución) de líquido en una parte del circuito por la contracción térmica y no hay acumulación (o disminución) por el cambio de vapor o el volumen de gas contenido sin saberlo, en el circuito de flujo;
- se hacen correcciones necesarias para la influencia de la flotabilidad atmosférica ; esta corrección podrá realizarse al calibrar el aparato de pesaje;
- La balanza, el temporizador y los medios para poner en marcha y para detener, logran la precisión necesaria;
- el tiempo requerido por el desviador para atravesar es pequeño con respecto al tiempo de llenado. El temporizador se inicia y se detiene, mientras que el desviador está atravesando el circuito hidráulico;
- en el caso del método de pesaje dinámico los efectos de los fenómenos dinámicos son lo suficientemente pequeños.

5.3 APARATOS.

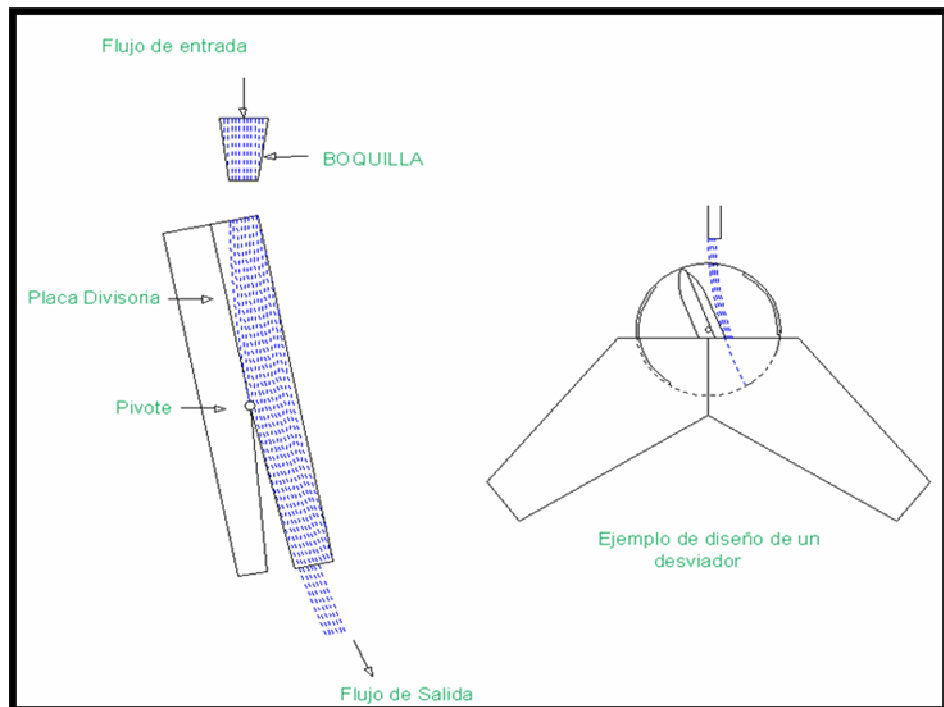
Desviador: El desviador es un dispositivo utilizado para dirigir el flujo directo alternativamente a lo largo de su curso normal, o hacia el tanque de pesaje. Puede ser formado por un conducto o canal en movimiento, o, mejor, por una base deflectora pivotante alrededor de un eje horizontal o vertical (ver figura 5.5)

El movimiento del desviador debe ser lo suficientemente rápido (menos de 0,1 s, por ejemplo) para reducir la posibilidad de un error significativo ocurrido en la medición del tiempo de llenado. Esta es realizada por los viajes rápidos del desviador a través de una hoja delgada de líquido. Generalmente, este líquido tiene una hoja de longitud 15 a 50 veces su ancho en el sentido de la marcha del desviador. La caída de presión en la ranura de la boquilla no debe exceder

alrededor de 20000 Pa para evitar salpicaduras, arrastre de aire¹⁶, y el flujo a través del desviador y la turbulencia en el tanque de pesaje. Este movimiento de la válvula del desviador puede ser generado por diversos aparatos eléctricos o aparatos mecánicos, por ejemplo, un resorte o una barra de torsión o por actuadores eléctricos o neumáticos.

El desviador no debería influir de ninguna manera en el flujo en el circuito durante ninguna fase del procedimiento de medición.

Figura 5.5. Ejemplo de diseño de un desviador.



Tomado de Norma ISO 4185 Figura 2. p.8.

Para grandes caudales los cuales podrían implicar esfuerzos excesivos, se puede utilizar un desviador con una tasa de rendimiento proporcionalmente lenta (1 a 2 s, por ejemplo) siempre que la ley de funcionamiento sea constante y la variación de

¹⁶ En algunos diseños de tobera, sin embargo, ventilaciones especiales permiten el ingreso de aire al surtidor y pueden ser necesarios para asegurar un flujo estable dentro del circuito de prueba. (Norma ISO 4185).

la distribución de caudal como una función del recorrido del desviador sea preferiblemente lineal y en todo caso sea conocido para que así pueda ser verificada.

Es necesario tener cuidado en el diseño de las piezas mecánicas del dispositivo y el desviador, así como en los controles frecuentes en el servicio, que no se produzca fuga o salpicaduras de líquidos, hacia el exterior o desde el canal de desvío de una a la otra.

Además de una corriente de líquido fina y plana, otras formas de corriente de líquido son permisibles en el conducto de desvío, si las correcciones necesarias para el desvío de tiempo se aplican como se indica en el anexo C.

Aparatos de medición de tiempo: El tiempo de descarga en el tanque de pesaje se mide normalmente por un contador electrónico con una referencia precisa de tiempo incorporado, por ejemplo, un cristal de cuarzo¹⁷. El periodo de desviación por lo tanto se puede leer de 0,01 s o mejor.

El error que surge de esta fuente puede considerarse insignificante, siempre que la discriminación de la pantalla del temporizador sea lo suficientemente alta y el equipo sea revisado periódicamente con un patrón de tiempo de nacional, por ejemplo, la frecuencia de las señales transmitidas por las estaciones de radio determinados.

El temporizador deberá ser activado por el movimiento propio del desviador a través de un interruptor montado en la transferencia (por ejemplo, medios ópticos o magnéticos). En rigor, la medición del tiempo se pondrá en marcha (o se

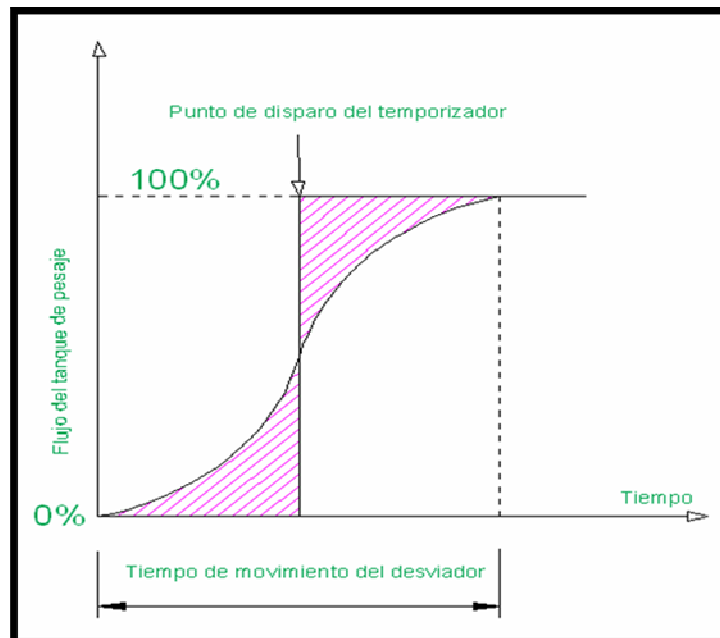
¹⁷Un cristal de cuarzo normalmente es utilizado como componente de control de la frecuencia de circuitos osciladores convirtiendo las vibraciones mecánicas o voltajes eléctricos a una frecuencia específica.

detendrá) en el instante en que las áreas expuestas en la figura 5.6, que representan la variación del flujo con el tiempo, son iguales. Sin embargo en la práctica, se acepta que este punto corresponda al punto medio del recorrido del desviador en el chorro de líquido.

El error será insignificante siempre que el tiempo de paso del chorro de líquido a través del desviador sea insignificante en comparación con el período de la desviación al tanque.

Si la ley de funcionamiento del desviador, en su caso, es idéntica en ambas direcciones (ver figura 5.7), el temporizador puede ser iniciado y detenido en el instante en que el movimiento de la válvula de derivación se inicia en cada dirección, este es el caso particular cuando la relación tiempo-caudal es lineal.

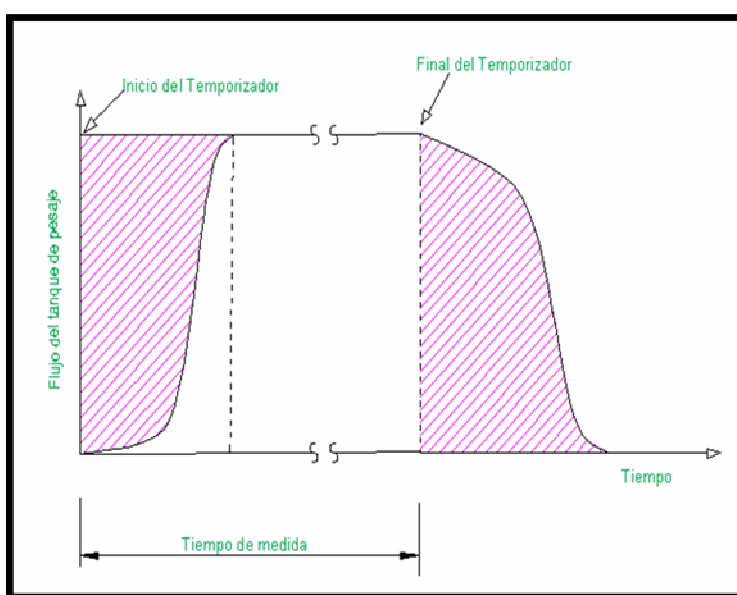
Figura 5.6. Ley de operación del desviador.



Tomado de Norma ISO 4185 Figura 3. p.8.

Sin embargo, si el error en la medición del tiempo de llenado se deriva del funcionamiento del desviador y del inicio y detenida del temporizador no es insignificante, una corrección se debe hacer de acuerdo con las direcciones del Anexo C.

Figura 5.7. Ley del tiempo de medición para la operación de un desviador el cual es idéntico en ambas dirección.



Tomado de norma ISO 4185 Figura 4. P.9.

Tanque de pesaje: El tanque en el que es descargado el flujo en cada etapa de medición deberá tener la capacidad suficiente para que el error en la sincronización sea insignificante. Teniendo en cuenta lo establecido en las especificaciones del desviador y de los dispositivos usados medición del tiempo, la tasa más alta del tiempo de llenado para el flujo esperado será de al menos 30 s. Sin embargo, este tiempo podrá reducirse siempre que sea posible determinarlo experimentalmente, de acuerdo con los procedimientos descritos en el anexo C, todo esto para que la precisión requerida se logre.

El tanque puede ser de cualquier forma, pero es fundamental que sea impermeable, y se debe tener cuidado para evitar derrames de líquidos. Las paredes interiores o deflectores pueden ser necesarios para reducir las oscilaciones del líquido en el tanque y para mejorar la rigidez estructural.

El tanque puede ser suspendido de la máquina de pesaje o puede constituir la plataforma de éste o se puede colocar en una de las plataformas. Para evitar sobrecargas repentinas perjudiciales para la instalación de pesaje, puede ser necesario bloquear el depósito en la posición en la escala durante el llenado.

El tanque puede ser drenado por diferentes medios:

- por una válvula gate en la base
- o por un sifón equipado con una desviación del sifón eficiente y comprobable.

La tasa de drenaje deberá ser lo suficientemente alta de modo que las ejecuciones de prueba puedan seguir entre sí a intervalos cortos.

En todos los casos se deberá ir comprobando cuidadosamente que no hay conexiones de las tuberías o conexiones de cable eléctrico que transmitan tensiones entre el tanque de pesaje y las partes fijas de la instalación, es indispensable que los enlaces sean por lo tanto extremadamente flexibles, y su flexibilidad verificada durante la calibración de la máquina de pesaje.

Máquina de pesaje: La máquina de pesaje puede ser de cualquier tipo, por ejemplo mecánica o con medidor de deformación de las celdas de carga, siempre que ofrezca la sensibilidad requerida, precisión y fiabilidad. Cuando el método de ponderación de la medición de caudal se aplica a los efectos de la metrología legal, es recomendable emplear la máquina de pesaje según OIML Recomendaciones Nos. 3 y 28.

Después de su instalación en el laboratorio, la balanza se calibrará en el rango de medición completa usando pesas patrón. Aquí es aconsejable seguir las recomendaciones OIML Nos. 1, 2, 20 y 33.

La balanza deberá tener un mantenimiento regular y su calibración se comprobará periódicamente. Si los pesos disponibles no son suficientes en número o en tamaño para cubrir el conjunto de medición, la calibración se realizará por etapas mediante la sustitución de los pesos por el líquido y mediante el uso de pesas patrón para verificar los intervalos de precisión.

Cabe señalar que, en vista de la diferencia de flotabilidad al calibrar la báscula con los pesos y la hora de sopesar una masa equivalente de líquido, es necesaria una corrección a las lecturas (ver el cálculo en 5.4.1).

5.3.1 Mediciones Auxiliares:

Para obtener la medición de la masa del volumen de caudal, es esencial conocer la densidad del líquido con la precisión requerida en el momento del pesaje. Si el líquido a medir es puro y limpio, es aceptable medir su temperatura y derivar su densidad desde una tabla de propiedades físicas (véase el anexo C.1.3 para el caso de agua).

La temperatura puede medirse con un termómetro simple de vidrio de mercurio o, mejor, con cualquier otro dispositivo, como una sonda de resistencia o termopares, preferiblemente se coloca en el circuito de flujo donde se requiere conocer el caudal de cambio. Para el caso del agua, teniendo en cuenta la escasa variación de la densidad con la temperatura sobre la temperatura ambiente, una precisión de 0,5 °C es suficiente para asegurar al menos 10^{-4} de error en la evaluación de la densidad.

Sin embargo, si la pureza del líquido está en duda, es esencial medir su densidad. Con este fin, una muestra puede ser recogida y su densidad se mide por un método directo, pesando en una probeta o en la balanza analítica, o por un método indirecto, por ejemplo, midiendo el empuje hidrostático que se ejerce sobre un flotador calibrado (balanza hidrostática). Sea cual sea el método utilizado, la temperatura del líquido se medirá en la medición de la densidad, en muchos casos se puede suponer que la variación relativa de densidad con respecto a la temperatura es la misma que la del líquido puro.

5.4 PROCEDIMIENTO

5.4.1 Método de Pesaje Estático:

Con el fin de eliminar el efecto del líquido residual que probablemente ha permanecido en el fondo en las paredes del tanque, se vierte en el depósito una cantidad suficiente de líquido en el tanque para alcanzar el umbral de funcionamiento de la máquina de pesaje. Esta masa inicial m_0 se guardara mientras el desviador dirige el flujo al almacenamiento y mientras el caudal está siendo estabilizado. Después de que el flujo continuo se ha logrado, el desviador es operado para dirigir el líquido hacia el tanque de pesaje, esta operación iniciará automáticamente el temporizador.

Después de la recolección de una cantidad adecuada de líquido, el desviador es operado en la dirección opuesta para regresar el líquido al almacenamiento, de forma automática se detiene el temporizador, lo que permite que el tiempo de llenado t sea determinado. Cuando las oscilaciones en el tanque han disminuido, la aparente m_1 masa final del tanque de peso es registrada. El tanque se debe ser drenado.

5.4.2 Método de Pesaje Dinámico.

Después de que el flujo continuo se ha logrado, la válvula de drenaje del tanque de pesaje se cierra, como la masa de líquido en el tanque aumenta, este supera la resistencia debido al contrapeso de la masa m_1 , en el extremo de la barra de equilibrio, que luego se levanta para iniciar el temporizador. Luego se añade una masa adicional Δm a la bandeja de la barra de equilibrio. Cuando la barra de equilibrio sube de nuevo, se detiene el cronómetro y el tiempo de llenado se registra. La masa Δm es usada como $m_1 - m_0$ en los siguientes cálculos del caudal. Existen otros posibles métodos de medición, por ejemplo, la lectura automática de la indicación balanza.

5.4.3 Disposiciones Comunes.

Se recomienda que por lo menos dos mediciones se lleven a cabo para cada una de las serie de mediciones de caudal, si el análisis posterior de las incertidumbres aleatorias se lleva a cabo. Las diversas cantidades que fueron medidas pueden ser anotadas manualmente por un operador o por un sistema automático de adquisición de datos (SKADA), que se registran en forma numérica en una impresora o proporcionan acceso directo a una computadora.

6 INCERTIDUMBRE DEL METODO (Norma ISO 4185)

6.1 CÁLCULO DE LA INCERTIDUMBRE GLOBAL DE LA MEDICIÓN DEL CAUDAL

El cálculo de la incertidumbre en la medición de caudal debe llevarse a cabo de acuerdo a la norma ISO 5168, pero por conveniencia se dan aquí los principales procedimientos que deben seguirse para la medición de caudal por el método de pesaje.

- **Presentación de Resultados**

La ecuación 6 del anexo D preferiblemente podría ser evaluada por separado para las incertidumbres debidas al azar y componentes de error sistemático. Designando las contribuciones a las incertidumbres de las mediciones de caudal desde esas dos fuentes por $(e_R)_{95}$, y e_s respectivamente cuando se expresa en términos absolutos, y por $(E_R)_{95}$ y E_s , cuando se expresa como un porcentaje, la medición de caudal se presentará en una de las siguientes formas:

Caudal = q

$$(e_R)_{95} = \pm \delta q_1; \quad e_s = \pm \delta q_2$$

La incertidumbre es calculada según la norma ISO 5168.

Caudal = q

$$(E_R)_{95} = \pm \delta q_3\%; \quad E_s = \pm \delta q_4\%$$

La incertidumbre es calculada según la norma ISO 5168.

Un método, aunque menos satisfactorio, consiste en combinar las incertidumbres derivadas al azar y errores sistemáticos por el método de la raíz cuadrada de la suma. Incluso, sin embargo, es necesario evaluar la ecuación 6 del anexo D para los componentes aleatorios ya que el valor de $(e_R)_{95}$ o $(E_R)_{95}$ se debe dar. En este caso, la medición de caudal se presentará en una de las siguientes formas:

$$\text{Caudal} = q \pm \delta q$$

$$(e_R)_{95} = \pm \delta q_1$$

La incertidumbre es calculada según la norma ISO 5168.

$$\text{Caudal} = 1 \pm 10^{-2} \delta q_2$$

$$(E_R)_{95} = \pm \delta q_3 \%$$

La incertidumbre es calculada según la norma ISO 5168.

6.1.1 Fuentes de Error

Sólo las principales fuentes de errores sistemáticos y aleatorios se analizan a continuación. Los valores numéricos de los errores mencionados son citados como ejemplo. Las fuentes de errores sistemáticos y aleatorios se consideran aquí por separado, pero hay que señalar que sólo una sola determinación de caudal se está considerando. También hay que señalar que el propósito de la medición es la determinación de la media del caudal durante el período de desviación. Así, el efecto de la inestabilidad en la condición de flujo considerado no es necesario y no es tan grave como para afectar el funcionamiento del sistema del desviador.

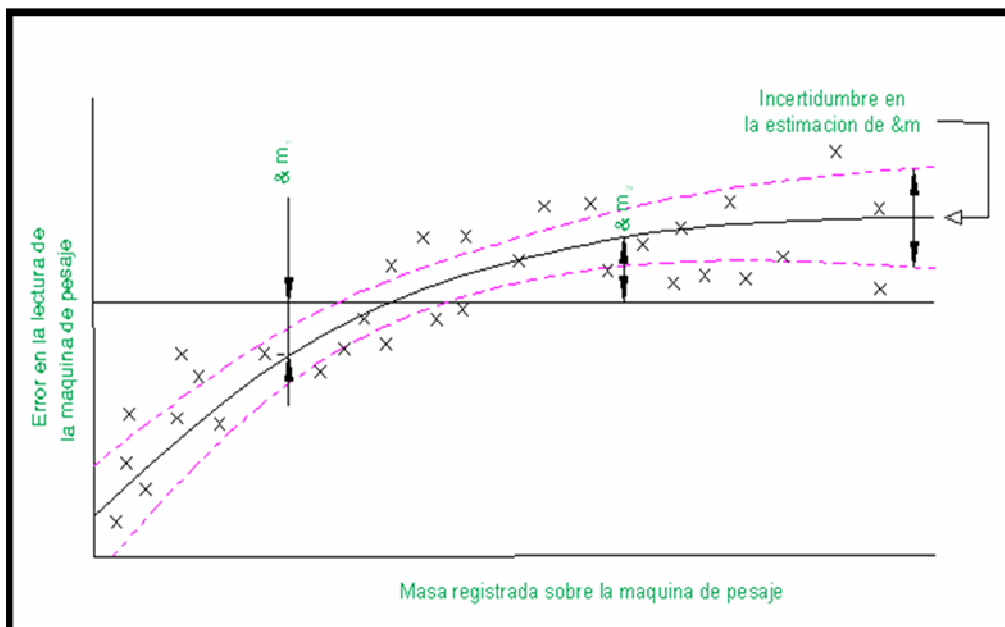
6.1.1.1 Errores Sistemáticos.

- Errores debidos a la máquina de pesaje (báscula)

Los errores sistemáticos que pueden estar asociados con el uso de una báscula pueden surgir, por ejemplo en el caso de una báscula romana desde Las posiciones de corte de la báscula romana.

Cada posición de corte en la báscula romana será en error por una cantidad que idealmente debería ser inferior a la discriminación de la máquina de pesaje. En muchos casos, sin embargo, este ideal no se logrará, y una calibración de la máquina de pesaje producirá un error de distribución como el representado en la figura 6.1.

Figura 6.1. Ejemplos de error de distribución en la calibración de la máquina de pesaje.



En el caso general, la curva de mejor ajuste a través de los distintos puntos se puede expresar como una polinomial:

$$\delta_m = a_0 + a_1 m + a_2 m^2 + \dots + a_n m^n$$

Ecuación 6.1

Se recomienda escoger los datos del más bajo orden polinomial.

El error sistemático en la determinación de la masa en el tanque de pesaje, $\delta(\Delta m)$, es el dado por:

$$\delta(\Delta m) = \delta m_2 - \delta m_1$$

Ecuación 6.2

A fin de evaluar el valor de este error sistemático, es necesario utilizar una curva de calibración del modelo que muestra en la figura 6.1, pero incluso después de corregir las diferencias en masa por la cantidad apropiada habrá una incertidumbre residual $(e_r)_b$, igual a la incertidumbre en la determinación de $\delta(\Delta m)$, presentada a la medición del caudal.

Esta será la incertidumbre de la determinación de la mejor curva a través de los puntos de calibración individuales.

El valor máximo permisible de $(E_r)_b$, será de $\pm 0,05\%$ de la masa registrada en el máquina de pesaje. Para un valor absoluto dado de la incertidumbre en la determinación de $\Delta(\delta m)$ será necesario fijar un límite inferior de la masa de agua recogida durante un desvío a fin de garantizar que la incertidumbre asociada a este error sistemático sea menor del $\pm 0,05\%$.

La corrección de flotabilidad, ϵ , se determina a partir del conocimiento de la e , e_a y e_p . Habrá un error sistemático que surgirá del valor utilizado, sobre todo si se toman valores estándar, pero la magnitud de las cantidades involucradas son de tal manera que este error se puede despreciar, ya que tiene un efecto de menos de 0,01 % en la medición de caudal.

- **Errores debidos a dispositivo de tiempo**

Cualquier error de la calibración del dispositivo para tomar el tiempo resultará en un error sistemático en el tiempo medido para una desviación, pero con un moderno equipo será insignificante (menos de 1 ms).

Es importante que la discriminación del dispositivo de tiempo sea adecuado. Los instrumentos digitales darán una lectura la cual da un error hasta del último dígito, el signo del error depende de si el dígito avanza al final o el comienzo del intervalo de tiempo correspondiente. Para hacer que este error sea insignificante, la discriminación de cualquier dispositivo de tiempo utilizado debe establecerse a menos de 0,01% del tiempo de desviación.

- **Errores debidos al sistema del desviador**

Siempre que se hace una corrección del error de sincronización como se describe en el anexo C o que la activación del sistema de cronometraje sea ajustada de manera que el error de tiempo sea cero, la incertidumbre introducida a la medición del caudal de esta fuente será igual a la incertidumbre en la medición del error de sincronización.

Esta incertidumbre $(e_s)_p$ puede ser calculada a partir de la ecuación 3 en el anexo C, cláusula C.1, utilizando el principio general esbozado en la ecuación 3 del

anexo D, o de la incertidumbre de la pendiente de la recta en el gráfico del anexo C (figura 1) cuando la alternativa del método 2 es utilizado.

El valor de $(E_r)_p$ debe ser inferior a 0,05%.

- **Errores debidos a la medición de la densidad**

Cuando el caudal volumétrico de cambio tenga que ser calculado, no habrá lugar a errores sistemáticos asociados con el valor utilizado en la densidad del líquido, que se derivarán de:

- la medición de la temperatura del líquido en la instalación;
- la utilización de equipos de medición de la densidad o las tablas de densidad.

Como se señaló en el punto 5.3.1, los errores en la medición de la densidad en el caso del agua a temperatura ambiente serán insignificantes, siempre que la temperatura se mida con una precisión de $\pm 0,5$ °C.

Esta precisión es de fácil acceso con los termómetros simples, pero es importante para garantizar que el líquido que fluye en el tanque de pesaje sea de temperatura constante, por lo que no hay posibilidad de que la temperatura del líquido cerca del termómetro no sea representativa de la temperatura del líquido en el tanque.

Cuando se utilizan tablas de densidades, ningún error significativo debe introducirse, pero si la densidad de un líquido se mide directamente, una evaluación de los métodos utilizados debe ser llevada a cabo con el fin de determinar la incertidumbre $(e_r)_d$, en el resultado. Este valor de $(e_r)_d$ es el valor que se utilizará en el cálculo de la incertidumbre de la medición de flujo volumétrico de cambio.

Cuando las tasas de flujo de volumen son medidas y la densidad del líquido se obtiene por medición directa, el método utilizado deberá ser tal que se garantice que el valor de $(E_r)_d$ sea inferior al 0,05%

6.1.1.2 Errores aleatorios

- **Errores debidos a báscula**

Desde un gráfico como el mostrado en la figura 6.1, debe ser calculada la desviación estándar de la distribución de los puntos sobre el mejor ajuste de la curva y el 95% de los límites de confianza de la distribución determinada usando la tabla L'Students (véase el anexo E).

Este valor de los límites de confianza debe ser multiplicado por $\sqrt{2}$ (dado que la determinación de la masa del líquido recogido en una desviación se obtiene de la diferencia entre dos pesos) y el resultado, $(E_R)_b$, es la incertidumbre debida a los errores aleatorios en la máquina de pesaje.

La incertidumbre debido a errores aleatorios en la balanza, $(E_R)_b$ será inferior a $\pm 0,1\%$, la masa líquida mínima que debe medirse se selecciona de acuerdo a este criterio.

- **Errores debidos al sistema desviador**

La repetibilidad con la que se mide la duración de un desvío depende de la repetición del movimiento del desviador que dispara el cronómetro y en la precisión con la que la posición de disparo se establece. Para cualquier instalación, esto puede determinarse experimentalmente mediante el establecimiento del caudal a un valor constante y posteriormente se realizarán una

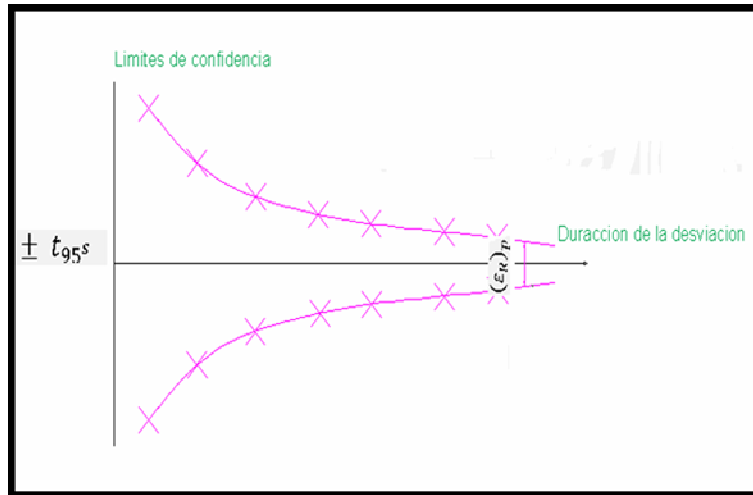
serie de, por ejemplo 10 desviaciones para un periodo de desviación fija para facilitar una serie de 10 estimaciones del caudal.

Esto se repite por varios períodos diferentes de desviación, desde la desviación estándar s de cada serie de mediciones, el 95% los límites de confianza, es decir $\pm t_{95,5} s$ (ver el anexo E) puede ser evaluados. Así, una gráfica de la forma mostrada en la figura 6.2 puede ser construida para un sistema de desviación bien diseñado. Debe tenerse en cuenta que el caudal debe mantenerse constante o, preferiblemente, normalizado, por ejemplo, mediante el uso de un caudal de referencia en el circuito durante cada serie de mediciones. Por encima de algunos periodos de desviación mínima, los límites de confianza del 95% serán relativamente constantes, y el valor así obtenido se debe utilizar como la incertidumbre, $(\varepsilon_R)_P$, en la medición del caudal gracias a los efectos aleatorios en el sistema de desvío. Cabe señalar que $(\varepsilon_R)_P$ incluye la dispersión resultante de las lecturas de la escala de la máquina de pesaje.

Es importante que $(\varepsilon_R)_P$ sea evaluado en varios índices de flujo sobre el rango del sistema ya que su valor puede ser de caudal dependiente.

La incertidumbre debido a los errores aleatorios de esta fuente, $(\varepsilon_R)_P$, deberá ser inferior a 0,1%. La consecución de estos límites requerirá el uso de un período mínimo de desviación, que tendrá que ser determinado por una instalación dada desde los valores absolutos conocidos de esas incertidumbres.

Figura 6.2. Grafica típica usada en la evaluación de $(\varepsilon_R)_p$ para un sistema de desviación.



6.1.2 Cálculo de la incertidumbre en la medición del caudal.

La incertidumbre asociada a una medición de caudal se obtiene mediante la combinación de las incertidumbres derivadas de las fuentes descritas en 6.1. Aunque los errores "sistematicos" tienen que distinguirse de los errores "aleatorios", la probabilidad de distribución de los posibles valores de cada componente sistemática es esencialmente de Gauss, y, de conformidad con la norma ISO 5168, la combinación de todas las incertidumbres, puede hacerse por el método de la raíz cuadrada de la suma.

Aunque todas las incertidumbres deben ser consideradas, sólo las establecidos en 6.1, necesitan ser incluidas en el análisis, si las mediciones se han realizado de conformidad con esta Norma Internacional desde otras fuentes de error para que contribuyan de forma significativa a la incertidumbre global

Por lo tanto, la incertidumbre relativa sistemática de volumen de caudal viene dada por :

$$E_s = \pm 100 \sqrt{\left[\frac{(e_s)_b}{m}\right]^2 + \left[\frac{(e_s)_z}{m}\right]^2 + \left[\frac{(e_s)_p}{t}\right]^2 + \left[\frac{(e_s)_t}{t}\right]^2 + \left[\frac{(e_s)_d}{\rho}\right]^2} \%$$

Ecuación 6.3

Las incertidumbres $(e_s)_z$ y $(e_s)_t$ pueden ser frecuentemente ignoradas. Y la incertidumbre relativa aleatorias en la confianza del 95% nivel viene dada por:

$$(E_R)_{95} = \pm 100 \sqrt{\left[\frac{(e_R)_b}{m}\right]^2 + \left[\frac{(e_R)_p}{t}\right]^2 + \left[\frac{(e_R)_d}{\rho}\right]^2} \%$$

Ecuación 6.4

La incertidumbre $(e_R)_d$ puede ser ignorada frecuentemente.

6.1.3 Ejemplo de Cálculo de la incertidumbre.

El ejemplo que aquí se describe es aquel en el que una báscula romana registra una masa de 20 000 kg de agua recogida durante un período medido de 40,00 s, y donde el caudal de agua es necesario. El valor de la densidad obtenida por la medición de la temperatura del agua en el tanque de pesaje con un termómetro de mercurio y el uso de botellas de muestra para medir la densidad del agua, fue un 1 000,34 Kg/m^3 .

El ejemplo tiene en cuenta las fuentes de error consideradas en 6.1 y utiliza los valores de incertidumbre para estas fuentes de error que son típicos en una instalación de alta precisión de medición de flujo. Hay que destacar, sin embargo, que en cualquier caso, el cálculo debe realizarse por separado, y otras fuentes de error pueden existir y los valores de incertidumbre correspondiente a cualquier fuente dada de error pueden variar.

- **Errores Sistemáticos.**

Se supone que los procedimientos descritos en el capítulo 6.1 ya se han realizado a fin de proporcionar los valores de incertidumbre sistemáticas los cuales son empleados a continuación.

La incertidumbre sistemática debida a la máquina de pesaje surgió, en este ejemplo, desde las posiciones de corte y corrección de la flotabilidad; estos componentes, que se denotan por $(e_s)_B$ y $(e_s)_s$ respectivamente, por lo general tienen valores de $\pm 0,05\%$ y $\pm 0,005\%$, correspondientes a los valores de $\pm 10 \text{ kg}$ y $\pm 1 \text{ kg}$ en este ejemplo particular.

La incertidumbre sistemática debido al sistema de sincronización $(e_s)_t$, es típicamente menos de 0.001 s, por lo que este valor se utilizará para los propósitos de este ejemplo. La incertidumbre sistemática debido al sistema del desviador $(e_s)_p$, es típicamente $\pm 0,025 \text{ s}$. La incertidumbre sistemática debido a la medición de la densidad $(e_s)_d$, es típicamente $\pm 0,01\%$, que corresponde a $\pm 0,1 \text{ kg/m}^3$, en este caso.

- **Errores Aleatorios.**

Los límites de confianza de una curva como la dada en la figura 6.1 son típicamente $\pm 0,05 \%$, por lo que la incertidumbre aleatoria, $(e_R)_B$, en la diferencia entre las dos pesadas es de $\pm 0,07\%$. Así la incertidumbre aleatoria debido a la máquina de pesaje corresponde a una incertidumbre de $\pm 14 \text{ Kg}$ en el presente ejemplo.

La incertidumbre aleatoria debido al sistema del desviador $(e_R)_p$, es típicamente $\pm 0,01 \text{ s}$.

La incertidumbre aleatoria en la evaluación de la densidad, $(e_R)_d$, es típicamente $\pm 0,01 \%$, que corresponde aquí a $\pm 0,1 \text{ kg/m}^3$.

- **Cálculo de la incertidumbre en la medida del caudal.**

El porcentaje de incertidumbre sistemática, E_s , en la medida del caudal viene dada por :

$$E_s = \pm 100 \sqrt{\left[\frac{(e_s)_b}{m}\right]^2 + \left[\frac{(e_s)_s}{m}\right]^2 + \left[\frac{(e_s)_p}{t}\right]^2 + \left[\frac{(e_s)_t}{t}\right]^2 + \left[\frac{(e_s)_d}{\varrho}\right]^2} \%$$

Ecuación 6.5

Por lo Tanto,

$$E_s = \pm 100 \sqrt{\left[\frac{10}{20000}\right]^2 + \left[\frac{1}{20000}\right]^2 + \left[\frac{0,001}{40}\right]^2 + \left[\frac{0,025}{40}\right]^2 + \left[\frac{0,1}{1000,34}\right]^2} \%$$

$$E_s = \pm 100 \sqrt{0,654 \cdot 10^{-3}}$$

$$E_s = \pm 0,08\%$$

El porcentaje de incertidumbre aleatoria, $(E_R)_{95}$ en la medición del caudal viene dada por :

$$(E_R)_{95} = \pm 100 \sqrt{\left[\frac{(e_R)_b}{m}\right]^2 + \left[\frac{(e_R)_p}{t}\right]^2 + \left[\frac{(e_R)_d}{\varrho}\right]^2} \%$$

Ecuación 6.6

Por lo Tanto

$$(E_R)_{95} = \pm 100 \sqrt{\left[\frac{14}{20000}\right]^2 + \left[\frac{0,01}{40}\right]^2 + \left[\frac{0,1}{1000,34}\right]^2} \%$$

$$(E_R)_{95} = \pm 100 \sqrt{0,562 * 10^{-6}}$$

$$(E_R)_{95} = \pm 0,075\%$$

Así, los resultados de medición de caudal pueden presentarse como:

$$Caudal = 1,00106 \frac{m_1 - m_0}{\rho t} = 0,5004 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$(E_R)_{95} = \pm 0,075\%$$

$$E_s = \pm 0,08\%$$

La incertidumbre es calculada según la norma ISO 5168.

Cabe señalar que algunas de estas incertidumbres han demostrado ser insignificantes, pero se incluyen aquí para ilustrar el método de cálculo.

7 DESCRIPCION DEL BANCO DE PRUEBAS

Las instalaciones del banco de prueba propuesto por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga SA, ESP se harán en el tanque ubicado en el Café Madrid en la ciudad de Bucaramanga (ver figura 7.1 Y figura 7.2).

Figura 7.1. Imagen satelital de la ubicación del tanque en el café Madrid (vista 1).

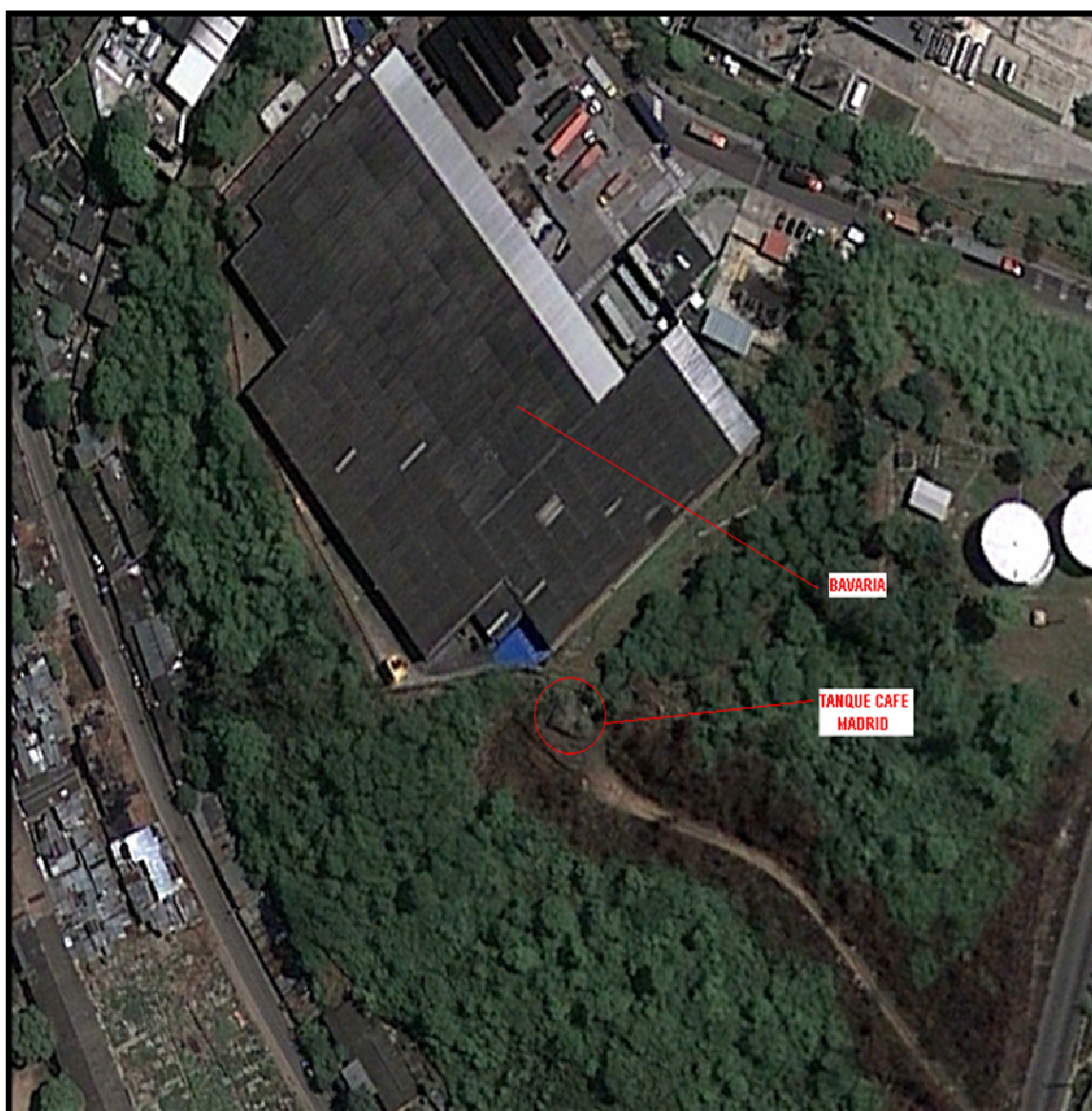
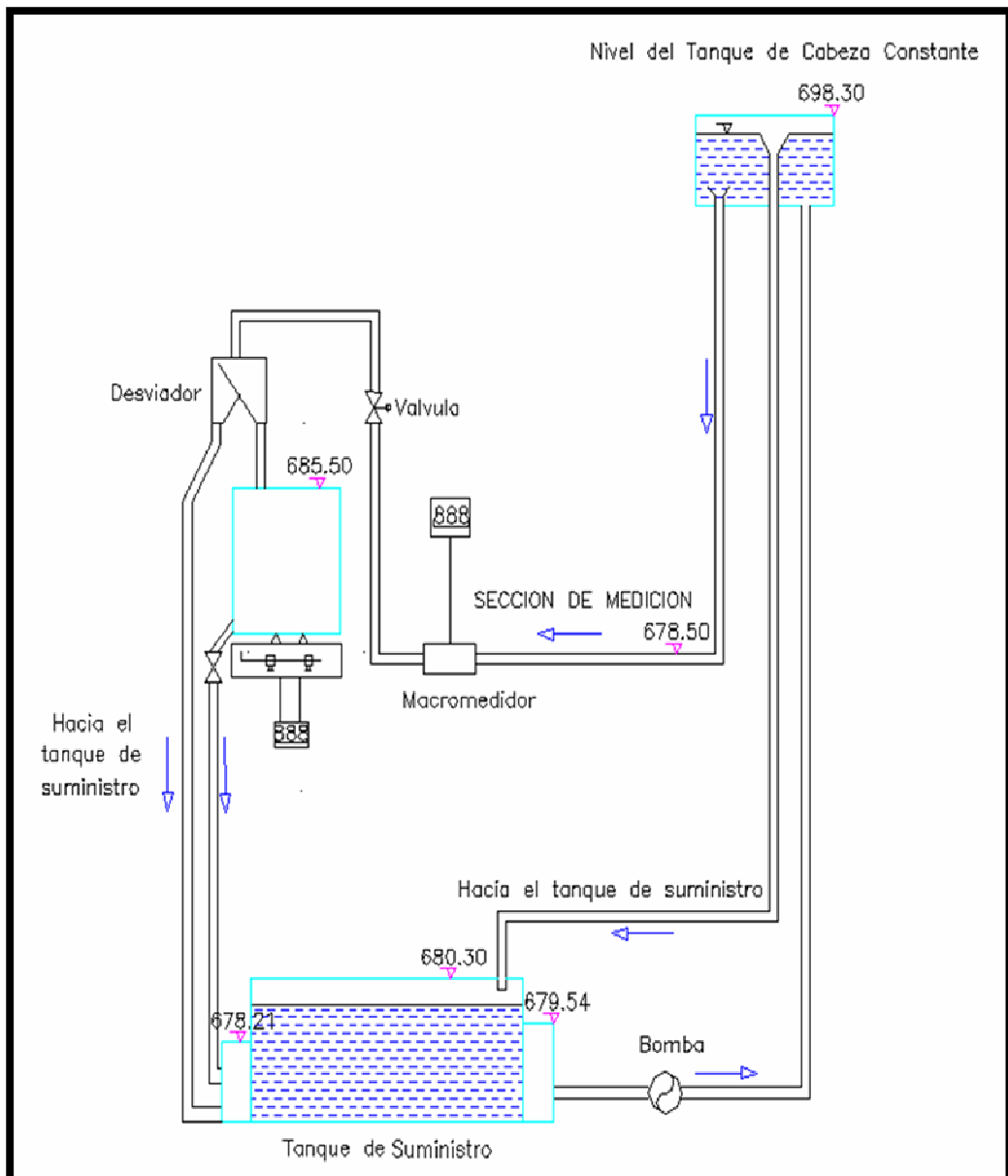


Figura 7.2. Imagen satelital de la ubicación del tanque en el café Madrid (vista 2).



7.1 MODELO.

Figura 7.3 Esquema de Banco de Pruebas para calibración de macromedidores.



7.2 DESCRIPCION DEL SISTEMA.

El principio que se maneja en el sistema de calibración es basado en la medición de caudal mediante un sistema estático de peso. Este método permite que el líquido sea recolectado en un tanque de pesaje el cual aportará la masa del agua.

El procedimiento inicia a partir de la bomba que transporta el agua que inicialmente se encuentra en el tanque de almacenamiento, cuya capacidad es de 172m^3 . El agua que se bombea llega al tanque de cabeza constante que está ubicado a una altura de 15 m, lo cual permite alcanzar un nivel de caudal y presión constante. Este tanque tiene definido un desbordamiento de agua a través de un vertedero que permite que el agua vuelva al tanque de almacenamiento.

El flujo principal pasa a la sección de medición en la cual se encuentra el macromedidor de caudal bajo prueba y una válvula de control de caudal. El sistema es operado hasta que se encuentre el equilibrio y todas las variables (temperatura, caudal, presión) estén dentro de los límites permitidos.

Para iniciar la medición, se activa el desviador lo cual permite que la dirección del agua cambie llegando de esta manera al tanque de pesaje y activando las lecturas respectivas (tiempo de llenado, masa del agua, temperatura, densidad). Después de un determinado periodo de tiempo el tanque llega a su límite de llenado, lo cual activa el desviador que cambia nuevamente la dirección lo cual activa el desviador que cambia nuevamente la dirección hacia el tanque de almacenamiento, deteniendo las lecturas requeridas.

El método resulta de calcular la diferencia de las lecturas del macromedidor comparadas con las obtenidas por el sistema de pesaje. Para evitar la cavitación la sección de medición se ubica más abajo que la altura del desviador de flujo.

7.3 MODELACION EN EPANET.

Figura 7.4 Esquema del sistema montado en EPANET.

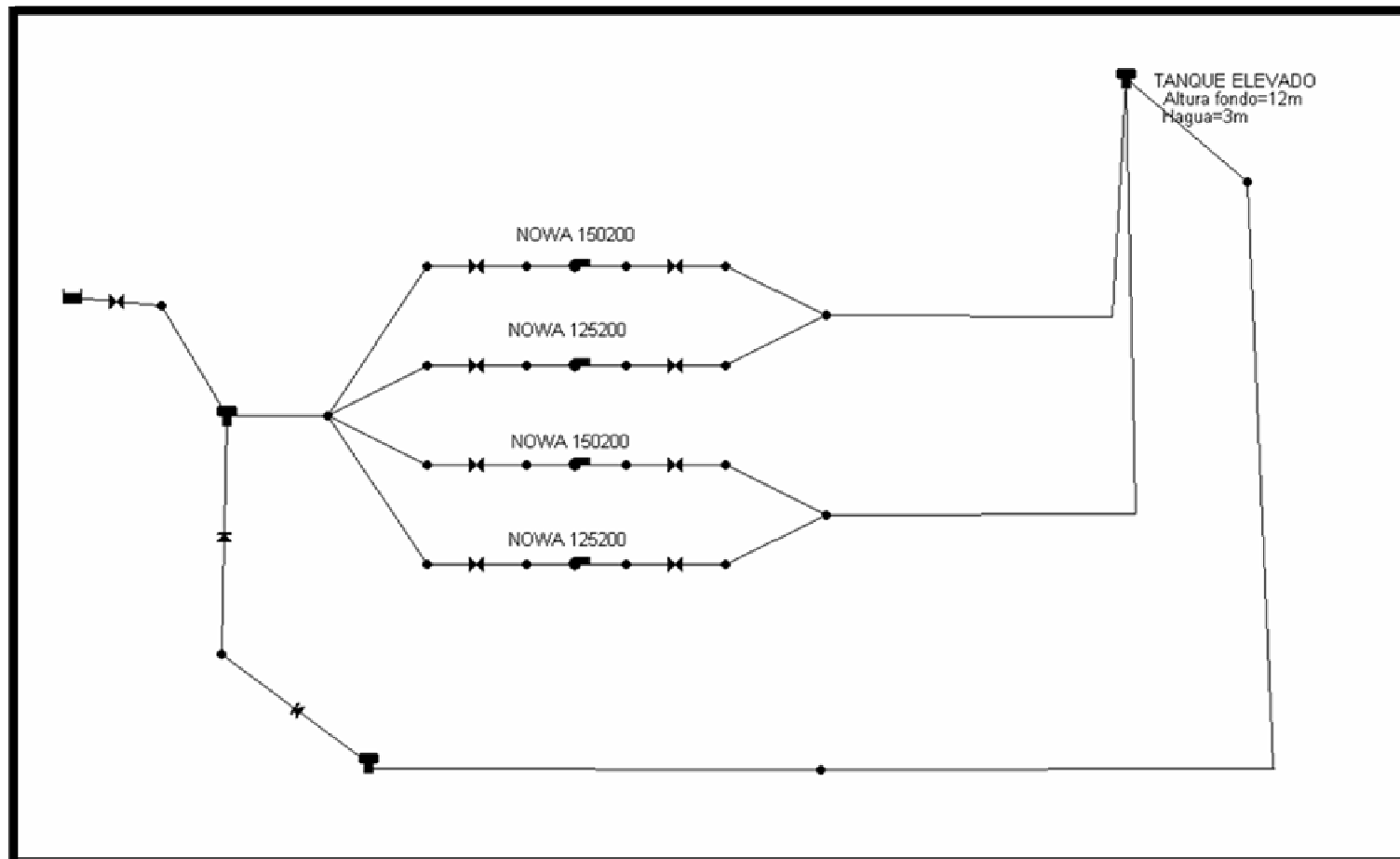


Figura 7.5 Resultados del modelamiento del sistema realizado en EPANET 2.0.

Diámetro Nominal (pulg)	Diámetro Interno (mm)	Long.Tubería (m)	Caudal (LPS)	Pérdidas
4	109,26	5,1	25	49,69
6	160,86	7,62	70	49,07
8	209,42	10,16	120	36,73
10	261,01	12,70	185	27,97
12	309,57	15,24	260	22,86
14	355	17,78	340	19,28
16	400	20	430	16,66

7.4 USOS DE EPANET.

Los resultados obtenidos a través de esta herramienta (software EPANET) ayudan a tener una idea clara del funcionamiento del sistema hidráulico. Mediante el software se pudieron obtener valores de caudal, velocidad, pérdidas, presión, diámetros de tuberías, factores de fricción, entre otros.

7.5 EQUIPOS A UTILIZAR.

7.5.1 . Tanque suministro o almacenamiento.

Este tanque es un sistema hidráulico localizado en el Barrio Café Madrid de la Ciudad de Bucaramanga (Tanque café Madrid). El tanque Café Madrid cuenta con una capacidad de 172 m³, una altura de 3 metros, área de 57.33 m², cuya entrada se realiza mediante una tubería en hierro dúctil de diámetro 6" y la salida con una tubería de hierro fundido de 6 ". Este tanque está disponible por parte del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga SA ESP, para efectos del banco de pruebas. (Ver figura 7.6)

7.5.2 Tanque de cabeza constante.

Un modelo del tanque que mantendrá el caudal y la presión constante para abastecer el sistema de medición se muestra en la figura 7.5. Este tanque será ubicado a 15 m de altura y su volumen será de 30 m³ . Este tanque cuenta con un sistema de vertedero. El agua que excede el nivel que se debe mantener para contar con el caudal constante llegara hasta el vertedero para posteriormente enviar esa cantidad de agua nuevamente al tanque de suministro.

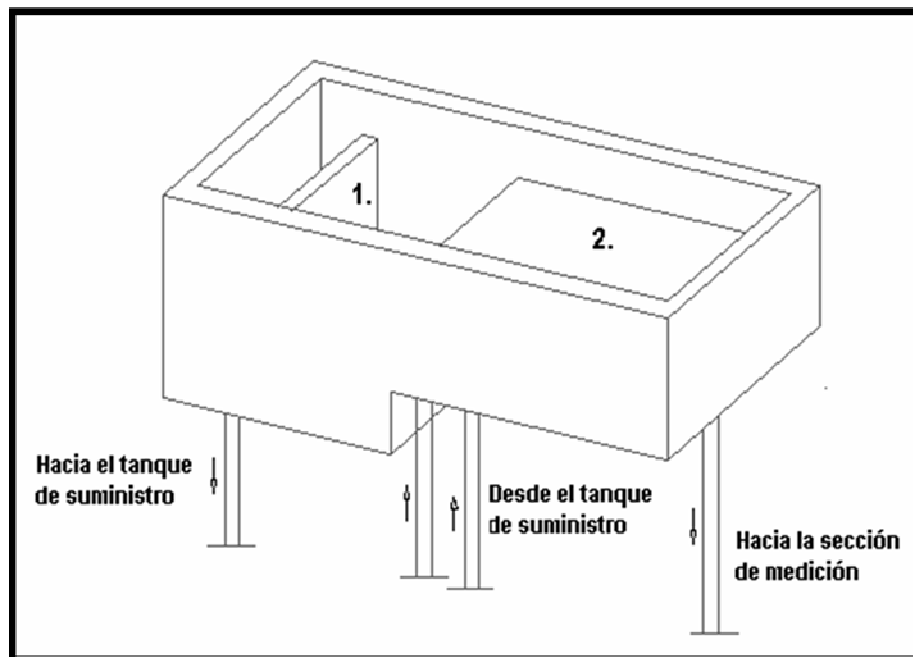
Este sistema será abastecido por 4 tuberías de pvc (biaxial) que envían el agua desde el tanque de suministro hasta este tanque como se muestra en la figura 7.7, para de esta manera lograr el nivel de agua que será enviado hacia la sección de medición.

Figura 7.6. Imágenes del Tanque ubicado en el Café Madrid propiedad del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga SA, ESP.





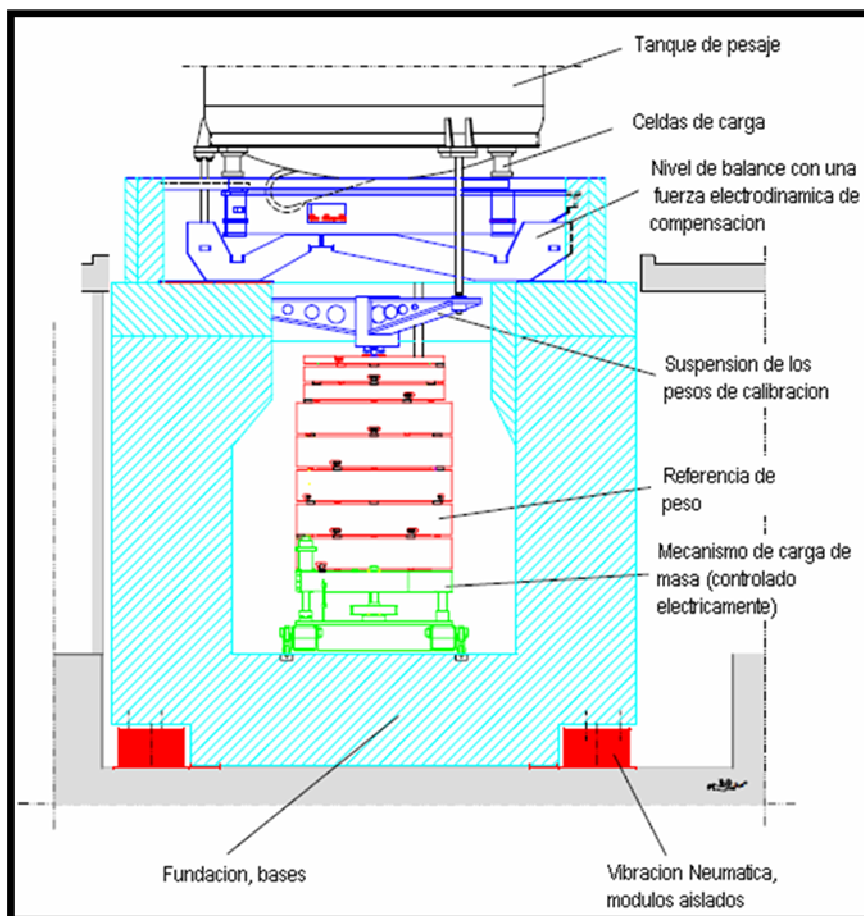
Figura 7.7. Diseño del tanque de cabeza constante con vertedero.



7.5.3. Tanque de pesaje.

Este sistema de pesaje, está compuesto por dos dispositivos diferentes de medición de masas (3 medidores de deformación precisos basados en celdas de carga, además de una plataforma de una máquina de pesaje con un sistema de fuerzas de compensación electrodinámica) y un sistema de calibración automática con un peso estándar para la medición de toda área de distribución (Figura 7.8). La lectura de alta resolución (hasta 106 pasos incrementales) será procesada por un ordenador para obtener los valores estables como resultado. Hay que tener cuidado de que el centro de gravedad sea demostrable en la misma posición cuando se pese el agua y cuando se utiliza el estándar de pesos y también que el proceso de carga sea similar en ambos casos.

Figura 7.8. Sistema de pesaje integrado, vista de corte.



Este sistema de pesaje permite determinar el factor real de corrección de equilibrio en cualquier momento y para detectar influencias de error adicionales (por ejemplo, las dinámicas) por comparación de las indicaciones de la masa de dos dispositivos de medición. La desviación estándar relativa (repetibilidad) se espera que sea inferior a 0,002%, la inestabilidad permitida entre dos calibraciones (normalmente durante un día) es 0,004% y la incertidumbre estándar (incluido los errores sistemáticos desconocidos) no será mayor al 0,005%.

Para este proceso se tendrá en cuenta una celda de carga de compresión y con alta precisión (PR 6201 (500kg... 50t)). Una característica de diseño en particular

es que la altura total y la forma de la celda de carga se mantienen sin cambios, a partir de 500 kg hasta 50 t. El PR 6201 de celdas de carga está especialmente diseñado para el pesaje de silos, tanques y recipientes de procesos.

7.5.4. Desviador de Flujo.

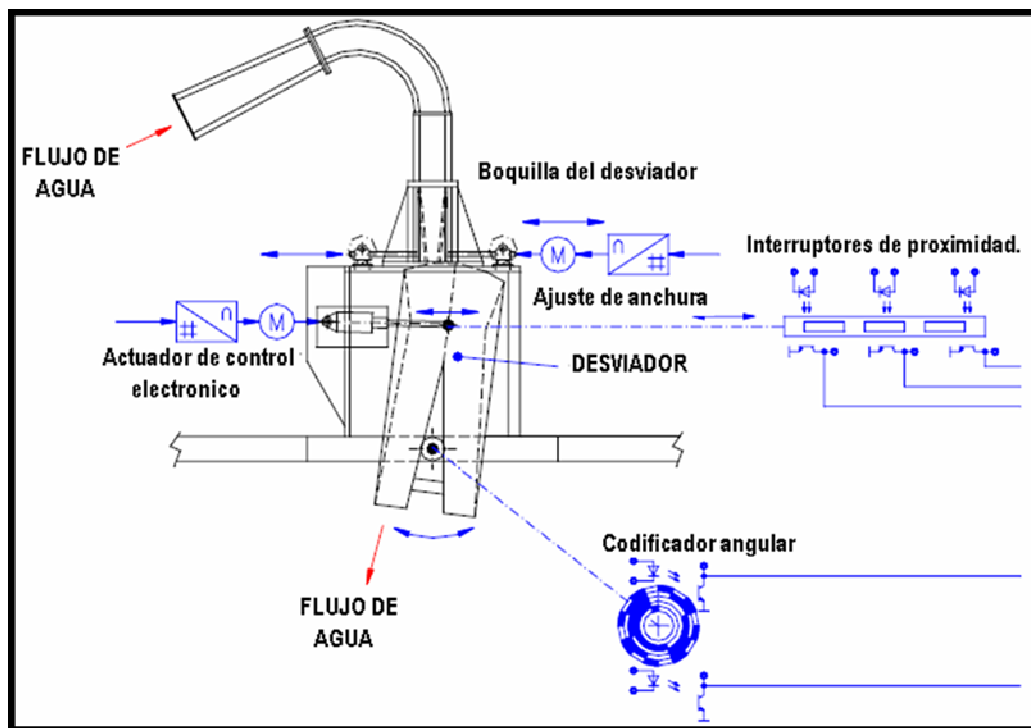
Además del sistema de pesaje, el desviador de flujo es una parte esencial del banco de pruebas. El desviador prototipo para este sistema tiene una boquilla rectangular con la sección transversal variable (Figura 7.9). Esto asegura un caudal más amplio rango de alrededor 1:100 y un chorro pleno y suave sin salpicaduras. El trabajo de tubería aguas arriba del desviador tiene un diseño especial para alcanzar un perfil casi simétrico de velocidad en la salida de la boquilla. La diferencia relativa de las tasas de flujo medio a la izquierda y la derecha desde la línea de simetría es menor a 2%.

Un actuador eléctrico de alta precisión garantiza una transición de velocidad constante durante el tiempo de transición y en ambas direcciones. El tiempo de transición a través del chorro es 8 .. 150 ms (desviador grande) resp. 3 .. 50 ms (otros desviadores) en función de la anchura elegida de la boquilla. La desviación estándar del tiempo de transición es de 0,2 ms. La señal de inicio y de parado será justificado en la línea de simetría, con una desviación máxima de ± 1 mm.

Bajo estas suposiciones, para la medición de tiempos no menores de 50s la contribución de la desviación del flujo de la incertidumbre típica total se espera que sea menor o igual a 0,004%.

En el anexo F se presentan algunas especificaciones del control para el desviador de flujo. El diseño del desviador es planteado para posteriormente trabajar en la fabricación del mismo.

Figura 7.9. Vista en corte del desviador de Flujo,.



7.5.5. Determinación de la densidad del agua.

La densidad del agua se determinará de dos maneras:

- Mediante la medición de la temperatura del agua en la sección de medición y el cálculo de la densidad mediante una fórmula adecuada para la densidad del agua destilada junto con un factor constante determinado experimentalmente. La incertidumbre de la temperatura medida del agua debe ser menor que $0,1^{\circ}\text{C}$ y la incertidumbre estándar esperada de la densidad calculada es $0,004\%$.
- Mediante la medición continua de la densidad en un determinado punto aguas arriba de la sección de medición. Comparándolos resultados de ambos métodos se puede comprobar, si son influencias de error adicionales (por ejemplo, las impurezas o de gas dentro del líquido).

7.5.6 Bombas.

Se usarán 4 Bombas REF: CRM-99999-2 NOWA 1750, que abastecerán el sistema. Estas bombas toman el agua desde el tanque de suministro y la transportan hasta el tanque de cabeza constante. Ver curva de eficiencia anexo G.

7.5.7. Válvulas.

Se usaran válvulas tipo mariposa para controlar el flujo en diversos puntos del sistema.

7.5.8. Especificaciones Especiales.

A fin de lograr una alta precisión en la calibración del macromedidor de caudal, es necesario estabilizar con gran precisión las variables de proceso del caudal, temperatura y la presión.

- La presión y la estabilización del flujo a través del tanque de cabeza constante ubicado a 15 m de altura.
- Nivel suplementario, velocidad de la bomba, y control del caudal.

Un primer control sería dirigido hacia la presión y el caudal, respectivamente. Estos se estabilizan, a través del tanque de cabeza constante como se había mencionado anteriormente.

Un segundo control significativo en el sistema son la medición de la temperatura y dispositivos de regulación. La energía térmica, inducida por las bombas, provoca un aumento en la temperatura del agua. Este efecto y su dinámica se generados por la velocidad actual de la bomba, el controla la temperatura del agua en todo el sistema de tuberías. A fin de mejorar el comportamiento dinámico, es decir, reducir el tiempo de respuesta en los cambios de caudal, la potencia real de la bomba se alimenta a la temperatura lazo de control como una señal de alimentación hacia adelante.

El sistema contará en su totalidad con tuberías en PVC (biaxial).

7.5.9 . Adquisición de datos y cálculos del método.

Todos los datos de la medición son obtenidos en campo a través de un operador previamente entrenado que tenga conocimiento completo del sistema y de los objetivos que se tiene con el mismo. Se plantea la posibilidad de que el control de todos los procesos de medición en el sistema se haga mediante un software, y en un caso más completo un SCADA.

La masa del caudal durante el tiempo de llenado se obtiene dividiendo la masa real m del líquido recogido por el tiempo de llenado t :

$$q_m = \frac{m}{t} = \frac{m_1 - m_0}{t}$$

Ecuación 7.1

Dónde:

q_m = Caudal medido.

t = tiempo de llenado.

m_1 = masa final del tanque de pesaje.

m_0 = masa inicial del tanque de pesaje

Si es necesario, t es corregido en concordancia con uno de los procedimientos que describen en el anexo C, para tener en cuenta el error de sincronización del desviador o el error de sincronización del pesaje dinámico. El término final de esta ecuación es una corrección para tener en cuenta la diferencia de flotabilidad ejercida por la atmósfera en una masa dada de líquido y de la masa equivalente en la forma de peso hecha, por ejemplo, de hierro fundido, cuando se usa para calibración de la máquina de pesaje.

En vista de las magnitudes relativas de las cantidades, esta ecuación se puede escribir como se muestra a continuación con una aproximación satisfactoria

$$q_m = \frac{m_1 - m_0}{t} (1 + \varepsilon)$$

Ecuación 7.2

Dónde:

$$\varepsilon = Q_a \left(\frac{1}{Q} - \frac{1}{Q_p} \right)$$

Ecuación 7.3

Teniendo en cuenta que el líquido es agua, es suficiente para calcular la corrección del factor ε desde los valores aproximados:

$$Q = 1000 \text{ Kg/m}^3$$

$$Q_a = 1,21 \text{ Kg/m}^3 \text{ (a } 20 \text{ °C y 1 bar)}$$

$$Q_p = 8000 \text{ Kg/m}^3 \text{ (Valor medio convencional según OIML}^{18} \text{ Recomendación N}^\circ 33)$$

Por lo tanto,

$$\varepsilon = 1,06 \times 10^{-3}$$

¹⁸ Organización Internacional de Metrología legal. Disponible en internet de www.oiml.org

Y

$$q_m = 1,00106 \frac{m_1 - m_0}{t}$$

Ecuación 7.4

• **Calculo del Volumen de Caudal.**

El volumen de caudal se calcula a partir de la masa del caudal calculado anteriormente y de la densidad del líquido en la temperatura de operación, como lectura de las tablas estándar - por ejemplo, tal como se muestra en el anexo C para el agua en el rango de temperaturas ambiente.

$$q_v = \frac{q_m}{\rho} = \frac{m_1 - m_0}{\rho t} (1 + \varepsilon)$$

Ecuación 7.5

Dónde:

ρ es la densidad del agua en Kg/m^3 . Ver tabla 4anexos C.1.3.

7.5.10 Incertidumbres presentes en el desarrollo del sistema.

Teniendo en cuenta los parámetros descritos en el capítulo 6 según la norma ISO 4185, se obtienen valores de incertidumbre los cuales se presentan en la tabla 7.1. Los procedimientos de cálculo de la incertidumbre para cada componente del sistema de calibración fueron hechos teniendo en cuenta el capítulo 6.

Los valores estimados son presentados en la tabla 7.1, alcanzado una incertidumbre global en la medición del caudal de un 0.005 %.

Este valor se ajusta al valor de la incertidumbre requerido para realizar el proceso de calibración de los macromedidores.

Tabla 7.1. Incertidumbres alcanzadas de los componentes del sistema de calibración.

FACTOR DE INFLUENCIA	INCERTIDUMBRE
Balance en las lecturas	0,005%
Balance de calibración	0,002%
Temperatura del agua y densidad	0,004%
Factor de flotabilidad	0,003%
Desviador de flujo	0,004%
Repetitividad	0,004%
otros (evaporación, gas contenido, compresión)	0,003%
Total de incertidumbre estándar	0,01%

7.5.11 Presupuesto.

PRESUPUESTO				
ITEM	COSTO UNITARIO	UNIDADES	CANTIDAD	COSTO TOTAL
Adecuación del tanque de almacenamiento ubicado en café Madrid	\$ 70,000,000.00	GLOBAL	1	\$ 70,000,000.00
Construcción del tanque de cabeza constante	\$ 300,000,000.00	GLOBAL	1	\$ 300,000,000.00
PR 6201 (500kg... 50t). Precision Compression Load Cell	\$ 25,000,000.00	UNIDAD	1	\$ 25,000,000.00
Desviador de Flujo	\$ 15,000,000.00	UNIDAD	1	\$ 15,000,000.00
Medidores de densidad y/o temperatura	\$ 4,000,000.00	UNIDAD	1	\$ 4,000,000.00
Estación de Bombeo (Bombas Nowa, Accesorios en Acero, Manómetros, Manifold, Motor para Bomba Nowa de 50HP)	\$ 150,000,000.00	GLOBAL	1	\$ 150,000,000.00
RS232 Adquisición de datos Software	\$ 25,000,000.00	UNIDAD	1	\$ 25,000,000.00
Válvulas de Mariposa	\$ 300,000.00	UNIDAD	15	\$ 4,500,000.00
Válvulas reguladora de caudal 12" y 14"	\$ 10,000,000.00	GLOBAL	1	\$ 10,000,000.00
Tubería de Acero para Bombeo	\$ 10,000,000.00	GLOBAL	1	\$ 10,000,000.00
Tubería Biaxial PVC	\$ 10,000,000.00	UNIDAD	1	\$ 10,000,000.00
Equipos de Radio, Actuadores, sensores de control y nivel (Antenas Receptoras)	\$ 150,000,000.00	GLOBAL	1	\$ 150,000,000.00
TOTAL				\$ 773,500,000.00

8 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- Se realizó una metodología con base en la Norma ISO 4185 "*Measurement of liquid flow in closed conduits*", la cual se adaptó a las necesidades del AMB S.A. ESP, intentando incorporar el tanque Café Madrid que actualmente no se encuentra en funcionamiento debido a pérdidas considerables en la conducción a dicho tanque.
- Con la metodología se pretende reducir a la incertidumbre de medición de los macromedidores al 0.1% del caudal circulante en el sistema. Para el análisis estadístico se propone una curva de distribución de probabilidad normal y un número de datos no inferior a 15 datos. Para la comprobación de la distribución de probabilidad se utiliza el estadígrafo "t" de Student's.
- La metodología descrita en este Proyecto permite la cuantificar de manera confiable los caudales macromedidos a la entrada de los distritos y sectores manejados por el AMB S.A. ESP, de manera que se puedan estimar de manera confiable los IANCs por sectores o distritos hidráulicos.
- Mediante el modelamiento en Epanet 2.0, se pudo cuantificar los diámetros de las tuberías y el caudal a circular en cada una de estas. Para lo anterior se estimaron unas pérdidas por unidad de longitud que no superaron el 5% por Km.
- Al estudiar los diversos sistemas para la calibración de dispositivos de medición a gran escala en países como Alemania, Holanda, México entre otros, se comprobó que estos sistemas basados en la norma ISO 4185

aportan al mejoramiento en el control de los sistemas de medición con los que cuentan.

- Se recomienda al Acueducto Metropolitano de Bucaramanga SA ESP que establezca un sistema de adquisición de datos SCADA que aportaría un mayor control y un mejor manejo del sistema, controlando variables como la temperatura, la presión, entre otras, que tienen efectos decisivos en el desarrollo del método de calibración.
- Se recomienda hacer las respectivas adecuaciones del tanque ubicado en el Café Madrid para lograr de este espacio un banco de pruebas con certificación de las principales entidades de metrología no solo a nivel nacional sino también a nivel internacional.
- La metodología mencionada en este proyecto se convierte en el punto de partida para la ejecución del banco de pruebas. Se recomienda que exista continuidad a través de otros proyectos basados en esta metodología para culminar con el objetivo de la creación del primer banco de pruebas para la calibración de macromedidores de pruebas del país.
- Una vez acreditado el banco de pruebas se podría convertir en el primer y único prestador de este servicio de calibración de macromedidores en Colombia lo cual traería prestigio a la empresa y por consiguiente beneficios económicos.
- Este aporte también busca crear una conciencia acerca de la importancia de la macromedición y la calibración de los dispositivos empleados para este proceso, en las empresas prestadoras de servicio de agua en el país.

9 BIBLIOGRAFIA

BENAVIDES, Oscar Andrés. Aspectos técnicos de Agua no Contabilizada en Colombia. Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería civil y ambiental, diciembre 2003.

CENAM, Centro nacional de metrología. Comparación interna entre el sistema gravimétrico de pesaje estático y el sistema volumétrico de desplazamiento positivo tipo pistón. Querétaro México, octubre de 2004, p.25-27.

DELFT Hydraulics laboratory. Calibración de Medidores (procedimiento de análisis y error), Holanda p.2-5.

ETAPA, Empresa municipal de telecomunicaciones, agua potable, alcantarillado y saneamiento. IANC, Índice de agua no contabilizada, 2007.

EUROPEAN Co-operation for accreditation. Incertidumbre en las mediciones. EA4/02, Europa, 2010.

GONZALES, Caicedo Alberto .Proyecto de desarrollo técnico de las instituciones de abastecimiento de agua potable y alcantarillado actividades. Importancia de la macromedición. Emcali, 1986.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. "Calibración de Macromedidores (una mejor guía práctica)". Norma ISO/TC 30/SC 9. Portugal, 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Medición de Líquidos en conductos cerrados. Método de Pesaje. Norma ISO 4185. Suiza 1980.

JAMES, O Rice. Instrumentación para medición y control, Tomo III Editorial McGraw-Hill.

R. Engel, U. Klages, Un nuevo enfoque para mejorar el rendimiento del desviador en la calibración de flujo de líquido, FLOMEKO 2000 Conferencia Salvador, Brasil, June 2000.

R. ENGEL, H.-J. BAADE: Nuevo diseño de doble equilibrio para sistema de referencia gravimétrica en las nuevas instalaciones hidrodinámicas de PTB, 11th Conferencia Internacional sobre medición de flujo, FLOMEKO 2003, (Poster, ref. 122), Groningen, Holanda, 2003

R. ENGEL: PTB's Investigaciones para verificar el presupuesto de incertidumbre en la medición. 12th Conferencia Internacional sobre medición de flujo FLOMEKO '2004, Guilin, China, 2004.

R. ENGEL, Método Dinámico Mejoras en el pesaje gravimétrico en la calibración de macromedidores. 5th Conferencia Internacional sobre medición de flujo, Alemania.

LOZA, Darío Alejandro. XV SEMINARIO Y II ENCUENTRO Nacional de Metrología y Normalización Para la Industria y la Educación. La Metrología de Flujo de Líquidos en México,

LOZA, Darío Alejandro. Comparación interna entre el sistema gravimétrico de pesaje estático y el sistema volumétrico de desplazamiento positivo tipo pistón. Simposio de Metrología, 2004.

UNIVERSIDAD La pampa (Argentina). Facultad de Ingeniería, material laboratorio mecánica de fluidos.

W. Poeschel, R. Engel, El concepto de un nuevo patrón para la medición de flujo, AlemaniaPTB Braunschweig. 9th Conferencia sobre medición de flujo'98, p. 7-12, Lund, Sweden, 1998

W. PÖSCHEL: Diseño único para el desviador de flujo en la calibración de medidores de caudal, 10th International Conferencia sobre medición de flujo. FLOMEKO 2000, Salvador, Brasil, 2000.

ANEXOS

ANEXO. A

DEFINICIONES UTILIZADAS EN LA NORMA ISO 4185

- **Pesaje estático:**

El método en el que la masa neta del líquido recogido se deduce del peso bruto del recipiente utilizado, respectivamente, antes y después de que el líquido se ha desviado por un intervalo de tiempo medido en el tanque de pesaje.

- **Pesaje dinámico:**

El método en el que la masa neta de líquido recogido se deduce de pesajes realizados mientras que el flujo de líquido se está entregando en el tanque de pesaje. (Un inversor no se requiere con este método.)

- **Desviador:**

Un dispositivo que desvía el flujo ya sea para el tanque de pesaje o hacia el tanque de suministro sin cambiar el caudal durante el intervalo de medición.

- **Estabilizador de flujo:**

Una estructura que forma parte del sistema de medición, asegurando un flujo estable de cambio en el conducto que se suministra con el líquido, por ejemplo, un nivel constante de la altura del tanque, el nivel de líquido el cual es controlado por un vertedero de una longitud suficiente.

- **Corrección de empuje:**

La corrección que debe hacerse a las lecturas de una báscula para tener en cuenta la diferencia entre el empuje hacia arriba ejercida por la atmósfera, sobre el líquido pesado y relativa a los pesos de referencia utilizado durante la calibración de la máquina de pesaje.

- **Notación**

Símbolo	Designación	Dimensión	Unidades SI
q_m	Flujo Másico	MT^{-1}	kg/s
q_v	Volumen Másico	L^3T^{-1}	m^3/s
m	Masa	M	kg
V	Volumen	L^3	m^3
t	Tiempo	L	s
ρ	Densidad de un Líquido	ML^{-3}	kg/m^3
ρ_a	Densidad del aire (a 20 °C y 1 Bar*)	ML^{-3}	kg/m^3
ρ_p	Densidad estándar de peso	ML^{-3}	kg/m^3
S_x	Estimación de desviación estándar		
σ_x	Desviación estándar de variable x		
e	Incertidumbre de medición		
e_s	Incertidumbre sistemática		
E_s	Porcentaje de incertidumbre sistemática		

e_R	Incertidumbre aleatoria		
E_R	Porcentaje de incertidumbre aleatoria		

ANEXO A. TABLA. 1 Notación utilizada en la norma ISO 4185.

- **Unidades**

Las unidades utilizadas en esta Norma Internacional son las unidades del SI, el metro, el kilogramo y el segundo, el grado Celsius se utiliza por conveniencia en lugar de los grados Kelvin.

- **Certificación**

Si las instalaciones para la medición de caudal por el método de ponderación se utilizan para los propósitos de la metrología legal, debe ser certificada y registrada por el servicio nacional de metrología.

Estas instalaciones se someten a inspección periódica en intervalos determinados. Si un servicio nacional de metrología no existe, un registro certificado de las normas básicas de medición (peso y tiempo), y análisis de errores de conformidad con la Norma Internacional ISO 5168, también tendrá la consideración de certificación para fines de la metrología legal.

ANEXO. B

CORRECCIONES EN LA MEDICIÓN DE TIEMPO DE LLENADO

La experiencia ha demostrado que en un sistema bien diseñado el error que se produce debido al cambio en las horas de encendido y apagado para un ciclo de arranque y parada del desviador puede corresponder a un valor de 0 a 25 ms. Este error depende del caudal, la velocidad de desplazamiento en cada dirección de la punta del desviador a través de flujo de líquidos, y la ubicación exacta del actuador temporizador con respecto al flujo de líquido que sale de la ranura de la boquilla. Este error no debe suponerse que sea significativo, sino que debe ser evaluado por pruebas experimentales, utilizando el procedimiento descrito en los siguientes apartados.

B.1 Método de Pesaje Estático

B.1.1 Método 1

Cuando el flujo continuo se establece en la válvula de control de flujo, una prueba estándar se ejecuta para determinar el caudal. A continuación, una serie de cortos flujos o ráfagas de flujo (hasta 25 ráfagas) son desviadas hacia el tanque de peso sin poner a cero el temporizador o las escalas, el flujo se determina a partir de la masa y el tiempo totalizados. Para completar la carrera, una segunda determinación de la norma se hace en el flujo constante, y el estándar de dos

determinaciones se promedia. Los resultados obtenidos se comparan con la determinación del caudal totalizado.

Si la masa totalizada para n ráfagas es aproximadamente igual a la del curso normal, se puede demostrar que el error de duración media Δ_t debido al control del cronógrafo para un ciclo es estrechamente igual a:

$$\Delta_t = \frac{t}{n-1} \left\{ \frac{q}{q'} \times \frac{\sum_1^n \Delta m_i / \sum_1^n t_i}{(m_1 - m_o)/t} - 1 \right\}$$

ANEXO B. Ecuación. 1

Dónde:

$(m_1 - m_o)/t$ es el caudal determinado por el procedimiento habitual;

$\sum_1^n \Delta m_i / \sum_1^n t_i$ es el caudal determinado de la masa totalizada y el tiempo totalizado

para las ráfagas n , q y q' son caudales durante el curso normal y durante las n ráfagas respectivamente, según lo medido por un medidor de auto-contenido en el circuito de flujo; el término de corrección q / q' tiene en cuenta las variaciones de caudal, en su caso, entre dos zonas de medición.

Después de que este procedimiento se ha repetido más de una amplia gama de caudales, será posible, sobre cualquier medida adicional corregir el tiempo de llenado medido por el valor de Δ_t determinado.

B.1.2 Método 2

El siguiente método alternativo de fijar el temporizador-desviador también puede ser empleado. El mecanismo normal de control de caudal del circuito hidráulico primero debería establecer un caudal cercano a la capacidad máxima de caudal del sistema, con un medidor de caudal de buena calidad en el circuito. El sistema se ejecuta en esta condición durante varias horas, durante el cual muchas mediciones sucesivas de caudal se realizan con diferentes tiempos de desviación. Se sugiere tiempos que son "normales" de 0,2, 0,1 y 0,05 s. El mayor número de pruebas requeriría el 0,05 de "normal" (o más), con el menor número de pruebas en el "tiempo normal de desviación". Durante cada una de estas veces el promedio de lectura en el medidor de caudal debe tomarse con la mayor precisión posible.

Los resultados obtenidos deben instalarse en la siguiente ecuación, en la que Δ_t es el error de tiempo requerido del sistema de desvío:

$$\Delta_t \left(\frac{1}{t_{qi}} - \frac{1}{t_{qn}} \right) = \frac{(q_i - q_n) - (\bar{q}_i - \bar{q}_n)}{q_n}$$

ANEXO B. Ecuación. 2

Donde,

t_{qi} es el tiempo de desviación para un ensayo particular "corto";

q_i es el caudal calculado para el tiempo de desviación particular t_{qi} ;

t_{qn} es el tiempo de desvío de tiempo "normal" t_{qi} se producen más cercana en el tiempo diurno en la secuencia de pruebas;

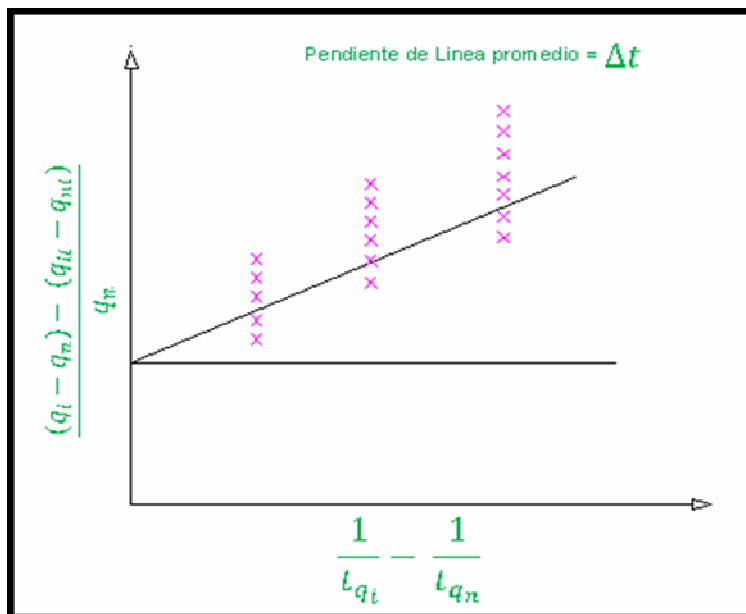
\bar{q}_i es el promedio de lectura de caudal de metros durante el tiempo t_{qi} ;

\bar{q}_n es el promedio de lectura de caudal de metros durante el tiempo t_{qn} ;

Los valores obtenidos para el lado derecho de esta ecuación debe registrarse en $\frac{1}{t_{qi}} - \frac{1}{t_{qn}}$ como se muestra en la Figura 1 del anexo G.

Los puntos deben definir una línea recta que pasa por el origen, y la pendiente de lo que es igual a Δt . Si un valor significativo de Δt se obtiene, el actuador temporizador desviador debe ajustarse para reducir al mínimo el valor del error, demostrado por pruebas repetidas. El procedimiento debe repetirse a unos cuantos más bajos índices de flujo para examinar si el valor de Δt obtenido es significativamente caudal-dependiente. Si hay cambios significativos en el valor Δt obtenidos, será necesario mejorar el funcionamiento del sistema de desvío o introducir una corrección de tiempo variable Δt para aplicar al tiempo de desviación.

ANEXO B. FIGURA. 1 Trazado de los resultados del actuador del tiempo en el desviador dado en B.1.2



B.1.3 Densidad Pura del Agua.

Temperatura °C	Densidad Kg/m^3
0	999,84
2	999,94
4	999,97
6	999,94
8	999,85
10	999,7
12	999,5
14	999,24
16	998,24
18	998,6
20	998,2
22	997,7
24	997,3
26	996,78
28	996,23
30	995,65
32	995,03
34	994,37

ANEXO B. TABLA. 4 Densidad del agua a diferentes temperaturas.

ANEXO. C

DEFINICIÓN DE TÉRMINOS Y PROCEDIMIENTOS UTILIZADOS EN EL ANÁLISIS DE ERROR

C.1 Descripción del error.

El error en la estimación de una cantidad es la diferencia entre la estimación y el valor real de la cantidad. Ninguna medida de una magnitud física está libre de incertidumbres que se produzcan a partir de los errores sistemáticos o dispersión aleatoria de los resultados de la medición. Los errores sistemáticos no se pueden reducir mediante la repetición de las mediciones, ya que surgen de las características de los aparatos de medición, la instalación, y las características del flujo. Sin embargo, una reducción en el error aleatorio puede ser logrado por la repetición de las mediciones, ya que el error aleatorio de la media independiente es $\frac{1}{\sqrt{n}}$ veces más pequeño que el error aleatorio de una medición individual.

C.2 Definición de la Incertidumbre.

El intervalo en el que el verdadero valor de una cantidad medida se puede esperar que se encuentre con una probabilidad suficientemente alta es denominado la incertidumbre de la medición. A los efectos de la presente Norma internacional, la probabilidad de que se utilice deberá ser al nivel del 95%.

C.3 Definición del La Desviación Estandar.

Si una variable X se mide varias veces, cada medición siendo independiente de las otras, entonces la desviación estándar s_x de la distribución de n mediciones x_i es :

$$s_x = \frac{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2]^{1/2}}{n - 1}$$

ANEXO C. Ecuación. 3

Donde:

\bar{x} es la media aritmetica de las n mediciones de la variable x

x_i es el valor obtenido por las i_{th} mediciones de la variable x

n es el numero de mediciones de x

Para mayor brevedad s_x se la llama a la desviación estandar de x

C.4 Evaluación de la incertidumbre

C.4.1 Errores Aleatorios

Si la de verdadera desviación estándar, σ_x es conocida, el rango $\pm 1,96 \sigma_x$ es de esperar que contenga el 95% de la población, es decir, habría una probabilidad de 0,05 del intervalo $X \pm 1,96 \sigma_x$ sin incluir el verdadero valor de X , y $\pm 1,96 \sigma_x$ es la incertidumbre de la medición. En la práctica, por supuesto, es posible obtener sólo una estimación de la desviación estándar, ya que un número infinito de las mediciones se necesitarían para poder determinar con precisión, y los límites de confianza deben estar basados en esta estimación. La "*t distribución*" para muestras pequeñas debería ser utilizada para determinar la incertidumbre en el nivel de confianza del 95%, como se describe en el anexo C.

C.4.2 Errores Sistemáticos.

El procedimiento que debe seguirse para llegar a la incertidumbre asociada a un error sistemático depende de la información disponibles en el error en sí mismo.

Si el error tiene un valor único conocido entonces este debe añadirse (o se resta de) los resultados de la medición, y la incertidumbre en la medición debido a esta fuente se toma como cero.

Cuando el signo del error se conoce, pero tiene su magnitud que se estima subjetivamente, el error medio estimado debería añadirse al resultado de la medición (prestando la debida observancia al signo) y la incertidumbre se toma como la mitad del rango dentro del cual se estima el error en el que se encuentra. Esto se ilustra en la Figura 2 del anexo C, donde se denota el valor medido por M y el error sistemático se estima que se encuentre entre el δt_1 y δt_2 [dando un error medio estimado de $(\delta t_1 + \delta t_2)^{1/2}$]. El resultado, R , que debe utilizarse es dado por:

$$R = M + \frac{\delta t_1 + \delta t_2}{2}$$

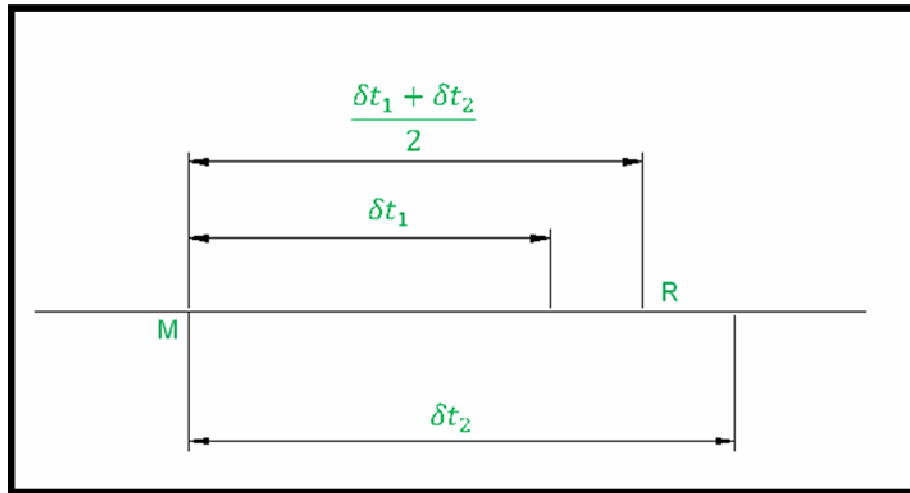
ANEXO C. Ecuación. 4

Con una incertidumbre de

$$\pm \frac{\delta t_1 + \delta t_2}{2}$$

ANEXO C. Ecuación. 5

ANEXO D. FIGURA. 2 Ilustración de la corrección para permitir el valor promedio estimado

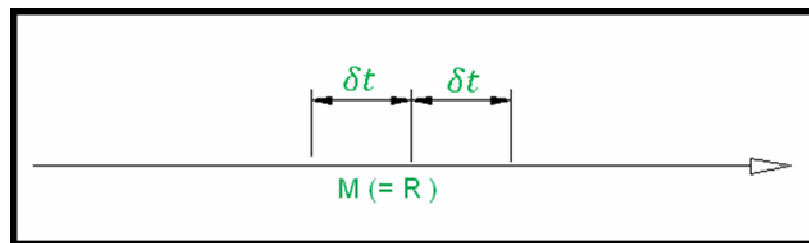


Poner el error medio estimado, igual a la media de los valores estimados máximos y mínimos asume implícitamente que el error sistemático es considerado como asimétrico. Cuando la magnitud de la incertidumbre sistemática puede ser evaluada experimentalmente, la incertidumbre debe calcularse como se describe en C.4.1 de errores aleatorios, la medida del valor se regulará como se ha descrito anteriormente.

Tal situación se refiere al caso, por ejemplo, una máquina de pesaje calibrada y ajustada. Cualquier indicación dada tendrá un error sistemático, pero las lecturas individuales se distribuyen en forma aleatoria sobre los verdaderos valores, y en la aplicación de una incertidumbre global en el resultado de la máquina de pesaje, esta incertidumbre aleatoria se puede utilizar para establecer límites sobre el valor medido.

Cuando el signo del error es desconocido y esta magnitud es evaluada subjetivamente, el error medio estimado es igual a cero y la incertidumbre de nuevo debe ser tomada como la mitad del rango estimado del error. Esto se ilustra en la Figura 3 del anexo C, donde la notación es como antes. En este caso, $\delta t_1 = \delta t_2$ de modo que la incertidumbre es de $\pm \delta t$.

ANEXO C. FIGURA. 3. Incertidumbre = $\pm \delta t$



Si las variables independientes diferentes, cuyo conocimiento permite el cálculo del caudal, son x_1, x_2, \dots, x_k entonces el caudal q se puede expresar como una función de algunas de estas variables:

$$q = f(x_1, x_2, \dots, x_k)$$

Si las incertidumbres asociadas a estas variables x_1, x_2, \dots, x_k son e_1, e_2, \dots, e_k entonces la incertidumbre e_q del caudal es definida como:

$$e_q = \left[\left(\frac{\partial q}{\partial x_1} e_1 \right)^2 + \left(\frac{\partial q}{\partial x_2} e_2 \right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial q}{\partial x_k} e_k \right)^2 \right]^{1/2}$$

ANEXO C. Ecuación. 6

Donde $\frac{\partial q}{\partial x_1}, \frac{\partial q}{\partial x_2}, \dots, \frac{\partial q}{\partial x_k}$ son derivadas parciales. (Ver ISO 5168.)

El porcentaje de incertidumbre, E_q es dado por:

$$E_q = 100 \frac{e_q}{q} \%$$

ANEXO C. Ecuación. 7

ANEXO. D

DISTRIBUCION-t STUDENT'S

La incertidumbre al 95%, en el nivel de confianza puede ser encontrada de la siguiente manera.

- si n es el número de mediciones, $n - 1$ se toma como el número de grados de libertad, v ;
- obtener el valor de t para el número apropiado de grados de libertad, $n - 1$, de la tabla;
- calcular la desviación estándar, s_x 'de la distribución de las mediciones de la cantidad X ;
- el rango de valores dentro de cualquier lectura se sitúe con una confianza del 95% es $x \pm ts_x$;
- el rango de valores dentro de los cuales la media real se sitúe con una confianza del 95% es $\bar{x} \pm ts_x/\sqrt{n}$.

ANEXO D. TABLA. 5. Valores de t-Student's

Numero de Grados de Libertad $v=n-1$	t Nivel de Confidencia 95 %
1	12,706
2	4,303
3	3,182
4	2,776
5	2,571
6	2,447
7	2,366
10	2,228
15	2,131
20	2,086
30	2,042
60	2,000
∞	1,96

ANEXO. E

CARACTERISTICAS DEL DESVIADOR DE FLUJO

Uno de los principales objetivos a la hora de diseñar el desviador de flujo es hacer que la trayectoria que tiene el desplazamiento en el movimiento del desviador sea más exacta y también que el activador del tiempo alcance una gran precisión.

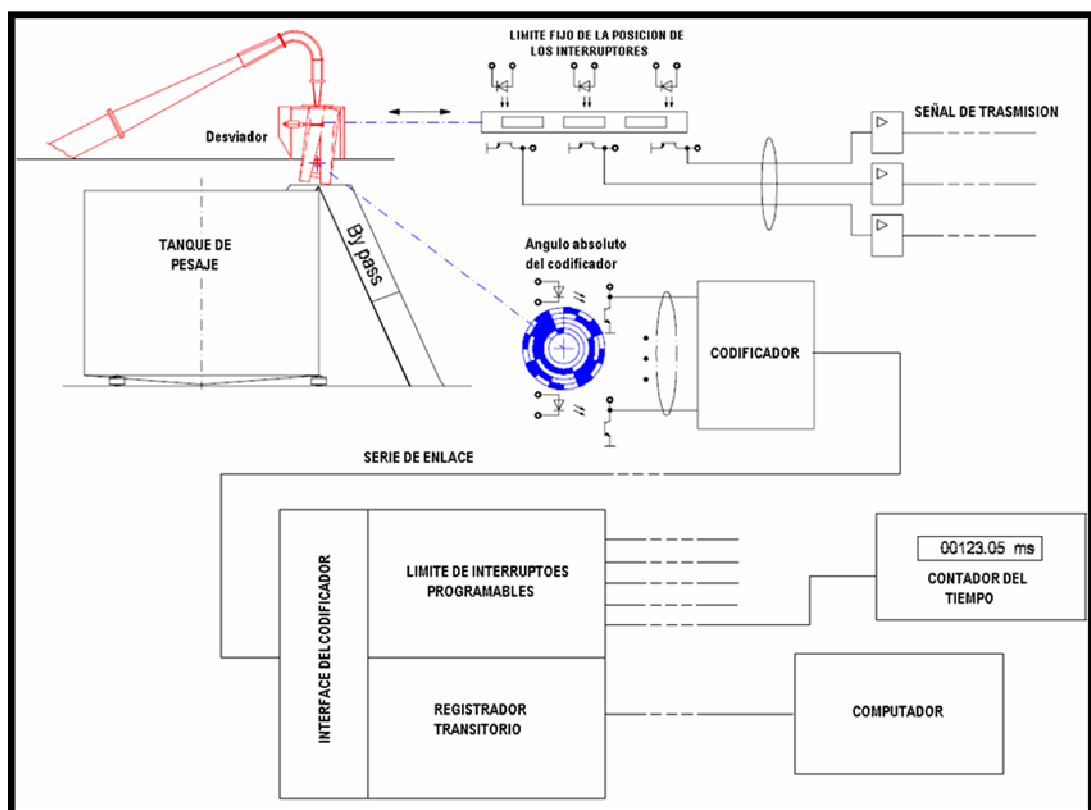
Estos objetivos se pueden alcanzar a través de la aplicación en el sistema de un activador para el desviador de tipo eléctrico y un codificador angular que está ubicado sobre el pivote del desviador. La figura FIGURA. 4 del ANEXO E muestra un corte esquemático del dispositivo para desviar el flujo que sería la mejor opción a tener en cuenta para el banco de pruebas del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga SA, ESP.

Es importante mencionar que la velocidad local del flujo en la corriente de salida de la boquilla no podrá exceder un valor máximo dado por las condiciones óptimas del flujo y la garantía de que el área de la sección del agua que atraviesa el desviador tenga una forma rectangular. Teniendo en cuenta este propósito el diseño mecánico del desviador provee los medios para variar el ancho w de la zona del flujo transversal (ver FIGURA. 4 del ANEXO E) a través del actuador de accionamiento eléctrico. Por lo tanto el ancho de la boquilla se puede adaptar a la

tasa del flujo de los respectivos Q_m , de modo que la velocidad local del flujo q_x no supere un valor determinado, por ejemplo 4 m/s .

Todas las funciones de este desviador con accionamiento eléctrico están controladas por un controlador lógico programable (PLC) supervisado por el sistema de control de procesos del banco de pruebas.

ANEXO E. FIGURA. 4. Corte esquemático del dispositivo para desviar el flujo.



El cruce en el desviador es dado en una posición exacta, una velocidad controlada y un movimiento controlado.

Como se muestra en el esquema de la FIGURA. 4 del ANEXO E, existe codificador angular de alta precision conectado al pivote del desviador. Sobre la base de las señales de salida del codificador existe un procesador de control embebido y una unidad de adquisicion de datos que proporciona una alta precision en el accionamiento del temporizador en las funciones de adquisicion de datos. Los datos adquiridos sirven de transición para un mejor enfoque en la correccion del error del cronometraje del tiempo en el desviador a través de un tipo especial de análisis retrospectivo de la trayectoria posición-tiempo del desviador durante un ciclo de medición lo cual facilita el proceso de calibracion.

La trayectoria posición-tiempo es capturada durante otra transicion del desviador y es analizada en una linea-off de modo de operación utilizando herramientas de software estandar como hojas de calculo. Mediante un codificador absoluto angular se captura una serie de tiempo de las posiciones angulares con un tiempo de resolución de 50 μ s en un grabador de señales transitoria.

ANEXO. F

ANEXO G.FIGURA. 1 Curva Altura (m) vs Caudal (m^3/h) para una bomba de 1750 RPM



SIHI Pumps (Colombia) S.A.

www.sihi-colombia.com info@sihi.com.co

Carrera 34A No 48-33, Bogotá

Teléf.: (57-1) 3649264

Fax: (57-1) 3649262

Proyecto:

Oferta No. : CRM-99999-2

Fecha: Sabado, 28 de Julio de 2007

Pos. N°:

Nuestra Ref.: CRM-99999-2

Bomba tipo: **NOWA** - Bomba con cuerpo de voluta según EN 733 / DIN 24255

Modelo bombaNOWA - South America - NOWA 150200

Su Ref. :

