

**DISEÑO DE UN BANCO PATRÓN PARA LA CALIBRACIÓN DE MEDIDORES  
DE FLUJO DE LÍQUIDOS POR EL MÉTODO GRAVIMÉTRICO ESTÁTICO**

**ÉRIK STIV TAPIAS CHÁVEZ**

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

**2004**

**DISEÑO DE UN BANCO PATRÓN PARA LA CALIBRACIÓN DE MEDIDORES  
DE FLUJO DE LÍQUIDOS POR EL MÉTODO GRAVIMÉTRICO ESTÁTICO**

**ÉRIK STIV TAPIAS CHÁVEZ**

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

**Director**

**JAVIER RUGELES**

**Ingeniero Mecánico**

**Codirector**

**HENRY ABRIL BLANCO**

**Administrador de empresas**

**Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas**

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

**2004**

## **DEDICATORIA**

A mis padres, María Chávez Montes y Heriberto Tapias Cardona,  
por todo el amor, apoyo y comprensión que me brindaron para  
hacer realidad este sueño.

Érik Stiv Tapias Chávez

## **AGRADECIMIENTOS**

Al personal del Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas por el apoyo incondicional prestado durante todo el desarrollo del proyecto.

A Adolfo León Arenas y Javier Rugeles, Ingenieros mecánicos y profesores de la Escuela de Ingeniería mecánica de la Universidad Industrial de Santander por la colaboración oportuna y la confianza depositada para la realización de este proyecto.

A Juan Manuel Ortiz, Ingeniero de proyección y desarrollo y Henry Abril Blanco Director del Laboratorio CDT de Gas por toda su colaboración y dedicación para sacar este proyecto adelante.

Y a todas aquellas personas que de una u otra manera hicieron posible la realización de este proyecto.

Gracias.

## TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1 .....	3
GENERALIDADES DEL FLUJO DE FLUIDOS.....	3
1.1.    CONCEPTO DE FLUJO.....	3
1.2.    CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO.....	4
1.2.1.    Flujo ideal y flujo real.....	4
1.2.2.    Flujo laminar y turbulento.....	4
1.2.3.    Asimetría del perfil de velocidades.....	7
1.2.4.    Rotación y remolinos (swirl). .....	8
1.2.5.    Flujo en régimen permanente y no permanente.....	9
1.2.6.    Flujo compresible e incompresible. ....	10
1.3.    ECUACIONES BÁSICAS DE PÉRDIDAS EN FLUJO INTERNO. ....	10
1.3.1.    Radio hidráulico.....	14
CAPÍTULO 2 .....	16
MEDICIÓN DE FLUJO .....	16
2.1.    TIPOS BÁSICOS DE MEDICIÓN DE CAUDAL.....	16
2.1.1.    Medición de la velocidad puntual.....	16
2.1.2.    Medición de velocidad media en tuberías.....	16
2.1.3.    Medición de caudal volumétrico. ....	17
2.1.4.    Medición de volumen total.....	17
2.1.5.    Medición de caudal másico.....	18
2.1.6.    Medición de la masa total. ....	18
2.2.    CLASIFICACIÓN DE LOS MEDIDORES DE FLUJO. ....	18
2.2.1.    Medidores de desplazamiento positivo.....	19
2.2.2.    Medidores de presión diferencial. ....	20
2.2.3.    Medidores de velocidad.....	21
2.2.4.    Medidores másicos. ....	22
PATRONES DE CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO DE LÍQUIDOS. 24	
3.1.    CALIBRACIÓN.....	24
3.2.    PATRONES PARA LA CALIBRACIÓN. ....	27
3.2.1.    Patrones primarios.....	28
3.2.2.    Patrones secundarios.....	35
CAPÍTULO 4 .....	37

MEDICIÓN DE FLUJO DE LÍQUIDOS POR EL MÉTODO GRAVIMÉTRICO	
ESTÁTICO. ....	37
4.1. PRINCIPIO. ....	37
4.2. PRECISIÓN DEL MÉTODO. ....	39
4.2.1. Requisitos. ....	39
4.3. COMPONENTES PRINCIPALES. ....	40
4.3.1. Diverter. ....	40
4.3.2. Sistemas de medición del tiempo. ....	44
4.3.3. Línea de calibración. ....	46
4.3.4. Tanque de colección. ....	48
CAPÍTULO 5 .....	50
BANCO DE CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO DE LÍQUIDOS POR	
EL MÉTODO GRAVIMÉTRICO ESTÁTICO. ....	
5.1. SELECCIÓN DEL MÉTODO. ....	50
5.2. DESCRIPCIÓN DEL BANCO DE CALIBRACIÓN. ....	51
5.3. DISEÑO DEL BANCO. ....	53
5.3.1. Diverter. ....	53
5.3.2. Línea de calibración. ....	70
5.3.3. Tanques de colección. ....	75
5.3.4. Estructura de soporte del diverter. ....	81
5.3.5. Soportes del sistema. ....	86
5.3.6. Sistema neumático. ....	88
5.4. DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DEL SISTEMA. ....	90
5.5. PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN DE LOS MEDIDORES. ....	97
5.6. INCERTIDUMBRE DEL BANCO. ....	101
5.6.1. Factores que afectan la estimación de la incertidumbre. ....	101
5.6.2. Modelo matemático. ....	107
5.7. SELECCIÓN DE EQUIPOS. ....	111
5.7.1. Válvulas reguladoras de caudal. ....	111
5.7.2. Bomba centrífuga. ....	112
5.7.3. Actuadores neumáticos. ....	113
5.7.4. Válvula electro neumática. ....	114
5.7.5. Cronómetro. ....	114
5.7.6. Sensores de temperatura. ....	114
5.7.7. Sensor óptico. ....	115
5.7.8. Balanzas y celdas de carga. ....	115
5.7.9. Módulos de entradas digitales y entradas analógicas. ....	117
5.7.10. Módulos de salidas digitales. ....	117
5.7.11. Módulo de puertos seriales. ....	117
5.7.12. Cerebro B-3000 .....	117
5.7.13. Controlador SNAP -LCSX-PLUS .....	118
5.7.14. Fuente de alimentación. ....	118

5.7.15. Base SNAP B12M.....	118
RECOMENDACIONES .....	119
CONCLUSIONES .....	120
BIBLIOGRAFÍA.....	122

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Perfil de velocidad en un flujo laminar.....	5
Figura 2. Perfil de velocidad de un flujo turbulento. ....	6
Figura 3. Perfiles de velocidades a 5 y a 20 diámetros aguas abajo de una curva en una tubería. ....	7
Figura 4. Flujo secundario. ....	8
Figura 5. Flujo helicoidal creado por dos curvas adyacentes en planos a 90°. ....	8
Figura 6. Acondicionador de flujo. ....	9
Figura 7. Estrechamiento brusco y gradual. ....	14
Figura 8. Ensanchamiento brusco y gradual. ....	14
Figura 9. Clasificación de medidores de flujo de líquidos. ....	19
Figura 10. Medidor rotativo. ....	20
Figura 11. Principio de funcionamiento de un medidor rotativo. ....	20
Figura 12. Platina de orificio (izquierda); Instalación de una platina de orificio (derecha). ....	21
Figura 13. Medidor ultrasónico. ....	22
Figura 14. Medidor de Coriolis. ....	23
Figura 15. Conceptos relativos a la calibración. ....	27
Figura 16. Probador bidireccional. ....	30
Figura 17. Calibración de un medidor de turbina con un probador bidireccional. ....	30
Figura 18. Probador compacto. ....	31
Figura 19. Diagrama de un probador compacto. ....	31
Figura 20. Serafín de 20 litros. ....	32
Figura 21. Diagrama de una instalación por el sistema gravimétrico dinámico. ....	34
Figura 22. Modelamiento de una instalación de un banco por el sistema gravimétrico estático. ....	34
Figura 23. Medidor de turbina (izquierda); Corte transversal (derecha). ....	36
Figura 24. Diagrama de una instalación para calibración por el método gravimétrico estático usando un tanque de nivel constante. ....	37
Figura 25. Diagrama de una instalación para calibración por el método gravimétrico estático suministro directo de bombas. ....	38
Figura 26. Diagrama de una instalación para medición del caudal por el método gravimétrico estático usando un tanque para nivel constante. ....	38
Figura 27. Ejemplo de diverter. ....	41
Figura 28. Líquido de flujo colectado en función del tiempo. ....	42
Figura 29. Regla de operación del diverter. ....	44
Figura 30. La regla de operación del diverter es igual en ambas direcciones. ....	45
Figura 31. Factor $K_s$ . ....	47

Figura 32. Diagrama del banco de calibración.....	52
Figura 33. Adaptación del perfil de velocidades por efecto de una contracción gradual en una boquilla. ....	55
Figura 34. Dimensiones de la boquilla.....	55
Figura 35. Parámetros para el cálculo del factor K.....	57
Figura 36. Boquilla intercambiable.....	59
Figura 37. DCL de la boquilla. ....	60
Figura 38. Cola de pescado. ....	61
Figura 39. Ejemplo de la deformación en las colas de pescado.....	63
Figura 40. Sistema desviador. ....	64
Figura 41. Fuerzas de reacción del deflector. ....	66
Figura 42. Fuerzas aplicadas en el deflector. ....	68
Figura 43. Ejemplo de la deflexión que sufre la placa desviadora en escala 1:50.....	68
Figura 44. DCL del deflector. ....	69
Figura 45. Instalación de un medidor de turbina utilizando acondicionadores de flujo. ....	71
Figura 46. Diagrama de la sección de tubería de calibración. ....	72
Figura 47. Tubo telescópico.....	74
Figura 48. Detalles del tubo telescópico. ....	74
Figura 49. Tanque de acrílico de 68 litros.....	75
Figura 50. Tanque de 2000 lt. ....	76
Figura 51. Tanque de 8200 litros. ....	76
Figura 52. Soporte de los tanques. ....	77
Figura 53. Cargas en el soporte.....	79
Figura 54. Estructura de soporte del diverter. ....	82
Figura 55. Estructura de soporte del diverter.....	82
Figura 56. Soporte de la red de tubería. ....	88
Figura 57. Sistema neumático.....	89
Figura 58. Banco de calibración. ....	89
Figura 59. Diagrama de la línea 2. ....	90
Figura 60. Diámetro equivalente.....	91
Figura 61. Válvula de bola.....	91
Figura 62. Carga estática.....	94
Figura 63. Proceso de desviación del flujo. ....	100
Figura 64. Diagrama del sistema de control.....	100
Figura 65. Representación gráfica del análisis de incertidumbre. ....	101
Figura 66. Características principales del proceso de desviación. ....	106
Figura 67. Válvula de control de flujo automática.....	111
Figura 68. Bomba centrífuga. ....	112
Figura 69. Actuador neumático.....	113

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Requerimientos del diverter .....	54
Tabla 2. Dimensiones de las boquillas.....	56
Tabla 3. Longitudes de las boquillas.....	58
Tabla 4. Caudales de trabajo de las boquillas.....	58
Tabla 5. Fuerza En la junta de las boquillas intercambiables.....	60
Tabla 6. Coeficiente de resistencia de las colas de pescado.....	61
Tabla 7. Espesor de las láminas de las “cola de pescado” .....	62
Tabla 8. Listado de esfuerzos y desplazamientos máximos del diverter 2.....	63
Tabla 9. Listado de esfuerzos y desplazamientos máximos del diverter 3.....	63
Tabla 10. Espesores de las placas desviadoras.....	67
Tabla 11. Fuerza mínima de los actuadores.....	70
Tabla 12. Tabla de resultados para longitudes de tubería recta para medidores de turbina sin acondicionadores de flujo.....	70
Tabla 13. Longitud de tubería recta aguas arriba usando acondicionadores de flujo tipo C para medidores de turbina.....	71
Tabla 14. Dimensiones de la tubería de calibración.....	72
Tabla 15. Mínima capacidad de los tanques de colección.....	75
Tabla 16. Espesores de lámina para tanques cilíndricos.....	77
Tabla 17. Propiedades de los perfiles.....	79
Tabla 18. Esfuerzos en el soporte del tanque 2.....	80
Tabla 19. Reacciones en los apoyos tanque 2.....	80
Tabla 20. Esfuerzos en el soporte del tanque 3.....	80
Tabla 21. Reacciones en los apoyos tanque 3.....	81
Tabla 22. Fuerzas sobre la estructura del diverter 2.....	81
Tabla 23. Esfuerzos de las barras en la estructura del diverter 2.....	83
Tabla 24. Reacciones en los soportes de la estructura del diverter 2.....	84
Tabla 25. Fuerzas sobre la estructura del diverter 3.....	84
Tabla 26. Esfuerzos de las barras en la estructura del diverter 3.....	84
Tabla 27. Reacciones en los soportes de la estructura del diverter 3.....	85
Tabla 28. Soportes de la red de tubería.....	87
Tabla 29. Factor K para accesorios en la línea 2.....	92
Tabla 30. Carga estática.....	94
Tabla 31. Pérdidas totales del sistema y potencia requerida por la bomba.....	94
Tabla 32. Cálculo de pérdidas de la línea de calibración 1.....	95
Tabla 33. Cálculo de pérdidas de la línea de calibración 2.....	96
Tabla 34. Cálculo del NPSH y la potencia de la bomba.....	97
Tabla 35. Estimación de la incertidumbre del diverter 1.....	108

Tabla 36. Estimación de la incertidumbre del diverter 2. ....	109
Tabla 37. Estimación de la incertidumbre del diverter 3. ....	110
Tabla 38. Coeficiente de flujo de las válvulas. ....	112
Tabla 39. Características de los actuadores.....	113
Tabla 40. Características y función de las RTD´s seleccionadas.....	115

## LISTA DE APENDICES

APENDICE A. MEDIDORES DE FLUJO.....	1
APENDICE B. DETERMINACIÓN DEL MEJOR ESTIMADO DE LA MEDICIÓN EN EL BANCO DE CALIBRACIÓN .....	1

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO 1. COSTOS DEL BANCO.....	1
ANEXO 2. PAPER .....	1
ANEXO 3. CONVOCATORIA COLCIECIAS.....	1
ANEXO 4. CURVA DE LA BOMBA.....	1
ANEXO 5. PLANOS.....	1

## NOMENCLATURA O GLOSARIO

### NOTACIÓN

a	Ancho a la entrada de la boquilla.
A	Cantidad total de líquido colectado al inicio de la prueba.
$A_s$	Área.
b	Largo a la entrada de la boquilla.
B	Déficit de volumen colectado.
c	Ancho a la salida de la boquilla.
C	Volumen de líquido desviado.
d	Largo a la salida de la boquilla.
$D_v$	Volumen extra colectado al final de la prueba.
D	Diámetro de tubería.
$D_{eq}$	Diámetro equivalente.
e	Rugosidad de la tubería.
E	Módulo de elasticidad.
es	Espesor.
F	Fuerza.
f	Factor de fricción.
g	Aceleración gravitacional.
h	Altura estática.
$h_L$	Caída de presión.
k	Constante.
K	Coefficiente de resistencia.
$K_C$	Factor de longitud efectiva.
$K_S$	Relación remolinos/velocidad, adimensional.
L	Longitud.

$m$	Masa.
$M_M$	Masa total de líquido colectado.
$MT_R$	Momento en el eje del diverter.
$p$	Presión.
$P_{CR}$	Carga crítica.
$\Delta p$	Diferencial de presión.
$Q$	Caudal
$Q_M$	Caudal másico.
$r$	Radio de giro.
$Re$	Número de Reynolds.
$R_H$	Radio hidráulico.
$S$	Densidad relativa.
$s$	Distancia entre el eje y el punto de apoyo del actuador.
$s_L$	Distancia entre el eje y el punto de aplicación de la fuerza.
$s_P$	Distancia entre el eje y el centro de gravedad.
$t$	Tiempo.
$T$	Temperatura.
$t_M$	Tiempo de colección.
$v$	Velocidad.
$V$	Volumen.
$W$	Peso.

## LETRAS GRIEGAS

$\alpha$	Coeficiente de dilatación térmica.
$\beta$	Máximo ángulo de impacto.
$\lambda$	Relación entre diámetros.
$\theta$	Ángulo, grados o radianes.
$\gamma$	Peso específico.

$\Phi$	Ángulo de desviación total del líquido.
$\rho$	Densidad.

## SUBÍNDICES

1, 2	Se refiere a la entrada y salida de un cuerpo.
act	Actuador.
b	Boquilla.
cp	Cola de pescado.
min	Mínimo.
max	Máximo.
pd	Placa desviadora.
x	En dirección del eje X
y	En dirección del eje Y

## RESUMEN

**TÍTULO:**  
**DISEÑO DE UN BANCO PATRÓN PARA LA CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO DE LÍQUIDOS POR EL MÉTODO GRAVIMÉTRICO ESTÁTICO**

**AUTOR:**  
Erik Stiv Tapias Chávez. \*\*

**PALABRAS CLAVES:**  
Metrología, Patrón primario, Diverter, Gravimétrico, Líquidos, Calibración.

**DESCRIPCIÓN:**  
El presente proyecto hace parte de la primera fase de una propuesta realizada por el Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT de GAS) a COLCIENCIAS, para realizar en conjunto con la Escuela de Ingeniería Mecánica apropiación de tecnología y generación de nuevos conocimientos mediante el diseño y construcción de un banco para la calibración de medidores de flujo de líquidos.

La calibración de medidores de flujo de líquidos se puede realizar *in situ* utilizando probadores mecánicos (provers) o en laboratorios fijos. Las disposiciones de las instalaciones de los bancos de calibración en laboratorios obedecen en gran medida de su principio de operación, los cuales pueden ser volumétricos o gravimétricos, estos últimos a su vez pueden ser dinámicos o estáticos. El contenido del libro presenta en primer lugar el estudio de las alternativas existentes para la calibración de medidores de flujo de líquidos, haciendo énfasis en el método gravimétrico estático, base del presente proyecto. Este método se caracteriza por utilizar una válvula desviadora de flujo de alta precisión conocida como *diverter*. Su diseño fue determinante para establecer el rango de operación del banco. El banco en general se diseñó en base a normas internacionales con el fin de garantizar un sistema capaz de satisfacer las necesidades del sector con bajos niveles de incertidumbre.

Como resultado se obtuvo el diseño de un banco para la calibración de medidores de flujo tipo turbina con diámetros comprendidos entre 1" hasta 8", en un rango de operación los 0,48 m<sup>3</sup>/h hasta los 580 m<sup>3</sup>/h con bajos niveles de incertidumbre.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Ingeniería Mecánica, Ing. Javier Rugeles.

## SUMMARY

**TITLE:**

**PATERN FACILITY DESIGN FOR LIQUID FLOW METER CALIBRATING BY THE STATIC GRAVIMETRIC METHOD**

**AUTHORS:**

Érik Stiv Tapias Chávez. \*\*

**KEY WORDS:**

Metrology, , Secondary standard, Wet test gas meter.

**DESCRIPTION:**

The present project is part of the first stage of a proposal made by Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas (CDT de GAS) for COLCIENCIAS, in order to altogether with the School of Mechanical Engineering make the appropriation of technology and generation of new knowledge by means of the design and construction of a module for the calibration of liquids flow measuring instruments.

The calibration of liquids flow measuring instruments can be made in situ using mechanical testers (provers) or in fixed laboratories. The installation disposition of the of the calibration modules in the laboratories, obeys to a great extent to their principle of operation, which can be volumetric or gravimetric, these last ones can as well be dynamic or static. The content of the book displays at first the study of the existing alternatives for the calibration of liquids flow measuring instruments, doing emphasis in the static gravimetric method, base of the present project. This method is characterized by the use of a high precision flow shifting valve knows as diverter. The design was determinant to establish the rank of operation of the module. The module in general was designed on the basis of international norms, with the purpose of guaranteeing a capable system to satisfy the necessities of the sector with low levels of uncertainty.

As a result the design of a model for the calibration of turbine type flow measure instruments turbine was obtained, with diameters between 1" and 8", in an operation rank between 0.48 m<sup>3</sup>/h to 580 m<sup>3</sup>/h with low levels of uncertainty.

---

\* Degree Work.

\*\* Physical-Mechanical Engineering Faculty, Mechanical Engineering School, Eng. Javier Rugeles.

## INTRODUCCIÓN

Según la Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA) y la Agencia para el Comercio y Desarrollo de los Estados Unidos, las pérdidas por regulación de agua en Colombia ascienden a más del 30% en todo el país, dejando al descubierto la falta de cobertura e infraestructura metrológica necesaria para satisfacer las necesidades del sector industrial, comercial y domiciliario.

En el campo de los hidrocarburos, debido a la falta de procedimientos estandarizados debidamente acreditados por la Superintendencia de Industria y Comercio - SIC - para la calibración de los medidores de flujo de líquidos que se emplean en procesos de transferencia de custodia, existe un ambiente de tensión en lo concerniente a las relaciones inter-empresariales del sector, por causa de manifestaciones de casos de poca satisfacción por parte de los transportadores y distribuidores, por no tener la certeza de la cantidad de fluido que reciben.

Frente a esta situación, el Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas, la Universidad Industrial de Santander y en su nombre la Escuela de Ingeniería Mecánica desarrollaron un proyecto como alternativa de solución aportando desarrollo tecnológico y al mismo tiempo contribuyendo a la apropiación de nuevos conocimientos en la rama del flujo de fluidos en Colombia.

El proyecto consistió en diseñar un banco patrón utilizando el método gravimétrico estático, el cual cuenta a nivel mundial con un amplio reconocimiento en el ámbito metrológico. El diseño del banco se fundamentó principalmente en la norma internacional ASME MFC 9M.

El resultado de este proceso es el diseño de un banco patrón que estará en capacidad de calibrar medidores de flujo de líquidos en un rango de 0,47 a 580 m<sup>3</sup>/h con niveles de incertidumbre estándar teórica inferiores a  $\pm 0,5\%$ .

## CAPÍTULO 1

### GENERALIDADES DEL FLUJO DE FLUIDOS.

#### 1.1. CONCEPTO DE FLUJO.

Un fluido es una sustancia que se deforma continuamente cuando es sometida a un esfuerzo cortante, sin importar la magnitud de dicho esfuerzo, y experimenta movimientos relativos entre sus partes elementales siempre que estos esfuerzos cortantes se encuentren presentes.

Cuando se toma un punto o una sección transversal de referencia dentro de una tubería, el flujo se considera como la cantidad de fluido, expresada en masa o en volumen, que pasa por esa sección o punto en una cierta cantidad de tiempo. Por lo tanto, el parámetro “tasa de flujo o caudal” será expresado en unidades de volumen o masa por unidad de tiempo ( $m^3/h$  ó  $Kg/h$ ). Podemos decir también que el caudal volumétrico de un fluido es igual al producto de la velocidad media del fluido por la sección transversal de la tubería. A su vez, el caudal másico, es igual al producto entre la tasa de flujo volumétrica y la densidad del fluido.

Como en la práctica es difícil llevar a cabo la medición directa de la densidad del fluido, se realizan mediciones de temperatura y de presión para de esos valores poder inferir el valor de la densidad.

## **1.2. CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO.**

El flujo se puede clasificar de muchas maneras, pero existen por lo menos tres condiciones que deben considerarse:

- a. La ecuación de continuidad,
- b. La ley de Newton del movimiento se aplica para cada partícula del fluido en cada instante, y
- c. En las paredes del tubo, la componente normal de la velocidad es igual a la velocidad del propio tubo. Para un fluido real, de acuerdo con el principio de la adherencia, la componente tangencial de la velocidad del fluido en las paredes es cero, con relación a las paredes de las tuberías.

### **1.2.1. Flujo ideal y flujo real.**

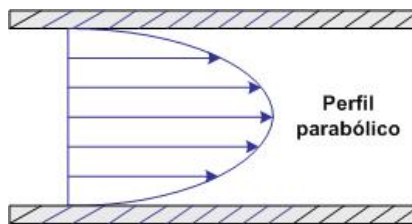
En un flujo, cuando no hay atracción entre las partículas móviles adyacentes, o sea, la viscosidad del fluido es cero, el flujo se denomina ideal. En un flujo ideal, las fuerzas internas en cualquier sección siempre son perpendiculares a dicha sección. Este flujo obedece a un modelo idealizado, pero que nunca se obtiene en la práctica. Lo anterior se debe a que todos los fluidos reales son más o menos viscosos. De lo anterior se puede decir que el flujo real y el flujo viscoso son sinónimos.

### **1.2.2. Flujo laminar y turbulento.**

Un fluido puede fluir en una tubería básicamente bajo dos regímenes diferentes: flujo laminar o flujo turbulento.

El flujo laminar es denominado de esta forma porque todas las partículas del fluido se mueven en líneas rectas diferenciadas, paralelas al eje de la tubería, y de forma ordenada. Es gobernado por la ley de Newton de la viscosidad y ocurre cuando el número de número de Reynolds ( $Re$ ) es inferior a 2000. En una tubería circular, la velocidad adyacente a las paredes es cero y aumenta para un valor máximo en el centro del tubo. El perfil de velocidades posee la forma de una parábola, y la velocidad media es igual a la mitad de la velocidad máxima en el eje central.

**Figura 1. Perfil de velocidad en un flujo laminar.**



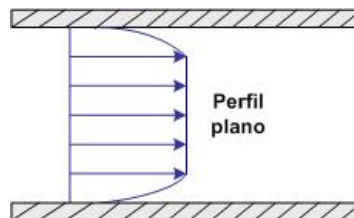
Fuente: el autor

El régimen de flujo turbulento ocurre para números de Reynolds mayores que 2000. Sin embargo, muchas veces tales regímenes pueden continuar o iniciarse en números de Reynolds más bajos que 2000. En este tipo de flujo, las fuerzas de inercia predominan y las fuerzas viscosas son secundarias. La distribución de velocidad es complicada por el movimiento caótico dentro del fluido. De esa manera, en el régimen turbulento no es posible observar las líneas de corriente discretas, consistiendo el flujo en una “masa de remolinos”. Así, las partículas del fluido no siguen la misma trayectoria. El flujo puede cambiar de laminar a turbulento con base a:

- a. Un cambio en la velocidad del flujo.
- b. Alteraciones del propio flujo.
- c. Rugosidad de la superficie sobre la que fluye.

- d. Los gradientes de presión. Cuando la presión estática decrece con la distancia a lo largo del flujo, las alteraciones en el flujo se amortiguan; cuando esta presión aumenta, las alteraciones se amplifican.
- e. Otros factores: densidad del fluido, la longitud y el coeficiente de viscosidad.

**Figura 2. Perfil de velocidad de un flujo turbulento.**



Fuente: el autor

La capa límite es aquella capa cerca del contorno en la que en su interior, las fuerzas de fricción son del mismo orden de magnitud que las fuerzas de inercia. A la capa límite cuyo flujo es laminar se le suele llamar capa límite laminar mientras que si el flujo es turbulento la capa recibe el nombre de capa límite turbulenta. El punto en el cual la capa laminar se va convirtiendo en turbulenta e incrementa su grosor se denomina "transición a turbulencia" o "transición de capa límite". La representación gráfica que muestra como la velocidad de un fluido varía de acuerdo con el diámetro de la tubería es llamada el perfil de velocidades de flujo, siendo este, probablemente, el parámetro de influencia más importante y menos conocido en una medición de caudal.

En el flujo turbulento, el perfil de velocidades aguas abajo de un tramo recto y largo de tuberías es mucho más achatado que en régimen laminar, y la velocidad en el centro es aproximadamente 1,2 veces la velocidad media, dependiendo de la rugosidad de la tubería. Bajo estas condiciones, se dice que el perfil está plenamente desarrollado o normal.

En aplicaciones industriales, normalmente se asume que los flujos en consideración ocurren en régimen turbulento, a menos que se especifique flujo laminar.

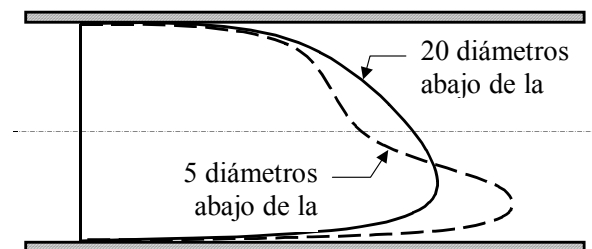
### 1.2.3. Asimetría del perfil de velocidades.

Los circuitos de tuberías poseen cambios de dirección y de área de la sección transversal. Esto implica una posible distorsión en el perfil de velocidad debido al paso del flujo a través de las curvas, reducciones, válvulas o medidores de caudal.

Esta distorsión del perfil de velocidad es crítica en la operación de medidores de flujo que dependen de la perfecta axisimetría de flujo, como por ejemplo los medidores de cabeza, turbina o ultrasónicos. El grado de axisimetría del perfil de velocidad depende de factores como el número de Reynolds y la rugosidad de la superficie interna de la tubería. Adicionalmente, un desvío en el perfil de velocidades de operación en relación al perfil utilizado en la calibración del medidor en laboratorio, podrá ocasionar errores de medición de difícil detección y cuantificación.

La Figura 3 muestra dos perfiles asimétricos típicos, medidos con un anemómetro láser a 5 y a 20 diámetros de tubería, aguas abajo de la misma curva en una tubería comercial de 75 mm (3") de diámetro.

**Figura 3. Perfiles de velocidades a 5 y a 20 diámetros aguas abajo de una curva en una tubería.**

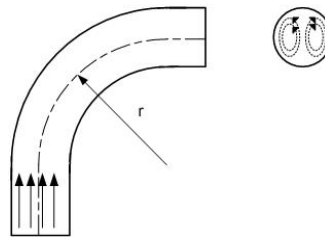


Fuente: Conceptos claves sobre medición de flujo de fluidos.

#### 1.2.4. Rotación y remolinos (swirl).

El fluido al momento de dar una curva, ya sea en régimen laminar o turbulento, origina un fenómeno conocido como “flujo secundario”. Este es un movimiento de rotación perpendicular al eje de la tubería, que se superpone al movimiento principal en la dirección del eje. La resistencia debida a la fricción de las paredes de la tubería y la acción con la fuerza centrífuga combinadas produce esta rotación. La figura 4 ilustra este fenómeno.

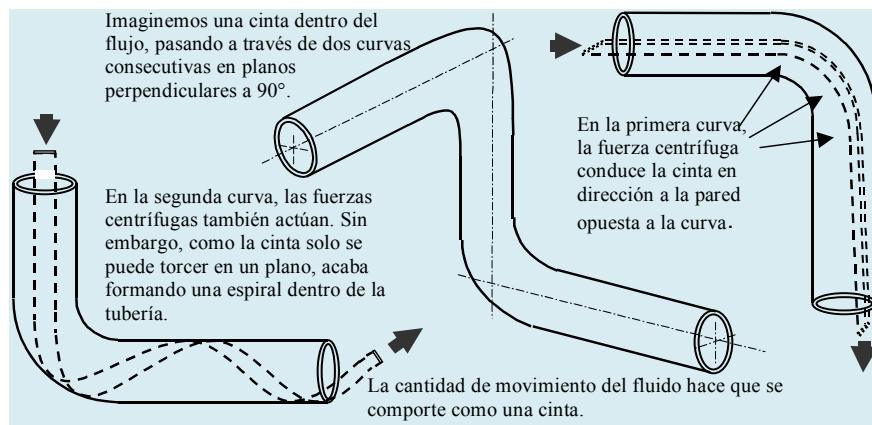
**Figura 4. Flujo secundario.**



Fuente: el autor

Por otra parte, el tipo de perturbación más severo en la mayoría de medidores de caudal es el flujo rotacional en tres dimensiones conocido como swirl, producido por dos curvaturas adyacentes posicionadas en planos diferentes aguas arriba del medidor de caudal. Esta configuración hace que el flujo gire en forma helicoidal, haciendo que este efecto persista por largas distancias.

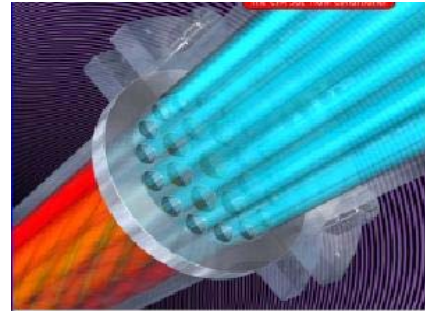
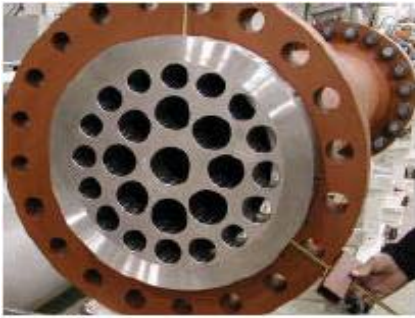
**Figura 5. Flujo helicoidal creado por dos curvas adyacentes en planos a 90°.**



Fuente: Conceptos claves sobre medición de flujo de fluidos.

En flujos a números de Reynolds elevados, ese fenómeno decae a una tasa de cerca del 4% por cada diámetro recorrido y, a bajos números de Reynolds, ese decaimiento es de cerca de 2% por diámetro. Los efectos nocivos del swirl pueden atenuarse, de ser necesario, instalando los llamados rectificadores o acondicionadores de flujo aguas arriba del medidor de flujo.

**Figura 6. Acondicionador de flujo.**



Fuente: [www.flowconditioner.com](http://www.flowconditioner.com)

### 1.2.5. Flujo en régimen permanente y no permanente.

Un flujo en régimen permanente es aquel en el cual todas las condiciones, en cualquier punto, son constantes en el tiempo. Teóricamente, el flujo en régimen permanente se obtiene solo bajo régimen laminar. Esto se debe a que en el flujo turbulento se generan continuamente fluctuaciones en la velocidad y en la presión en cada punto. En la práctica, al menos, si los valores fluctúan en torno de un valor medio constante, de modo simétrico, se considera que el régimen es permanente.

En un flujo en régimen transiente, las condiciones varían con relación al tiempo y en cada sección de la tubería. Esta variación en la tasa de flujo puede ser lenta, como resultado de la acción de una válvula de control proporcional; o puede ser rápida, como resultado del bloqueo repentino de una válvula de cierre rápido, que puede inclusive producir el fenómeno conocido como “golpe de ariete”.

### **1.2.6. Flujo compresible e incompresible.**

Estrictamente hablando, ningún fluido es verdaderamente incompresible, dado que hasta los líquidos pueden variar su densidad cuando son sometidos a alta presión. En la práctica, para fluidos en movimiento con número de Mach menor de 0,3 el flujo es considerado normalmente incompresible. En flujo de líquidos, es muy difícil alcanzar Mach igual a 0,3, a causa de la altísima presión requerida para inducir el flujo. Por esta razón, este tipo de flujo es considerado normalmente incompresible.

Una diferencia esencial entre un fluido compresible y uno incompresible está en la velocidad del sonido. En un fluido incompresible la velocidad de propagación de un gradiente de presión es prácticamente instantánea; por otro lado, en un fluido compresible la velocidad es finita. Un pequeño disturbio se propaga en la velocidad del sonido. Cuando la velocidad del fluido se iguala a la velocidad del sonido en el fluido, la variación de la densidad (o del volumen) es igual a la variación de la velocidad. Es decir, una gran variación de la velocidad, en un flujo a alta velocidad, causa gran variación en la densidad del fluido. Los flujos de gases pueden fácilmente alcanzar velocidades elevadas, características de flujos compresibles.

Para el flujo turbulento de un fluido incompresible, el efecto de la variación de la densidad en la expresión de la turbulencia es despreciable. Pero, este efecto debe ser considerado cuando la operación es con un fluido compresible. Un análisis del flujo turbulento de un fluido compresible requiere la correlación de las componentes de la velocidad, de la densidad y de la presión.

### **1.3. ECUACIONES BÁSICAS DE PÉRDIDAS EN FLUJO INTERNO.**

La energía total de un fluido en movimiento es la misma en toda la sección transversal a lo largo de las tuberías. La ecuación de Bernoulli expresa este factor en términos matemáticos.

$$\frac{v^2}{2g} + \frac{p}{\gamma} + h = const$$

**Ecuación 1**

Donde:

$v$  - Velocidad del fluido

$p$  - Presión

$g$  - Constante de la gravedad

$h$  - Altura

$\gamma$  - Peso específico

Las pérdidas de presión en un sistema de tuberías se deben a varias características que pueden clasificarse como:

- Rozamiento en las paredes de la tubería.
- Cambios de dirección del flujo.
- Obstrucciones en el paso del flujo.
- Cambios repentinos o graduales en la superficie y contorno del paso del flujo.

La pérdida de carga ( $h_L$ ) causada por el esfuerzo cortante en la pared para un flujo desarrollado se relaciona con el factor de fricción por la ecuación de Darcy-Weisbach:

$$h_L = f \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

$f$  - Factor de fricción

$L$  - Longitud de la tubería

$D$  - diámetro interno de la tubería

La relación  $L/D$  es la longitud equivalente en diámetros de tubería recta que causa la misma pérdida de presión que un obstáculo, en las mismas condiciones de flujo. Se han obtenido datos experimentales que relacionan el factor de fricción con el número de Reynolds ( $Re$ ) en flujos plenamente desarrollados en tuberías con una amplia gama de asperezas. Esta relación se presenta en lo que se conoce como el diagrama de Moody. Este diagrama tiene varias características que podemos destacar:

- Para una aspereza de pared dada ( $e$ ), medida por la aspereza relativa  $e/D$ , existe un valor de Reynolds por encima del cual el factor de fricción es constante, y eso define el régimen completamente turbulento.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 * \log\left(3.7 * \frac{D}{e}\right) \quad \text{Ecuación 3}$$

- Con valores de aspereza relativa  $e/D$  más pequeños se observa que, al disminuir el Reynolds, el factor de fricción aumenta en la zona de transición y finalmente adquiere el mismo valor que para una tubería lisa.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 * \log\left(\frac{1}{3.7 * \frac{D}{e}} + \frac{2.51}{Re * \sqrt{f}}\right) \quad \text{Ecuación 4}$$

Esta ecuación se conoce como la ecuación de Colebrook

- Con números de Reynolds por debajo de 2000, se muestra el factor de fricción de flujo laminar. La zona crítica acopla el flujo turbulento con el laminar.
- Los valores de  $e$  en este diagrama son para tuberías nuevas. Con el tiempo, las tuberías se corroen y ensucian, lo que altera tanto la aspereza como el diámetro y hace que aumente el factor de fricción.

El coeficiente de resistencia  $K$  se define como la pérdida de altura de velocidad para una válvula o accesorio.  $K$  está siempre asociado con el diámetro al cual se refiere la velocidad. En los accesorios, las pérdidas por fricción, a lo largo de la longitud real del flujo son mínimas, por ello,  $K$  se considera independiente del factor de fricción y del número de Reynolds bajo cualquier condición de flujo.

La resistencia al flujo debido a ensanchamientos bruscos y graduales es:

$$\theta \leq 45^\circ \quad K = \frac{2.6 * \operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) * (1 - \beta^2)}{\beta^4} \quad \text{Ecuación 5}$$

$$45^\circ \leq \theta \leq 180^\circ \quad K = \frac{(1 - \beta^2)^2}{\beta^4} \quad \text{Ecuación 6}$$

y la resistencia debida a estrechamientos bruscos y graduales:

$$\theta \leq 45^\circ \quad K = \frac{0.8 * \operatorname{sen}\left(\frac{\theta}{2}\right) * (1 - \beta^2)}{\beta^4} \quad \text{Ecuación 7}$$

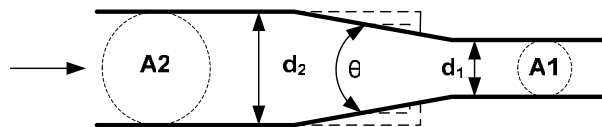
$$45^\circ \leq \theta \leq 180^\circ \quad K = \frac{0.5 * \sqrt{\sin\left(\frac{\theta}{2}\right)} * (1 - \beta^2)}{\beta^4} \quad \text{Ecuación 8}$$

Donde:

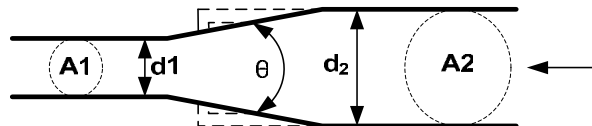
$$\lambda = \frac{D_1}{D_2} \quad \text{Ecuación 9}$$

Los subíndices 1 y 2 definen los diámetros interiores de las tuberías pequeña y grande respectivamente.

**Figura 7. Estrechamiento brusco y gradual.**



**Figura 8. Ensanchamiento brusco y gradual.**



### 1.3.1. Radio hidráulico.

A veces se tienen conductos con sección transversal que no es circular. Para calcular el número de Reynolds en estas condiciones, el diámetro circular es sustituido por el diámetro equivalente (cuatro veces el radio hidráulico ( $R_H$ )), donde:

$$R_H = \frac{A_{vn}}{P_m} \quad \text{Ecuación 10}$$

$A_{vn}$  - equivale a la superficie de la sección transversal de la vena líquida y,

$P_m$  - corresponde al perímetro mojado.

Esto se aplica a cualquier tipo de conducto (conducto circular parcialmente lleno, ovalado, cuadrado o rectangular), pero no a formas muy estrechas, como aberturas anulares o alargadas, donde la anchura ( $a$ ) es pequeña con relación a la longitud. En tales casos, el radio hidráulico es aproximadamente igual a la mitad de la anchura del paso.

$$D_{eq} = 2a \qquad \text{Ecuación 11}$$

Los conceptos y ecuaciones enunciados en este capítulo fueron base para el diseño del banco como se describe en el capítulo 5.

## CAPÍTULO 2

### MEDICIÓN DE FLUJO

#### 2.1. TIPOS BÁSICOS DE MEDICIÓN DE CAUDAL.

El término genérico medición de flujo puede referirse a cualquiera de los seis tipos de medición encontrados comúnmente. Estos se describen brevemente a continuación.

##### 2.1.1. Medición de la velocidad puntual.

Existen diversos tipos de instrumentos disponibles para la medición de la velocidad puntual de un determinado fluido. Estos medidores son llamados anemómetros cuando se utilizan en corrientes libres de aire, flujómetros si son empleados en agua y medidores de inserción si son utilizados específicamente dentro de tuberías y ductos.

##### 2.1.2. Medición de velocidad media en tuberías.

La velocidad media en tuberías,  $(\bar{v})$ , está relacionada con la tasa de flujo volumétrica,  $(Q)$ , y el área de sección transversal de la tubería  $(A_s)$ :

$$\bar{v} = \frac{Q}{A_s} \quad \text{Ecuación 13}$$

El término  $\bar{v}$  puede ser determinado de tres maneras:

- Midiendo  $Q$  y  $A_s$  y aplicándolo a la ecuación anterior;
- Midiendo  $v$  en varios puntos de una determinada sección transversal y, determinando una media ponderada apropiada, o;
- Con menor precisión, midiendo la velocidad en un punto situado a  $\frac{3}{4}$  de distancia entre el centro y las paredes de la tubería, pues se sabe que, en flujos completamente desarrollados, la velocidad del fluido en ese punto representa aproximadamente la velocidad media del flujo.

### 2.1.3. Medición de caudal volumétrico.

El caudal volumétrico, se define como el flujo de un determinado volumen de fluido ( $V$ ) por un intervalo de tiempo ( $t$ ):

$$Q = \frac{V}{t} \quad \text{Ecuación 14}$$

Los medidores diseñados para medir directamente el valor de  $Q$ , se conocen como medidores de caudal volumétrico.

### 2.1.4. Medición de volumen total.

Los medidores diseñados para indicar directamente el volumen total ( $V$ ) se conocen como totalizadores o medidores volumétricos. Es posible obtener el valor del volumen total  $V$  de fluido que pasa a través del medidor por medio de la integración de la señal de salida a lo largo de un determinado intervalo de tiempo. También es posible obtener  $Q_v$  a partir de un medidor volumétrico derivando la señal de salida con relación al tiempo. Estas operaciones, entretanto, generalmente convergen en una disminución de la exactitud de la medición.

### 2.1.5. Medición de caudal másico.

El caudal másico de un fluido ( $Q_M$ ), representa el paso de una masa ( $m$ ) determinada del fluido durante un intervalo de tiempo, es decir:

$$Q_M = \frac{m}{t} \quad \text{Ecuación 15}$$

Los medidores que directamente indican el caudal másico del fluido con llamados medidores másicos.

### 2.1.6. Medición de la masa total.

Actualmente, se encuentran disponibles comercialmente medidores capaces de medir directamente la masa total de un fluido durante un determinado intervalo de tiempo. Para medir la masa, es preciso medir  $Q_M$  e integrar las mediciones en un determinado tiempo o de igual forma, medir el volumen total del fluido, la densidad ( $\rho$ ) y utilizar la ecuación:

$$m = V \rho \quad \text{Ecuación 16}$$

## 2.2. CLASIFICACIÓN DE LOS MEDIDORES DE FLUJO.

En los instrumentos de ingeniería probablemente cuando más amplio rango para seleccionar dispositivos se tiene es cuando se especifica medidores de flujo. Los medidores son escogidos en base a muchos factores como: el costo, el tamaño, el fluido que mide y su estado, el rango del medidor y la exactitud deseada.

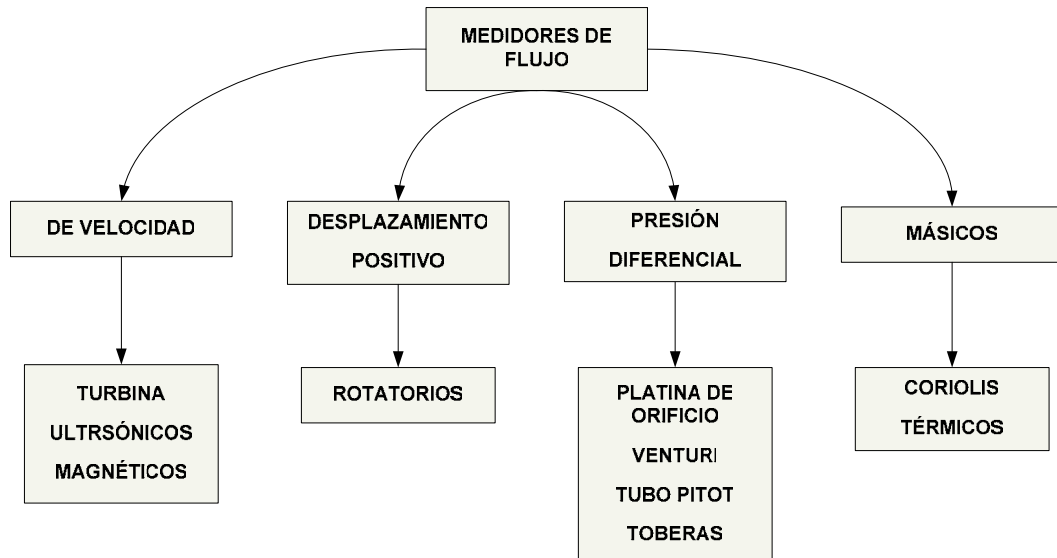
Los medidores de caudal son clasificados en cuatro categorías:

1. Medidores de flujo con parte móviles lubricadas, como los son los de desplazamiento positivo, las turbinas y los de área variable.

2. Medidores con parte móviles no lubricadas, como los de coriolis.
3. Medidores de flujo con obstrucción, como los de vórtice y los de presión diferencial.
4. Medidores con sensores colocados externamente como los medidores ultrasónicos.

Otra clasificación se muestra en el siguiente diagrama.

**Figura 9. Clasificación de medidores de flujo de líquidos.**



Fuente: El autor

### 2.2.1. Medidores de desplazamiento positivo.

Miden el caudal volumétrico ( $Q_V$ ) directamente por medio de la repetición de una cámara o volumen muestra de fluido. El volumen total de líquido que pasa a través del medidor en un período de tiempo dado es el producto del volumen de muestra por el número de muestras. Los medidores de desplazamiento positivo frecuentemente totalizan el flujo directamente a través de la cuantificación de una

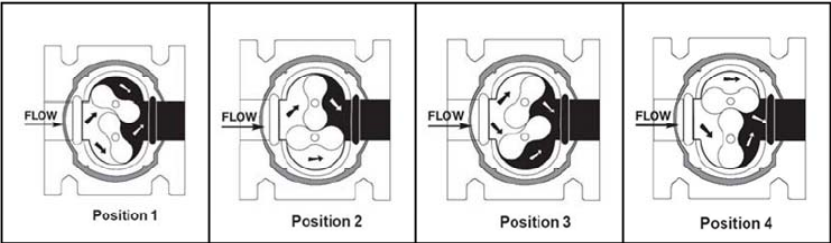
integral, pero ellos también pueden generar un pulso de salida el cual puede ser leído sobre un display local contador o por medio de la transmisión a un cuarto de control. Porque cada pulso representa un volumen discreto de fluido, estos son idealmente adaptados en un conjunto y cantidad. Los medidores de desplazamiento positivo pueden ser menos precisos que otros medidores por las fugas internas que se presentan entre sus partes constitutivas. Hay tres tipos comunes de medidores: los de pistones, engranajes y discos nutante.

**Figura 10. Medidor rotativo.**



Fuente: [www.emersonprocess.com](http://www.emersonprocess.com)

**Figura 11. Principio de funcionamiento de un medidor rotativo.**



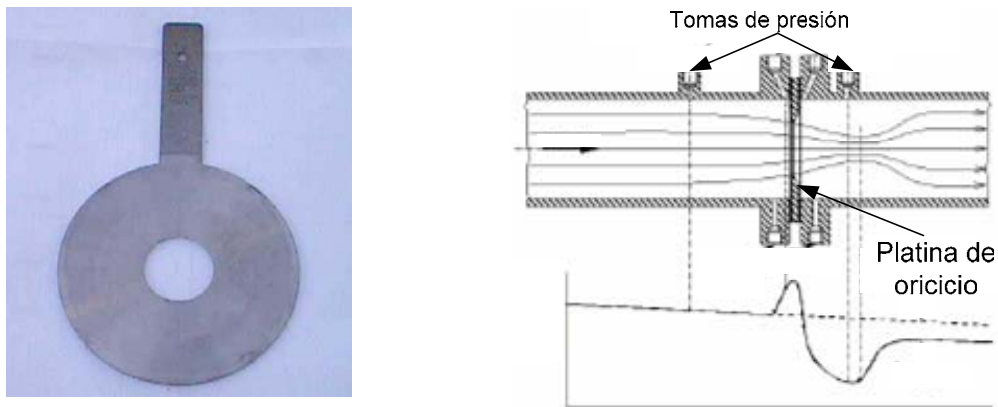
Fuente: Tercer congreso de medición de flujo.

**2.2.2. Medidores de presión diferencial.**

Estos son el tipo más común de medidores utilizados en la medición de caudal. Ellos miden el flujo de fluidos de forma indirecta a través de la determinación de la diferencia de presión producto de la restricción al flujo. Usando un buen dispositivo una medición de presión diferencial puede ser transformada en un caudal. Los medidores de cabeza son generalmente simples, disponibles y ofrecen una mayor

flexibilidad que otros métodos de medición. El medidor de flujo tipo cabeza consta de dos componentes principales: el dispositivo primario y dispositivo secundario. El dispositivo primario es localizado en la tubería para restringir el flujo y desarrollar una diferencia de presión. El dispositivo secundario mide el diferencial de presión y provee una señal al sistema de control. El dispositivo primario puede ser seleccionado por compatibilidad con el fluido específico o la aplicación y el dispositivo secundario puede ser seleccionado por el tipo de recepción de señal. Entre estos dispositivos se encuentran: las platinas de orificio, boquillas, tubos Venturi, tubos Pitot, los rotámetros, medidores tipo codo, etc. Una de las ventajas de estos medidores es que no requieren de una calibración en laboratorio pues el coeficiente de descarga puede calcularse mediante relaciones empíricas, siempre y cuando su instalación cumpla con la normatividad respectiva.

**Figura 12. Platina de orificio (izquierda); Instalación de una platina de orificio (derecha).**



Fuente: Tercer congreso de medición de flujo.

### 2.2.3. Medidores de velocidad.

Cuando se usa la velocidad para la medición del caudal, un dispositivo primario genera una señal proporcional a la velocidad del fluido. Este tipo de medidores son usualmente menos sensibles que los medidores de cabeza al perfil de velocidad, algunos de ellos no generan grandes interferencias en el flujo del fluido, y gracias a

que ellos proveen una señal lineal de salida con respecto al flujo, no necesitan relacionarse con la raíz cuadrada del diferencial de presión. Esto elimina las potenciales inexactitudes relacionadas con la extracción de la raíz cuadrada y justifica el mayor rango de aplicación en comparación con los medidores de cabeza. Entre estos se encuentran: medidor de turbina, flujómetro electromagnético, medidor ultrasónico.

**Figura 13. Medidor ultrasónico.**



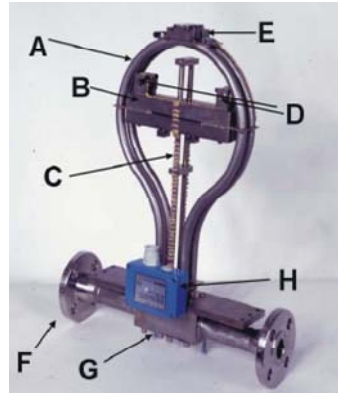
Fuente: [www.eesiflo.com](http://www.eesiflo.com)

#### **2.2.4. Medidores másicos.**

Estos medidores miden directamente el caudal másico a diferencia de los anteriores en los que se mide el caudal volumétrico. Cada medidor másico combina esencialmente 2 dispositivos, uno para medir la velocidad del fluido y el otro para medir la densidad. Estas dos entradas son típicamente combinadas en un microprocesador para proveer una salida en la que se indique el caudal másico. Existen otros medidores que miden la masa de flujo sin intermediación del cálculo de la densidad y del volumen, entre ellos: medidores térmicos y de coriolis.

**Figura 14. Medidor de Coriolis.**

- A – Tubos de medida
- B – Masas de inercia
- C – Barras de torsión
- D – Bobinas motrices
- E – Bobinas sensoras
- F – Bridas de conexión
- G – Bloque de conexión
- H – Caja de interconexión



Fuente: paper "Rheonik brochure"

En todo sistema de medición existe siempre un error, lo que hace necesario la existencia de un método que pueda estimar su dimensión y corregirlo. Si observamos detalladamente la placa de identificación de un elemento medidor de flujo, encontraremos un factor de calibración también llamado constante hidráulica que debe ser evaluada y corregida dado el caso, después de determinado tiempo. Esto requiere de una calibración, la cual puede realizarse "en situ" a través de provers o en laboratorios fijos. En el próximo capítulo se dará una explicación más detallada de los sistemas de calibración.

## CAPÍTULO 3

### PATRONES DE CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO DE LÍQUIDOS.

#### 3.1. CALIBRACIÓN.

Calibración se define como el conjunto de operaciones que establecen bajo condiciones especificadas, la relación entre los valores indicados por un aparato o sistema de medición o los valores representados por una medida materializada y los valores correspondientes de la magnitud realizada por los patrones. La calibración y todos los conceptos asociados a ésta, han sido determinados a lo largo de los años por los organismos metrológicos y de normalización internacionales. En el esquema de la figura 15 se resume la interrelación de diversos conceptos asociados al aseguramiento metrológico.

En síntesis, la calibración se ve afectada por varios elementos:

- El principio de medición es el fundamento científico usado para realizar una medición. El conocimiento del principio de medición permite al metrólogo dominar la medición, esto es, modificarla, diseñar otra, evaluar su conveniencia, etc., además es indispensable para estimar la incertidumbre de la medición.
- El método y el procedimiento de medición son descripciones de la manera de llevar a cabo la medición, con la diferencia en que el procedimiento es más

específico y detallado. En ellas se encuentran establecidas las condiciones ambientales a las cuales se deben realizar las pruebas.

El principio, el método y el procedimiento de medición son determinantes en el valor de la incertidumbre de la medición. Un conocimiento insuficiente de ellos muy probablemente conducirá a una estimación equivocada, o incompleta en el mejor de los casos, de la incertidumbre de la medición.

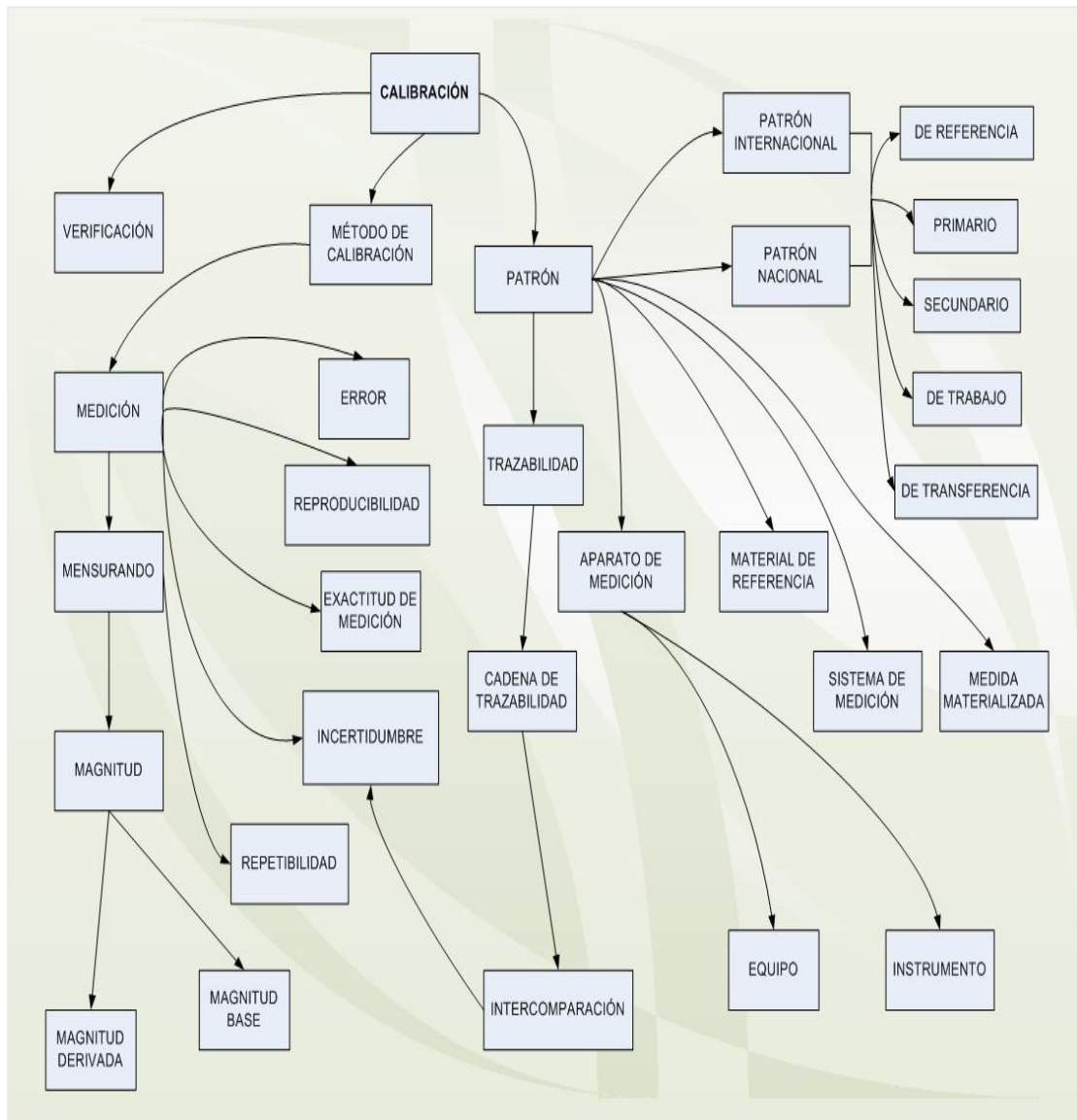
- El Instrumento que pueden ser un equipo de medición, un sistema de medición, un dispositivo de medición, un material de referencia, un patrón o medida materializada.
- El Patrón, el cual se define como “Medida materializada, instrumento de medición, material de referencia o sistema de medición destinado a definir, realizar, conservar o reproducir una unidad o uno o varios valores de una magnitud, para que sirvan de referencia” y pueden ser primarios, secundarios, de referencia, de transferencia y de trabajo.

Los beneficios de la calibración se ven representados en:

- Disminución de costos: Por la cuantificación precisa de los recursos que se utilizan en los procesos industriales y la correcta medición de flujo en procesos de transferencia de custodia.
- Repetibilidad del proceso: La calibración de los instrumentos se puede ver alterada por muchos factores. Este cambio en la calibración provoca variaciones en la calidad del producto o servicio, variaciones que ser advertidos mediante rutinas de calibración de los instrumentos, protegiendo así la repetibilidad del proceso.

- Intercambio de instrumentos: Mantener la calibración de los instrumentos asegura la posibilidad de reemplazarlos por falla o actualización tecnológica, sin afectar el funcionamiento normal de su proceso.
  
- Incremento del tiempo efectivo de producción: El programa de calibración contribuye a incrementar no solo los tiempos efectivos de producción mediante la predicción y la prevención, además permitirá descubrir problemas de instrumentación antes de que causen una falla completa.
  
- Cumplimiento del sistema de Gestión de calidad (SGC): Según las normas de calidad como la ISO 9000 y la ISO 17025 (específica para laboratorios de calibración y ensayos) la calibración cubre un aspecto muy importante para dar validez a los resultados que son emitidos y en general para dar credibilidad y confiabilidad a sus procesos.

**Figura 15. Conceptos relativos a la calibración.**



Fuente: El autor

### 3.2. PATRONES PARA LA CALIBRACIÓN.

Hoy en día, las mediciones de flujo de líquido se realizan con medidores de flujo de diferentes principios de medición como son los de desplazamiento positivo (medidores tipo pistón rotativo, lóbulos, etc.) o de inferencia (turbinas, másicos,

ultrasónicos, etc.). Ahora, considerando que en todo sistema siempre existe un error, es necesario que exista un método que pueda estimarla y corregirla.

En medición de flujo, no existen dispositivos patrones o artefactos que físicamente reproduzcan directamente la magnitud en cuestión, a diferencia de las mediciones de longitud o masa. Por tal motivo, los patrones de flujo deben derivarse a partir de mediciones relacionadas a patrones de magnitudes fundamentales, como longitud, masa y tiempo. Esto se logra mediante la recolección de un fluido bajo condiciones de estado estacionario y propiedades constantes, durante un intervalo de tiempo medido, cuantificando propiedades como temperatura y presión, trazables a patrones establecidos.

### **3.2.1. Patrones primarios.**

Patrón primario se define como “aquel que posee las más altas cualidades metrológicas, y cuyo valor se acepta sin referenciarlo a otros patrones de la misma magnitud”. El concepto de patrón primario es válido tanto para las magnitudes básicas como para las derivadas<sup>1</sup>.

Entre los patrones primarios para la calibración de medidores de flujo de líquidos se destacan:

*Provers balísticos:* Los provers o probadores son equipos de medición que se usan para llevar a cabo la calibración de medidores de flujo, sean de tipo turbina o desplazamiento positivo. Una práctica común es instalar estos equipos en forma permanente en las estaciones de medición en poliductos para llevar a cabo la calibración de los equipos de medición de volumen de hidrocarburos con la periodicidad requerida para mantener trazabilidad al patrón nacional y lograr un nivel de incertidumbre adecuado en las mediciones de volumen. Operan usando el

---

<sup>1</sup> Definición tomada del VIM (Vocabulario Internacional de Metrología)

principio de desplazamiento de un volumen de líquido conocido. Este desplazamiento de líquido es realizado por un desplazador que recorre un volumen de tubo calibrado comúnmente referido como “sección de medición del prover”. El movimiento del desplazador es detectado por sensores de posición, los cuales, debido a los últimos avances tecnológicos, han permitido incrementar la resolución de los mismos ( $\pm 0.01\%$ ), incrementando la precisión y repetibilidad del dispositivo. Con la cantidad total del fluido que está siendo medida por el prover, es posible obtener una relación (factor de medición) entre el volumen conocido y el volumen registrado por el medidor de prueba. Este factor de medición es usado como un multiplicador y aplicado al volumen del medidor para determinar la cantidad de fluido real.

En función de los pequeños volúmenes medidos debido a las limitaciones de secciones rectas en el tubo de prueba, se desarrollaron posteriormente, prover con desplazadores tipo esferoide para grandes volúmenes instalados directamente en el sitio del proceso, reduciendo los errores provenientes de las condiciones del laboratorio con respecto a las condiciones en campo.

Sus ventajas principales radican en la calibración del medidor de prueba en tiempos reales de operación, menores tiempos de calibración y flujo continuo a través del medidor durante el período de calibración. Los factores que afectan su desempeño son la velocidad del desplazador (debe estar entre 0.5 ft/s y 10 ft/s), la resolución de los sensores detectores y al integridad del sistema. La repetibilidad es función de la calidad de la calibración del tubo y del desplazador. El tubo debe ser suave y no deben existir fugas alrededor de la esfera en el viaje a través del tubo. Estos equipos deben ser recalibrados en un período de 2 a 5 años, dependiendo del uso y del tipo de tipo de producto que maneje.

Los provers pueden ser unidireccionales, bidireccionales o compactos, siendo estos últimos, más versátiles, transportables y de alta precisión, gracias a su sistema de adquisición de datos de doble cronometría. Algunos diseños permiten calibrar además medidores de vórtice y magnéticos.

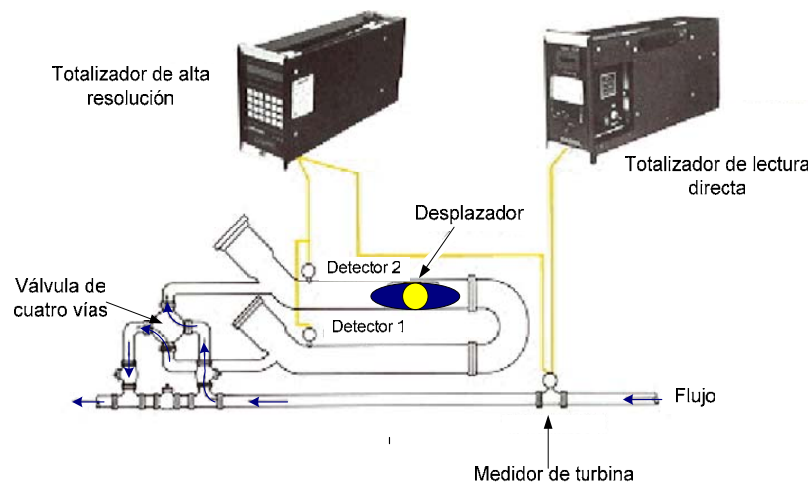
En nuestro país, ECOPETROL utiliza estos equipos para controlar los procesos de transferencia de custodia de petróleo y gasolina.

**Figura 16. Probador bidireccional.**



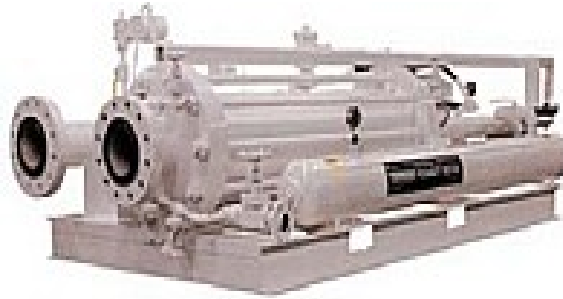
Fuente: [www.emersonprocess.com](http://www.emersonprocess.com)

**Figura 17. Calibración de un medidor de turbina con un probador bidireccional.**



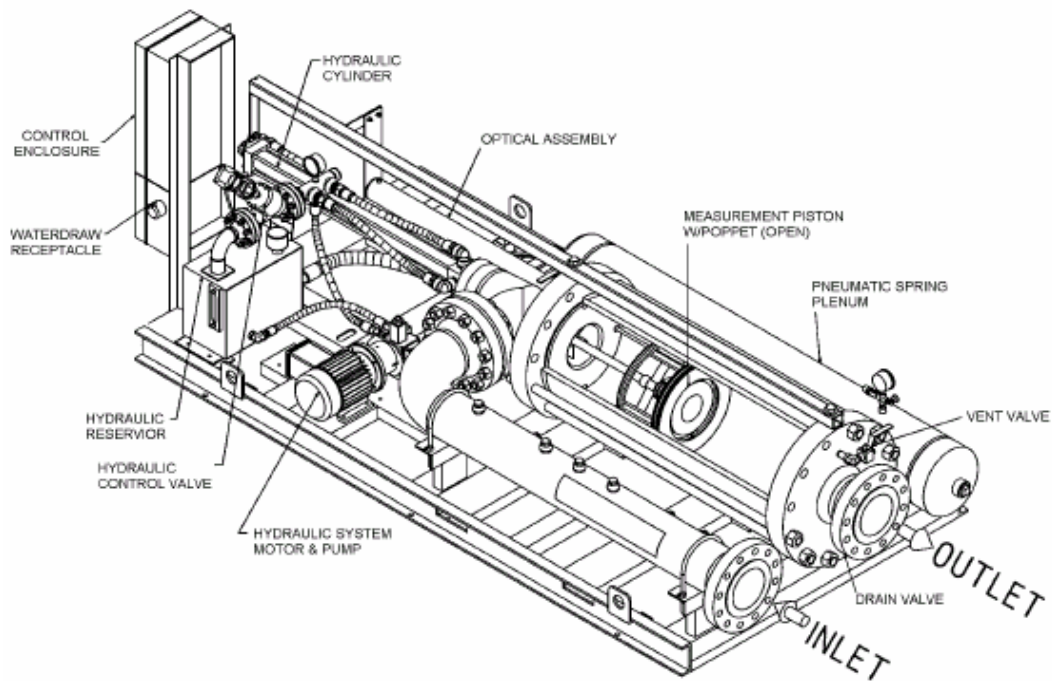
Fuente: [www.emersonprocess.com](http://www.emersonprocess.com)

Figura 18. Probador compacto.



Fuente: [www.emersonprocess.com](http://www.emersonprocess.com)

Figura 19. Diagrama de un probador compacto.



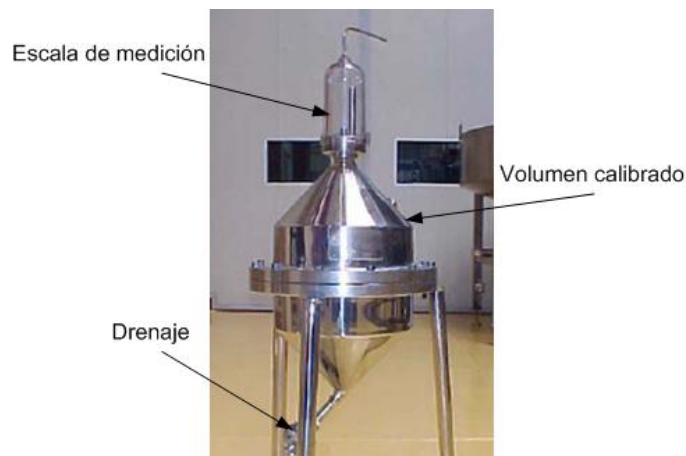
Fuente: [www.emersonprocess.com](http://www.emersonprocess.com)

*Sistemas de calibración por el método gravimétrico y volumétrico:* Son instalaciones de alta precisión donde se brindan óptimas condiciones para la calibración de los medidores de flujo. El método de calibración puede ser gravimétrico o volumétrico. Con el método gravimétrico, el caudal es determinado a través de una relación matemática conociendo las variables de masa, tiempo y temperatura. La masa es determinada por balanzas que registran el peso de un tanque en donde se colecta el

fluido durante un período de tiempo. El método volumétrico implica tanques aforados (serafín, figura 20) que indican directamente la cantidad de fluido colectado en este. La norma ISO 4185 (Measurement of liquid flow in closed conduit – Weighing method) y la norma ISO 8316 (Measurement of liquid flow in closed conduit –method by collection of the liquid in a volumetric tank), especifican las características y los requisitos básicos de cada uno de los métodos.

La característica más significativa del método volumétrico es la utilización de serafines, los cuales varían de tamaño dependiendo de la capacidad requerida. Comercialmente se encuentran serafines de 1; 5; 10; 25; 50; 100; 200; 500; 1000 y 1500 galones. Estos tanques aforados son calibrados en intervalos de tiempo superiores a los especificados por las balanzas de alta presión exigidas por el método gravimétrico. Los rangos de caudal en los bancos que utilicen este método, dependen de la cantidad y capacidad de serafines que tengan a disposición, los cuales deben encontrarse bajo condiciones controladas.

**Figura 20. Serafín de 20 litros**



Fuente: Tercer congreso de medición de flujo

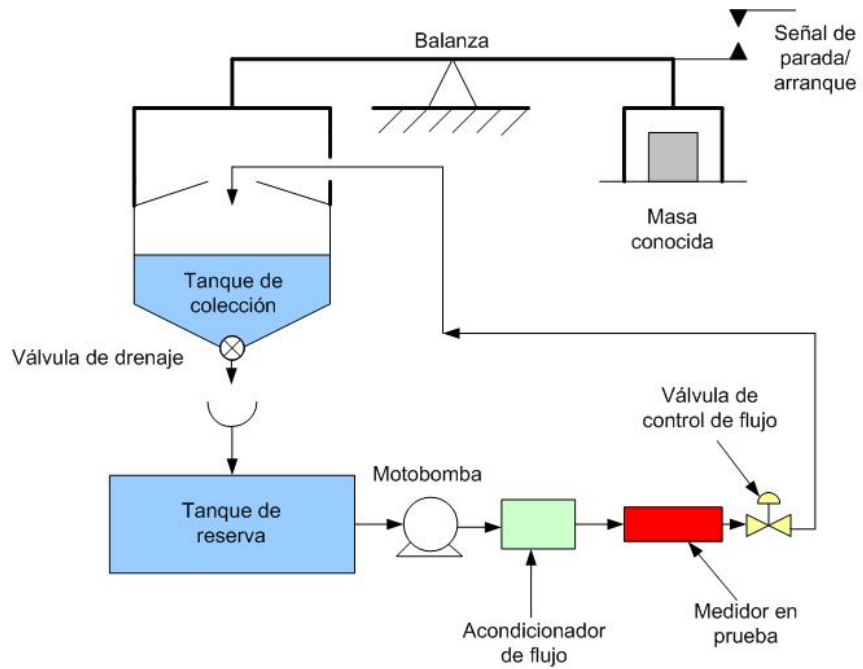
El método gravimétrico entretanto, tiene la ventaja de ofrecer mayor precisión en la medición debido a la alta resolución que se puede conseguir con la balanza. La

medición del caudal con este método se puede realizar utilizando el principio dinámico, explicado a continuación, o el principio estático, utilizado para el diseño del banco, el cual se detallará en el próximo capítulo.

*El sistema gravimétrico dinámico* está compuesto generalmente por un circuito hidráulico, un cronómetro y una balanza acoplada con un tanque de colección. La medición de flujo se inicia, según el esquema mostrado en la figura 21, cuando cierta masa predeterminada inicial es colocada al otro extremo de la balanza y la válvula de drenaje es cerrada. Cuando la masa del tanque y el líquido colectado causan el balance, una señal activa un cronómetro. Mientras el tanque es llenado, se incrementa la masa en el lado opuesto de la balanza. Cuando la masa en el tanque iguala la masa predeterminada final, una señal detiene el cronómetro. El caudal es determinado por relaciones matemáticas.

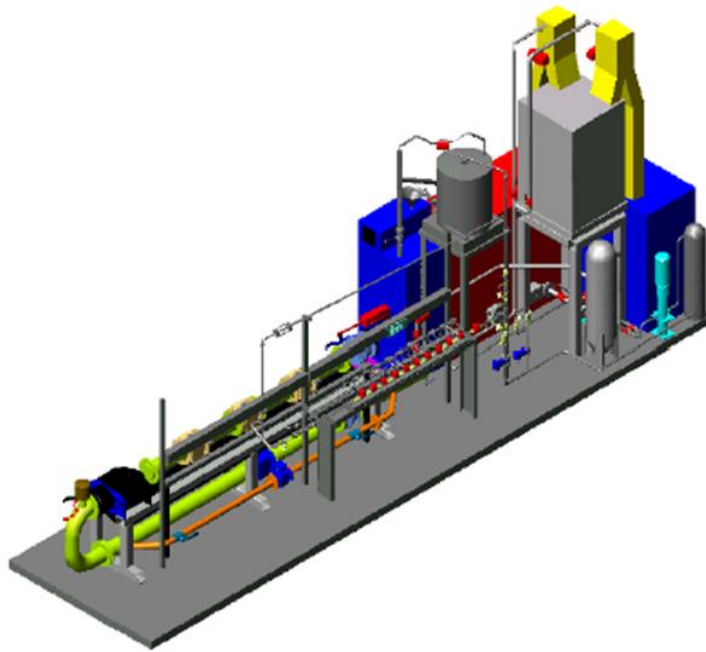
Un análisis por este sistema brinda incertidumbres en el orden de 0,1%. La precisión es determinada por la precisión de la balanza y de los mecanismos electrónicos de medición del tiempo. Su desempeño se ve afectado por cambios en la fuerza de impacto en el tanque de colección, por las ondas que se producen dentro del tanque y por los cambios en el tiempo de actuación de la balanza debido a las diferencias en masas en las condiciones de arranque y parada. Por esta razón, el método es normalmente usado para bajos caudales (menores de 10 galones/minuto). Se utiliza para calibrar principalmente medidores que generan pulsos en el fluido, como lo son los de desplazamiento positivo y coriolis.

Figura 21. Diagrama de una instalación por el sistema gravimétrico dinámico.



Fuente: El autor

Figura 22. Modelamiento de una instalación de un banco por el sistema gravimétrico estático.



Fuente: [www.tepsa.ee](http://www.tepsa.ee)

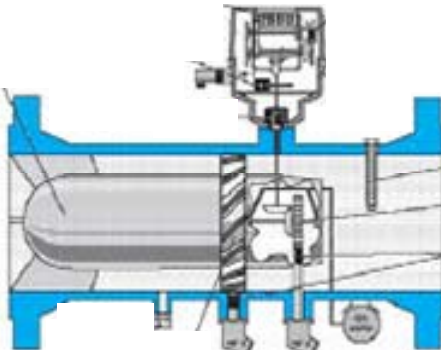
### 3.2.2. Patrones secundarios.

Según la VIM, se define como “Patrón cuyo valor se establece por comparación con un patrón primario de la misma magnitud”. En otras palabras, un patrón secundario es un medidor que al ser verificado y calibrado previamente por un patrón primario, presenta porcentajes de error e incertidumbre bastante bajos y que por lo tanto, puede utilizarse como patrón de calibrar otros instrumentos de medición. Ejemplo de ello son los medidores tipo turbina.

*Patrones tipo turbina.* Están catalogados como medidores de velocidad. En ellos, la velocidad del rotor se incrementa linealmente con la velocidad de flujo; es decir, estos medidores producen una frecuencia proporcional a la velocidad del fluido en la tubería a diferencia de los medidores de desplazamiento positivo que producen un pulso por unidad de volumen. La rotación de las turbinas es una medida de la velocidad y se detecta por medio de sensores magnéticos externos o por medio de engranajes, apareciendo la lectura en  $\text{ft}^3$  o en  $\text{m}^3$ , en un contador montado en la parte externa del medidor. Este tipo de medidor puede ser considerado un estándar para calibrar por transferencia medidores de flujo del tipo rotatorio, turbina y vórtice. Ver figura 23.

El funcionamiento de este tipo de medidores a bajas velocidades se ve influenciado por el perfil de velocidad, la fricción a lo largo de las turbinas, fricción en los cojinetes y otros pares de torsión retardantes. El medidor de turbina es utilizado en medición de flujo de gases y líquidos limpios, con un amplio rango de flujo.

Figura 23. Medidor de turbina (izquierda); Corte transversal (derecha).



Fuente: [www.rockwin.com](http://www.rockwin.com)

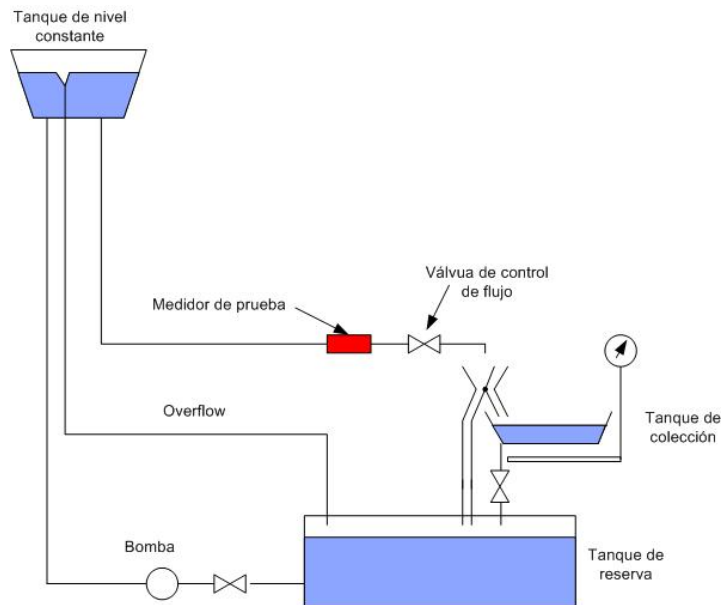
## CAPÍTULO 4

### MEDICIÓN DE FLUJO DE LÍQUIDOS POR EL MÉTODO GRAVIMÉTRICO ESTÁTICO.<sup>2</sup>

#### 4.1. PRINCIPIO.

Método en el cual la masa neta del líquido colectado en un intervalo de tiempo determinado, es deducido de la diferencia entre el peso del tanque de colección antes y después de la prueba. Las figuras 24, 25 y 26, muestran algunas instalaciones típicas.

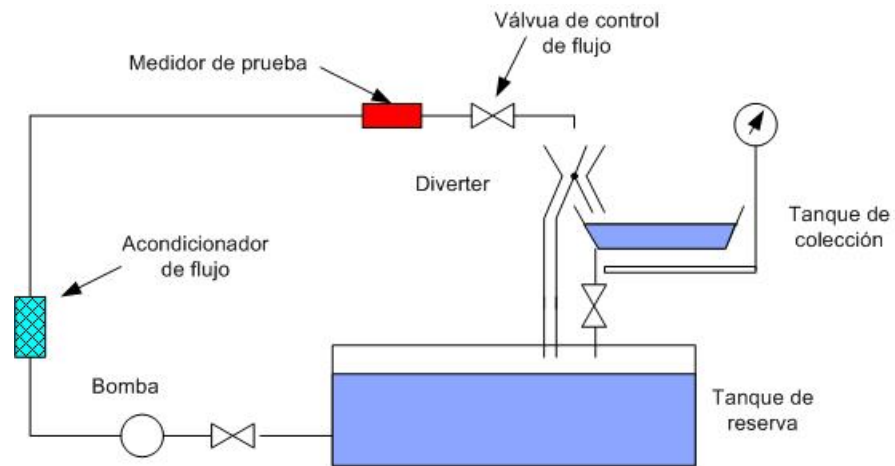
**Figura 24. Diagrama de una instalación para calibración por el método gravimétrico estático usando un tanque de nivel constante.**



Fuente: El autor

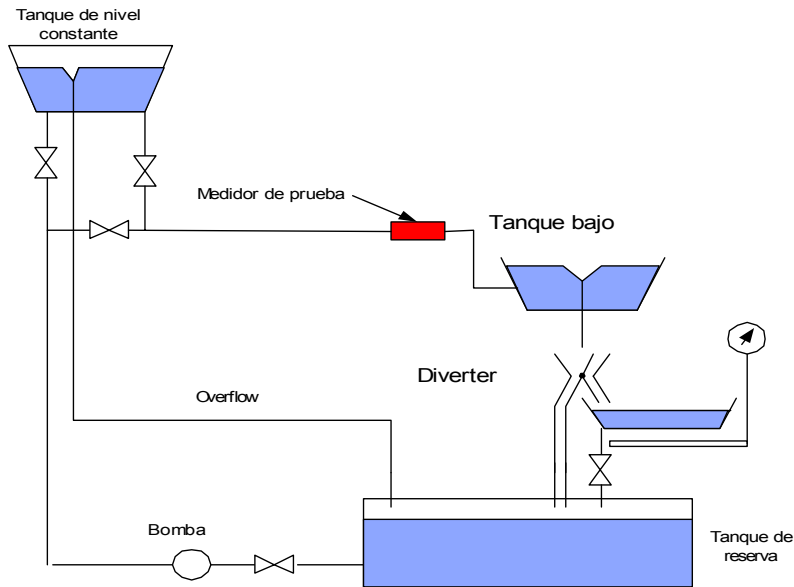
<sup>2</sup> Parte de este documento es basado en la norma ASME MFC-9M

**Figura 25. Diagrama de una instalación para calibración por el método gravimétrico estático suministro directo de bombas.**



Fuente: El autor

**Figura 26. Diagrama de una instalación para medición del caudal por el método gravimétrico estático usando un tanque para nivel constante.**



Fuente: El autor

El principio de este método se basa en:

- a. Determinar la masa inicial del tanque más cualquier líquido residual.

- b. Desviar el flujo al tanque de pesaje (hasta que sea considerado contener una suficiente cantidad de agua para lograr la precisión deseada) por el diverter el cual activa un contador para cronometrar el tiempo de llenado.
- c. Determinar la masa final del tanque más el líquido colectado.

## **4.2. PRECISIÓN DEL MÉTODO.**

Es el método más apetecido por los estándares internacionales para la calibración de medidores de flujo por brindar alta precisión en la medición e incertidumbres hasta de  $\pm 0,1$  % cuando la instalación es cuidadosamente construida, mantenida y usada.

### **4.2.1. Requisitos.**

El método gravimétrico brinda una alta precisión en la medición de rata de flujo si:

- a. No subsisten fugas en el circuito.
- b. No exista acumulación de líquido en el circuito por contracción o expansión térmica.
- c. Se efectúa la corrección correspondiente por la influencia de peso aparente.
- d. Los mecanismos de pesaje, cronómetro y el método de arranque y parada satisfagan con la precisión necesaria.
- e. El tiempo requerido para que el diverter atravesase el chorro sea pequeño con respecto al tiempo de llenado.

- f. El cronómetro es iniciado y detenido cuando el diverter pasa por la línea central del chorro.

### **4.3. COMPONENTES PRINCIPALES.**

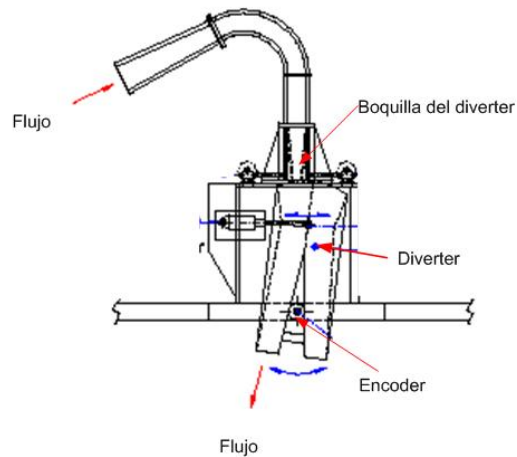
#### **4.3.1. Diverter.**

Los desviadores de flujo de fluidos conocidos como diverter, son elementos esenciales en los bancos de medición de flujo de líquidos. El efecto del error producido por el diverter, especialmente en bancos de calibración de alta precisión, es una parte crítica en la medición final de la incertidumbre; por lo tanto, al planear la construcción de un banco patrón para la calibración de medidores de flujo de líquidos, es necesario un adecuado y cuidadoso diseño del diverter. Teniendo en cuenta este aspecto, el presente proyecto, ha desarrollado un modelo basado en un dispositivo diseñado, construido e instalado en el banco de calibración de flujo de agua del Physikalisch Technische Bundesanstalt (PTB) en Braunschweig, Alemania.

El diverter es un mecanismo móvil usado para direccionar alternativamente el flujo a lo largo de un curso normal o hacia un tanque aforado o de pesaje. Puede ser elaborado con un conducto o canal móvil, o en mejores casos, por una placa desviadora pivotada alrededor de una flecha vertical u horizontal.

El movimiento del diverter deberá ser lo suficientemente rápido al atravesar la lámina de líquido (chorro) formada a la salida de la boquilla, con el fin reducir la posibilidad de encontrar un error significativo durante la medición del tiempo de llenado. La caída de presión en la boquilla no debe exceder los 20 kPa (3 psi) para evitar el splash o salpicadura, filtración de aire y turbulencias en el tanque aforado o de pesaje. El movimiento del diverter puede ser generado por mecanismos eléctricos o mecánicos (Ej: actuadores eléctricos o neumáticos). El diverter no debe influir de ninguna manera el flujo del circuito durante alguna fase del proceso de medición.

**Figura 27. Ejemplo de diverter.**



Fuente: El autor

A continuación se describirá el principio de funcionamiento de una válvula diverter<sup>3</sup>:

La figura 28 muestra un diagrama típico de la historia de desviación del flujo al tanque de colección el ciclo de calibración. La absisa muestra el tiempo transcurrido y la ordenada el flujo instantáneo desviado al tanque de colección,  $Q_C$ . El caudal de by-pass es representado por  $Q_B$ .

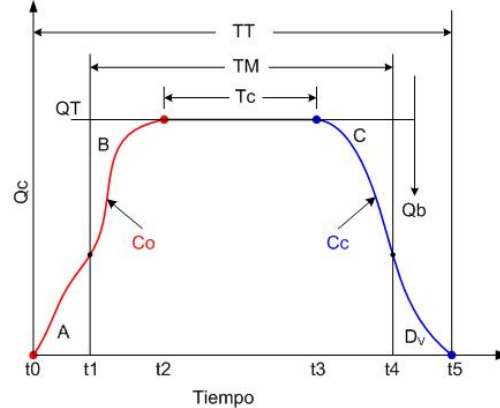
En cualquier momento durante la desviación, el flujo de calibración total ( $Q_T$ ) es la suma del flujo colectado y el flujo de by-pass:

$$Q_T = Q_C + Q_B \quad \text{Ecuación 17}$$

---

<sup>3</sup> Basado en el paper "Error free liquid flow diverters for calibration facilities", Yeh, T.

**Figura 28. Líquido de flujo colectado en función del tiempo.**



Fuente: El autor

Un ciclo de calibración puede ser separado en tres distintos períodos:

1. Período de arranque, ( $t_0 < t < t_3$ )
2. Período de flujo constante, ( $t_2 < t < t_3$ )
3. Período de cierre, ( $t_3 \leq t \leq t_5$ )

El instante  $t_0$  es el inicio del período de arranque y denota el instante en el cual el mecanismo del diverter es activado. Durante este período, la válvula diverter redirecciona el chorro de líquido de la línea de by-pass al tanque de colección. Como resultado, el flujo colectado pasa de cero a  $Q_T$ . El tiempo  $t_1$  indica el instante en que se activa el cronómetro. El instante  $t_2$  indica el final del período de arranque. Para este momento ya se encuentra totalmente redireccionado el flujo de líquido al tanque de colección, entonces  $Q_c = Q_T$ . El flujo colectado  $Q_c$  durante este período es mostrado por la curva  $C_o$ .

Durante el período de cierre, el diverter redirecciona el chorro del tanque de colección de regreso a la línea de by-pass, consiguiendo que el flujo en el tanque de

colección pase de  $Q_T$  a cero. La curva  $C_C$  muestra el período de transición durante el período de cierre. El cronómetro se detiene en el instante  $t_4$ .

La masa total del líquido colectado en el tanque,  $M_M$ , es dado por la integral del flujo colectado  $Q_C$  con respecto al tiempo, en el intervalo de  $t_0$  a  $t_5$ :

$$\frac{M_M}{\rho} = \int_{t_0}^{t_5} Q_C dt = A + Q_T(t_4 - t_1) - B - C + D \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde,  $A$  representa la cantidad total de líquido extra colectado desviado desde el by-pass al tanque de colección antes de la activación del cronómetro en el tiempo  $t_1$ , durante el período de arranque. Esta representada por la expresión:

$$A = \int_{t_0}^{t_1} Q_C dt \quad \text{Ecuación 19}$$

$B$  representa el déficit de líquido colectado durante el tiempo de medición, entonces:

$$B = \int_{t_1}^{t_2} (Q_T - Q_C) dt = \int_{t_1}^{t_2} Q_B dt \quad \text{Ecuación 20}$$

Durante el período de cierre, el volumen del líquido desviado del tanque de colección ( $C$ ) antes de detener el cronómetro en el instante  $t_4$ , es dado por la expresión:

$$C = \int_{t_3}^{t_4} (Q_T - Q_C) dt = \int_{t_3}^{t_4} Q_B dt \quad \text{Ecuación 21}$$

Y el volumen extra colectado ( $D_V$ ) después del instante  $t_4$  es:

$$D_V = \int_{t_4}^{t_5} Q_C dt \quad \text{Ecuación 22}$$

El tiempo de colección,  $t_M = t_4 - t_1$ , es el tiempo medido entre el arranque y parada del cronómetro. El tiempo efectivo de colección es defino como:

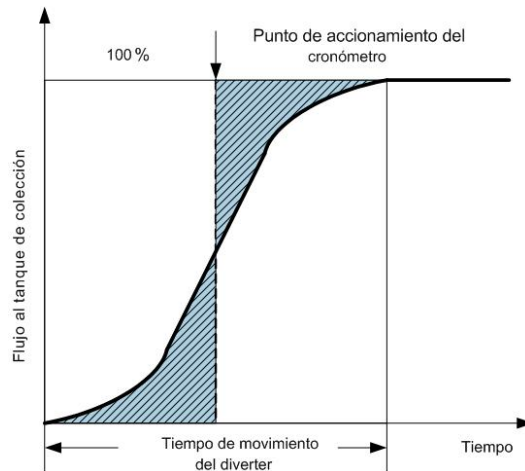
$$t_{eff} = \frac{V}{Q_T} = t_M + \frac{(A + D_V - B - C)}{Q_T} \quad \text{Ecuación 23}$$

Para un caso ideal, la figura 29 ilustra la regla de operación del diverter, en la cual, la variación de la rata de flujo en ambos lados de la gráfica es igual:

$$\begin{aligned} A &= B \\ C &= D_V \end{aligned} \quad \text{Ecuación 24}$$

En la realidad, estos dos grupos de volúmenes no se pueden hacer iguales, lo que genera un error en el diverter. Este aspecto será tratado con más profundidad en el capítulo 5.

**Figura 29. Regla de operación del diverter**



Fuente: El autor

#### 4.3.2. Sistemas de medición del tiempo.

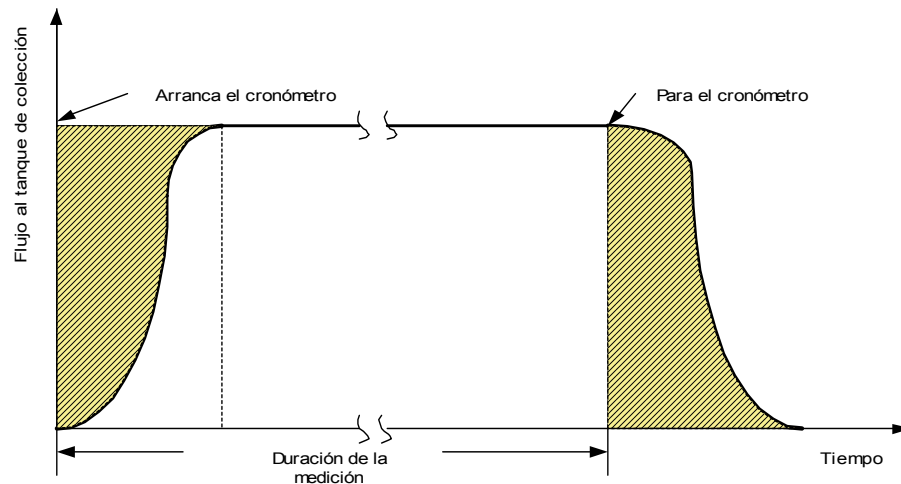
El tiempo de descarga dentro del tanque de pesaje es normalmente medido con un contador electrónico con un preciso sistema de referencia, por ejemplo, un cristal de cuarzo. El error provocado por esta fuente puede ser despreciable si la resolución del contador es suficientemente alta. El proceso de activación y parada fue explicado en el párrafo anterior.

El punto de activación y parada del cronómetro juega un papel muy importante durante el ciclo de calibración. En la práctica, es generalmente aceptado que este punto corresponda a la posición media del chorro generando un error que será insignificante siempre y cuando, el tiempo que demora el diverter en atravesar el chorro, sea despreciable en comparación con el período de desviación al tanque.

Otra opción es arrancar y detener el cronómetro en el instante cuando el diverter inicia su movimiento en cada dirección. Esta opción solo es válida si la regla de operación del diverter es idéntica en ambas direcciones.

Análisis experimentales realizados en el laboratorio Engistrel Engematic Instrumentação Ltda, en Brasil, demuestran que no existe diferencia apreciable en el desempeño del diverter por la utilización de cualquiera de las dos alternativas<sup>4</sup>.

**Figura 30. La regla de operación del diverter es igual en ambas direcciones**



Fuente: El autor.

<sup>4</sup> Tomado de "Segundo Simposio Brasileiro de Medição de Flujo", 1995

### 4.3.3. Línea de calibración.

En la práctica, los medidores de flujo son usualmente instalados en líneas inapropiadas donde el flujo no es desarrollado totalmente y están sujetos a remolinos significativos, produciendo errores en la medición. Para su calibración es necesario instalarlos en líneas libre de remolinos, flujo secundario, recirculación, picos en la tubería o reducciones que produzcan distorsiones en el perfil de velocidad. Las distorsiones se pueden agrupar en dos categorías: aquellas donde se distorsiona el perfil pero producen pequeños remolinos y aquellas donde tanto como las distorsiones y los remolinos son grandes.

Un flujo totalmente desarrollado, axisimétrico y libre de remolinos y pulsaciones son conseguidos adicionando tubería recta aguas arriba y aguas abajo del medidor según la recomendación de la norma ISO 5167 (Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full - Part 1: General principles and requirements) para medidores de presión diferencial y la norma API 5-3 (Measurement of liquid hydrocarbons by turbine meters) para medidores de turbina. En vista que el proyecto se enfoca es en la calibración de medidores de turbina, se tomó esta última norma como base para el diseño del banco.

La norma ISO 5167 define un flujo satisfactorio como aquel flujo que presenta remolinos con un ángulo inferior a  $2^\circ$  y que la relación entre velocidad axial en cualquier punto de una determinada sección del flujo y la velocidad axial máxima en esa sección esté dentro del 5% correspondiente a la relación entre el flujo totalmente desarrollado medido en el mismo tubo 100 diámetros después de flujo desarrollado.

La norma API 5-3 define los criterios de aplicación y recomendaciones para la medición de líquidos, instalación, desempeño, operación y mantenimiento de los medidores de turbina.

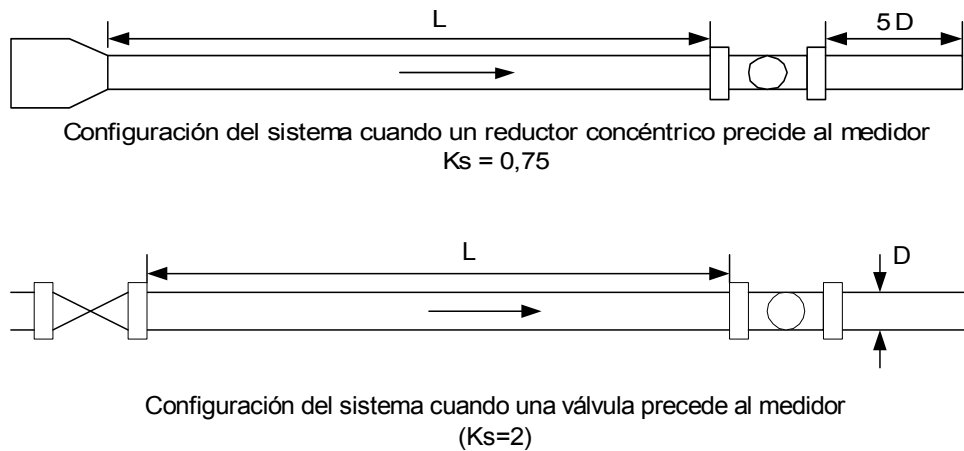
Para su instalación la longitud de tubería recta aguas arriba se calculan con la siguiente ecuación:

$$L = \frac{0.35 * D * K_s}{f} \quad \text{Ecuación 25}$$

Donde L (pies); D (pies);  $K_s$  (Relación remolinos/velocidad, adimensional)

La tubería aguas abajo del medidor corresponde a 5 veces el diámetro nominal del medidor.

**Figura 31. Factor  $K_s$ .**



Fuente: El autor

Otra opción de atenuar los disturbios y mejorar las condiciones del flujo aguas arriba del medidor es utilizando rectificador y/o acondicionadores de flujo. Un rectificador de flujo es un mecanismo el cual elimina los remolinos del flujo, pero tiene poco o ningún efecto en los perfiles de velocidad. Un acondicionador de flujo, por otra parte, es un mecanismo que no solo elimina los remolinos sino que produce un adecuado perfil a la salida del mismo.

#### 4.3.4. Tanque de colección.

El tanque de pesaje deberá tener la suficiente capacidad con el fin de que el error por cronometraje sea despreciable. Según norma, el tiempo de llenado para altos caudales será un mínimo de 30 segundos.

El tanque puede ser de cualquier forma pero es esencial que no presente fugas y/o exista derrame líquido. Se le pueden acondicionar baffles internos para reducir las oscilaciones del líquido y mejorar su rigidez.

El tanque puede ser suspendido por mecanismos de pesaje o puede ser colocado en una plataforma. Para prevenir el deterioro por sobrecargas en los mecanismos de pesaje, se pueden utilizar mecanismos de seguridad.

El drenado del tanque debe ser lo suficientemente alto como para evacuar el tanque en un intervalo corto de tiempo, se puede realizar de diferentes maneras:

- Con una válvula en la base o,
- Adaptar un sifón o,
- Utilizar una bomba sumergible.

En todos los casos es necesario chequear cuidadosamente que no exista conexión de tuberías o cables eléctricos que transmitan esfuerzos entre el tanque de pesaje y las partes de la instalación; las conexiones indispensables serán extremadamente flexibles y esa flexibilidad deberá ser verificada al calibrar los mecanismos de pesaje.

#### **4.3.5. Mecanismos de pesaje**

Los mecanismos de pesaje pueden ser de muchos tipos, ya sea mecánicos o por celdas de cargas, suministrados con requerimientos de sensibilidad, precisión y confiabilidad. Estos sistemas deben ser calibrados después de su instalación en el banco de pruebas. Así mismo, deben ser mantenidos y periódicamente chequeados.

## CAPÍTULO 5

### BANCO DE CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO DE LÍQUIDOS POR EL MÉTODO GRAVIMÉTRICO ESTÁTICO.

#### 5.1. SELECCIÓN DEL MÉTODO.

Teniendo en cuenta las necesidades por las cuales se inició el proceso de diseño del banco y contemplando las posibilidades existentes, el método gravimétrico estático es el más conveniente porque:

- Ofrece mayor variedad de alternativas de instalación. Teniendo en cuenta factores económicos y rangos de caudal, fue seleccionado el sistema que suministra el flujo a la línea de calibración directamente de las bombas.
- El método es de alta precisión y se pueden conseguir incertidumbres inferiores a  $\pm 0,1$  %.
- Goza de preferencia por los estándares internacionales. Este método es utilizado en laboratorios como el PTB de Alemania, NIST de Estados Unidos, CENAM de México e IPT de Brasil entre los más importantes.
- En comparación con el método volumétrico, requiere de menor área para el almacenamiento de equipos y accesorios.

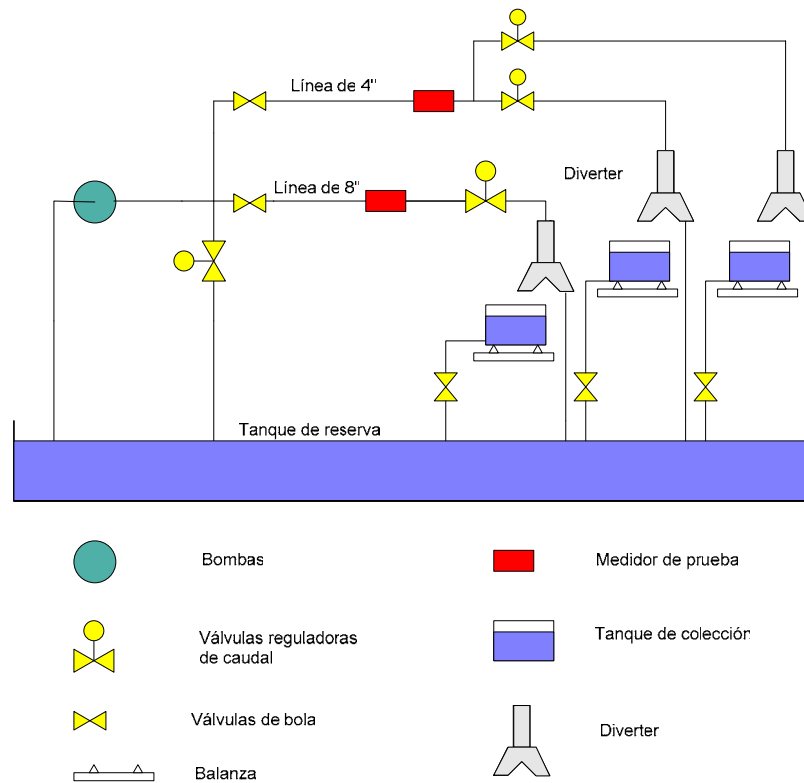
- Los mecanismos de pesaje no presentan partes móviles que puedan afectar la medición durante el ciclo de calibración.
- Permite calibrar medidores de turbina, los cuales en el sector petrolero corresponden a la mayoría del total de medidores usados, según un repote emitido por la empresa ECOPETROL.

## **5.2. DESCRIPCIÓN DEL BANCO DE CALIBRACIÓN.**

El banco de calibración de flujo de líquidos está compuesto de cuatro componentes fundamentales:

- Sistema de generación de flujo: compuesto por las bombas de velocidad constante y el sistema de control de flujo formado por las válvulas reguladoras de caudal.
- Línea de calibración: es el sistema de tubería dispuesta para el acondicionamiento del flujo y donde se incorpora el medidor a calibrar.
- Sistema de referencia: compuesto por las balanzas de precisión, tanques de colección y mecanismos de direccionamiento (diverter).
- Sistema de control y adquisición de datos: Aquí se incluyen los sensores y equipos necesarios para el control de variables y procesamiento de datos.

Figura 32. Diagrama del banco de calibración.



Fuente: El autor

El banco es un sistema de flujo cerrado que estará compuesto por un tanque de almacenamiento dotado en su interior de baffles para atenuar el movimiento del agua; un sistema de bombeo para circular agua desde el tanque de reserva hasta el circuito, el cual se divide en dos líneas principales de tubería, con diámetros de 4" (línea 1) y 8" (línea 2); adicionalmente existe una línea común de bypass con un diámetro de 8". Cada una de estas líneas estaría dotada de una válvula reguladora de caudal, controlada neumáticamente y dotada de un sensor de posición.

Las líneas de calibración estarán provistas de una longitud de tubería recta aguas arriba, la cual garantiza un flujo simétrico y libre de remolinos, aguas abajo del medidor. Aguas abajo de la válvula reguladora de caudal de las líneas principales, se encontrará un accesorio diseñado para permitir la transición de tubería circular a

rectangular, llamado “cola de pescado” (ver figura 38). Un tubo telescópico es implementado para compensar diferentes tamaños en los medidores.

El banco estará dotado de una válvula diverter en cada línea, la cual durante el período de calibración direcciona el flujo hacia el tanque de colección o hacia el tanque de reserva.

La línea de 4”, presentará una ramificación de 1”, dotada igualmente de una válvula de control de flujo, para regular los caudales más pequeños. Esta línea cumple con todas las características expuestas anteriormente.

Se utilizarán tres tanques de colección, uno por cada diverter, descansando sobre los mecanismos de pesaje.

### **5.3. DISEÑO DEL BANCO.**

Como herramienta CAD para el dibujo de los elementos y del banco mismo, se utilizó el software SOLID EDGE Versión 10, de la compañía CREAR 3D.

#### **5.3.1. Diverter.**

Exceptuando los patrones de masa o volumen, el diverter es el componente más importante en el banco de pruebas de flujo debido a la precisión requerida en el proceso de calibración. Tomando como referencia la norma ISO 4185 (Measurement of liquid flow in closed conduits - weighing methods) y el diverter construido en el PTB, se determinaron los requerimientos y parámetros básicos para su diseño, los cuales son mostrados en la siguiente tabla.

**Tabla 1. Requerimientos del diverter.**

Parámetro	Requerimientos
Relación entre espesor y longitud del chorro a la salida de la boquilla**	15 a 50
Caída de presión máxima en la boquilla***	20 kPa
Variación de la línea central del chorro a diferentes espesores de chorro*	< 1 mm
Límites de velocidad del chorro*	Desde 0,5 m/s hasta 5 m/s
Perfil de velocidad en el chorro*	Aproximadamente simétrico
Período de transición del chorro* <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Línea 1</li> <li>➤ Línea 2</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>&lt; 50 ms.</li> <li>&lt; 150 ms.</li> </ul>
Ángulo de desviación de la placa ( $\beta$ )***	< 7,5°
Rango de operación <ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Línea 1</li> <li>➤ Línea 2</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Desde 0,48 m<sup>3</sup>/h hasta 141 m<sup>3</sup>/h.</li> <li>Desde 50 m<sup>3</sup>/h hasta 576 m<sup>3</sup>/h.</li> </ul>
Relación mínima de área de entrada y salida de la boquilla*	2:1

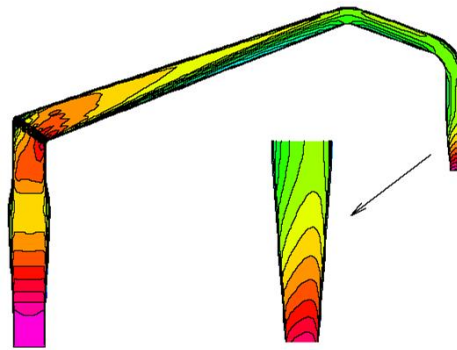
- \* Requisito tomado del paper “A unique fluid diverter desing for water flow calibration facilities”
- \*\* Requisito tomado de la norma ISO 4185.
- \*\*\* Requisito tomado de la norma MFC-9M

El diseño de cada una de las partes se muestra a continuación. Sus dimensiones correspondientes se encuentran en el anexo de planos.

**Boquilla:** La relación dimensional de la sección transversal a la salida de la boquilla se consiguió iterando entre el parámetro recomendado por la norma ISO 4185, primera edición - 1980 (la cual establece que el ancho de una boquilla rectangular debe ser de 15 a 50 veces menor que el largo de la misma) y la velocidad a la salida de la reducción, que según el PTB, para obtener una corriente rectangular adecuada libre de salpicaduras y con una superficie suave, la velocidad mínima debe ser superior a 0,5 m/s para asegurar la estabilidad y la velocidad máxima no debe exceder los 5 m/s para prevenir el splash o salpicadura.

La simetría del perfil de velocidad se consigue gracias al fenómeno en el que se acomodan las líneas de velocidad debido a la contracción que el flujo sufre al entrar a una reducción. En la figura 33 se muestran las lecturas obtenidas en el laboratorio del PTB, utilizando un anemómetro láser.

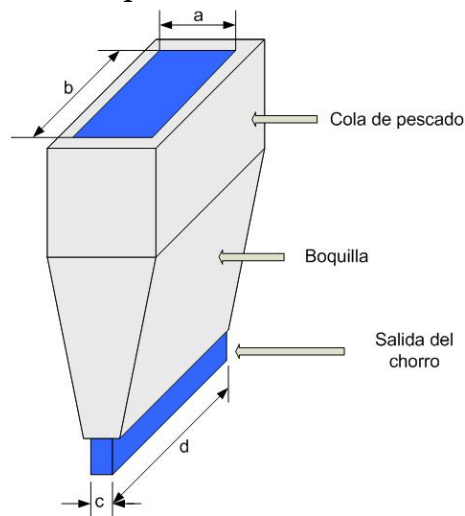
**Figura 33. Adaptación del perfil de velocidades por efecto de una contracción gradual en una boquilla.**



Fuente: "An unique fluid diverter desing for water flow calibration facilities", FLOMEKO 2000.

Siguiendo las recomendaciones del PTB, la reducción debe mantener una mínima relación de área entre la entrada y la salida de la boquilla de 2:1.

**Figura 34. Dimensiones de la boquilla.**



Fuente: El autor

Las dimensiones a la salida de la boquilla se establecen de la siguiente manera:

$$c_{\max} = \frac{d}{15} \quad \text{Ecuación 26}$$

$$c_{\min} = \frac{d}{50} \quad \text{Ecuación 27}$$

$$v_{\min} = \frac{Q_{\min}}{A_{S \min}} = \frac{Q_{\min}}{d * c_{\min}} \geq 0,5 \text{ m/s} \quad \text{Ecuación 28}$$

$$v_{\max} = \frac{Q_{\max}}{A_{S \max}} = \frac{Q_{\max}}{d * c_{\max}} \leq 5 \text{ m/s} \quad \text{Ecuación 29}$$

Las dimensiones de la entrada de la boquilla se determinan:

$$b = d \quad \text{Ecuación 30}$$

$$a = 2 * c_{\max} \quad \text{Ecuación 31}$$

Los resultados son mostrados en la siguiente tabla.

**Tabla 2. Dimensiones de las boquillas.**

Espesor del chorro	$Q_{\min}$ (m <sup>3</sup> /h)	$v_{\min}$ (m/s)	$Q_{\max}$ (m <sup>3</sup> /h)	$v_{\max}$ (m/s)	Dimensiones a la entrada de la boquilla (mm)		
					a	b	
<b>d = 63 mm</b>							
c mín. (mm)	1,3	0,15	0,51	1,4	4,75	8,4	63
c máx. (mm)	4,2	0,48	0,5	4,7	4,93		
<b>d = 350 mm</b>							
c mín. (mm)	7	4,5	0,51	44	4,98	46	360
c máx. (mm)	23	14,5	0,5	144,5	4,98		
<b>d = 806 mm</b>							
c mín. (mm)	17	25	0,5	245	4,97	80	806
c máx. (mm)	40	59	0,51	580	4,99		

El largo de las boquillas se determinó utilizando el concepto de diámetro equivalente y la norma ASME/ANSI MFC - 9M - 1998, la cual establece que la caída de presión a través de la boquilla no debe exceder los 2,04 m H<sub>2</sub>O. La longitud de las boquillas se calcula:

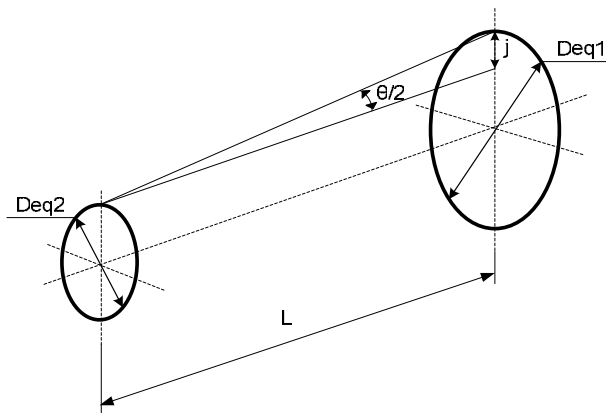
$$D_{eq} = 2c_{\max} \quad \text{Ecuación 32}$$

$$\theta/2 = \tan^{-1} \left( \frac{j}{L_b} \right) \quad \text{Ecuación 33}$$

Donde  $L_b$  corresponde a la longitud de la boquilla en mm. Utilizando la ecuación 8 para estrechamientos graduales con ángulos inferiores a 45°, determinamos el coeficiente de resistencia (factor K). La caída de presión ( $\Delta p$ ) en las boquillas se determina con la siguiente ecuación<sup>5</sup>.

$$\Delta p = 8265 * 10^7 \frac{KQ^2}{D^4} \quad \text{Ecuación 34}$$

**Figura 35. Parámetros para el cálculo del factor K.**



Fuente: El autor.

<sup>5</sup> CRANE, Flujo de fluidos, 1989, ecuación 3 - 13

Mediante un proceso iterativo, se calcularon las longitudes de las boquillas. Los resultados se muestran a continuación.

**Tabla 3. Longitudes de las boquillas.**

Boquilla	Área entrada (mm)	$D_{eq1}$ (mm)	Área salida (mm)	$D_{eq2}$ (mm)	$\theta/2$	$L_b$ (mm)	$Q_{max}$ (m <sup>3</sup> /h)	$\Delta p$ (m H <sub>2</sub> O)
1	63 X 8,4	16,8	63 X 4,2	8,4	4,8	50	4,7	1,815
2	350 X 46	92	350 X 7	14	3,71	600	15	2
	350 X 46	92	350 X 23	46	2,19	600	144,5	0,74
3	806 X 80	160	806 X 40	80	3,1	750	580	1,94

Para suplir el rango de caudal de 0,48 m<sup>3</sup>/h hasta 580 m<sup>3</sup>/h fue necesario el diseño de tres diverter, uno de los cuales (diverter 2) es de boquillas intercambiables, dependiendo del caudal de calibración. La disposición final de los tres mecanismos de acuerdo a su rango de trabajo se muestra en la siguiente tabla.

**Tabla 4. Caudales de trabajo de las boquillas.**

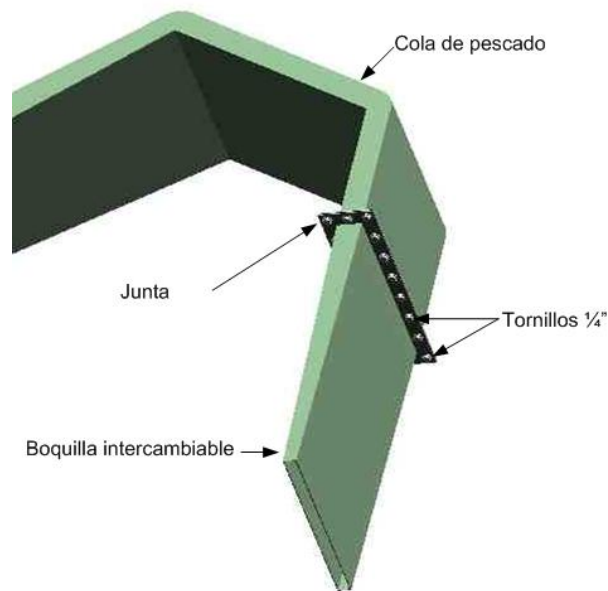
Diverter		Q mínimo (m <sup>3</sup> /h)	Q máximo (m <sup>3</sup> /h)
1		0,48	4,7
2	Boquilla 1	4,5	15
	Boquilla 2	14,5	144,5
3		59	580

**Boquillas intercambiables:** Es de resaltar que en la tabla anterior, para el caso del diverter 2, no fue posible diseñar una sola boquilla que abarcara todo el rango de caudal desde 4,5 m<sup>3</sup>/h hasta 144,5 m<sup>3</sup>/h, lo que significaba el diseño de otro diverter para cumplir con las expectativas.

Se optó por diseñar un diverter con toberas intercambiables dependiendo del rango de caudal de calibración, abarcando en su totalidad el intervalo establecido. Como consecuencia, una alternativa viable que significaría menores costos en su fabricación, instrumentación y accesorios.

La unión de las toberas al resto del sistema se hará a través de pernos. Un empaque de caucho se colocaría entre ambos accesorios para evitar las fugas. Es importante resaltar la adecuada alineación que debe existir entre los dos accesorios, esto se consigue gracias a las guías situadas en su parte lateral. El empaque debe estar lo mas centrado posible para que no interfiera en el flujo de manera que provoque distorsiones en el perfil de velocidades.

**Figura 36. Boquilla intercambiable.**



Fuente: El autor

La fuerza ( $F$ ) a la que estarían sometidos los pernos se determinó utilizando la ecuación de momentum:

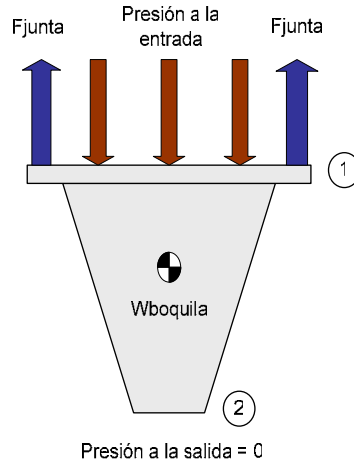
$$\sum F = Q_M (v_2 - v_1) \quad \text{Ecuación 35}$$

Donde:

$v_2$  - Velocidad a la salida de la boquilla.

$v_1$  - velocidad a la entrada de la boquilla.

Figura 37. DCL de la boquilla.



Fuente: El autor

$$F_{Junta} = p_1 A_{S1} + W_{boquilla} + Q_M (v_2 - v_1) \quad \text{Ecuación 36}$$

Donde:

$F_{Junta}$  - Fuerza que soporta la junta,

$p_1$  - Presión a la entrada de la boquilla,

$A_{S1}$  - Área a la entrada de la boquilla.

$W_{boquilla}$  - Peso de la boquilla

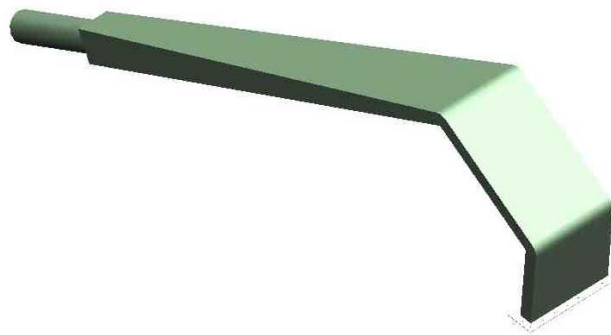
Los resultados se muestran en la tabla 5.

Tabla 5. Fuerza En la junta de las boquillas intercambiables.

Boquilla	$p_1$ (kPa)	$\Delta v$ (m/s)	$W_{boquilla}$ (N)	$Q_M$ (kg/h)	$F_{Junta}$ (N)
1	20,1	1,5	79,5	4,15	408,5
2	7,2	2,49	80,6	40	296,6

**Cola de pescado:** Antes de que el flujo entre a la boquilla, atraviesa lo que se denominó “cola de pescado” (ver figura 38). Su función es pasar de manera gradual de una sección cuadrada a una sección rectangular, determinada por las dimensiones de entrada de la boquilla. Se diseñó bajo el parámetro en el cual la velocidad de entrada es igual a la velocidad de salida, logrando estimar bajo el concepto de radio hidráulico su comportamiento, es decir, si se trata como tobera o difusor para el cálculo de las pérdidas. El procedimiento es similar al realizado para la estimación de la caída de presión en las boquillas. Los coeficientes de resistencia para cada uno de los divertir se muestran en la tabla 6.

**Figura 38. Cola de pescado.**



Fuente: El autor

**Tabla 6. Coeficiente de resistencia de las colas de pescado.**

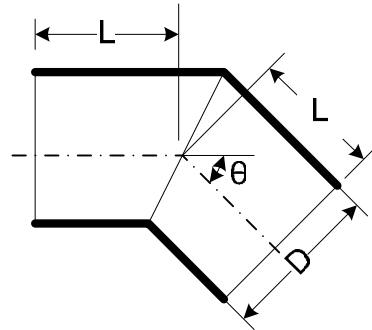
Diverter	$Deq_{cp1}$ (mm)	$Deq_{cp2}$ (mm)	$L_{cp}$ (mm)	$\theta/2$	Factor K
1	23	16,8	200	0,88	0,0101
2	126,88	92	2000	0,5	0,006
3	253,93	160	2000	1,34	0,0356

$Deq_{cp1}$  – Diámetro equivalente a la entrada de la cola de pescado.

$Deq_{cp2}$  – Diámetro equivalente a la salida de la cola de pescado.

$L_{cp}$  – Longitud de la cola de pescado.

Los coeficientes de resistencia debido a las curvas subsiguientes al accesorio se obtuvieron del apéndice A-24 del libro de “Flujo de Fluidos” de Crane.



$\theta$	K
0°	2 f
15°	4 f
30°	8 f
45°	15 f
60°	25 f
75°	40 f
90°	60 f

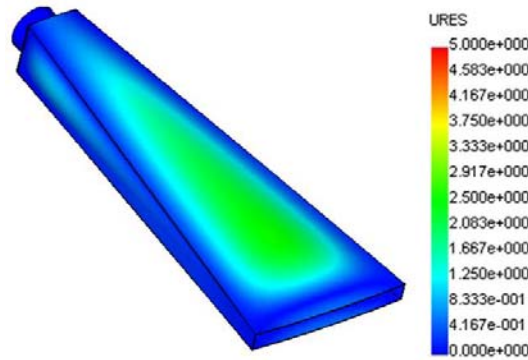
Utilizando el programa Cosmos Desing Star Versión 3.0 como herramienta CAE para predecir el comportamiento del accesorio cuando es sometido a su presión máxima de trabajo, se determinó el espesor de la lámina con el cual sería construido. Este programa utiliza la metodología de análisis mediante elementos finitos.

Se evaluaron los accesorios de los diverter 2 y 3 y se determinó que los esfuerzos producidos no afectaban el accesorio debida a que se manejarían bajas presiones. El espesor de las láminas se determinó por la deformación debido a la deformación que se presentaba en su parte de mayor expansión, como muestra la figura 39. Los resultados se muestran en la tabla 7. El accesorio se evaluó como una cáscara sometida a presión constante en su interior, con restricciones en el tubo de conexión.

**Tabla 7. Espesor de las láminas de las “cola de pescado”**

Diverter	Presión de evaluación (kPa)	Deformación máxima (mm)	Espesor de lámina (mm)
2	40	4,1	2,5
3	35	4	3

Figura 39. Ejemplo de la deformación en las colas de pescado.



Fuente: El autor

Los valores de desplazamiento y esfuerzos de los nodos más comprometidos se encuentran en la tabla 8 para el diverter 2 y en la tabla 9 para el diverter 3.

Tabla 8. Listado de esfuerzos y desplazamientos máximos del diverter 2.

Nodo	Esfuerzo (N/m <sup>2</sup> )	Desplazamiento (mm)		
		UX	UY	UZ
2904	1.23E+008	-0.00013	0.0640	4.0032
2919	1.22E+008	-0.00011	0.0639	4.0078
2965	1.10E+008	-0.00051	0.0579	3.7350
2966	1.15E+008	-0.00030	0.0607	3.8842
2967	1.15E+008	-7.57E-005	0.0607	3.8781
2968	1.08E+008	8.54E-005	0.0573	3.7098
2981	1.07E+008	-0.00052	0.0561	3.6619
2982	1.09E+008	-0.00034	0.0577	3.7541
2983	1.12E+008	-0.00013	0.0591	3.8155
2984	1.05E+008	3.59E-005	0.0554	3.6287

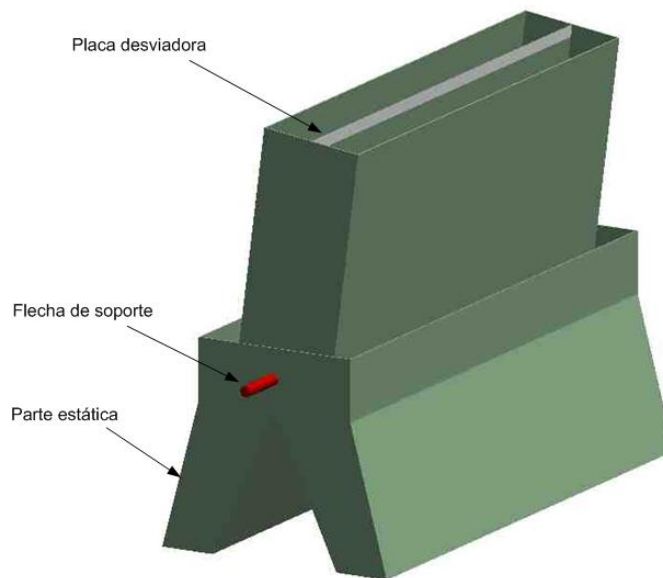
Tabla 9. Listado de esfuerzos y desplazamientos máximos del diverter 3.

Nodo	Esfuerzo (N/m <sup>2</sup> )	Desplazamiento (mm)		
		UX	UY	UZ
8593	3.87E+007	-0.0140	0.1419	3.7589
8594	3.94E+007	-0.0141	0.1482	3.8908
8595	3.98E+007	-0.0137	0.1494	3.9181
8596	3.96E+007	-0.0137	0.1502	3.9275
8597	3.88E+007	-0.0136	0.1483	3.8738
8598	3.76E+007	-0.0135	0.1438	3.7607
8622	3.90E+007	-0.0144	0.1507	3.9370

8623	3.95E+007	-0.0141	0.1518	3.9630
8624	3.92E+007	-0.0140	0.1526	3.9691
8625	3.83E+007	-0.0139	0.1503	3.9086

**Sistema desviador:** Es un conducto bifurcado compuesto por una parte móvil (placa desviadora) y una estática como muestra la figura 40.

**Figura 40. Sistema desviador.**



Fuente: El autor

**Placa desviadora:** Al salir el chorro de agua de la boquilla, pasa a través del principal constituyente del diverter, un conducto bifurcado que incluye una placa desviadora (deflector). Este componente se diseñó buscando de evitar que salpicara agua al atravesar el chorro. Esta necesidad fue resuelta al limitar el ángulo de impacto del chorro de agua en el baffle en todos sus puntos de operación por debajo de  $7,5^\circ$ . Está sostenida por una flecha de acero de 8 mm y 15 mm de diámetro para el diverter de la línea 1 y 2 respectivamente. La placa será construida en acero inoxidable 316L, el cual es una variante del 316 en la que el carbono está muy reducido, en cantidades no superiores al 0,03% llamado de "bajo carbono". Esto permite la ejecución de soldaduras con cualquier proceso (excepto soldadura oxi-

acetilénica), no requiere tratamiento térmico después de la soldadura. La rugosidad de la lámina debe ser inferior a 6,3  $\mu\text{m}$ .

La fuerza ejercida debido al cambio de dirección del chorro por la placa desviadora se determinó utilizando la ecuación de momentum aplicada a deflectores estáticos. Para tal fin, fue necesario considerar:

- La presión externa a los chorros es constante en todos los puntos, de modo que la presión en el fluido que entra en el deflector (placa desviadora) es la misma que en el fluido que sale del deflector.
- La resistencia por fricción debida a la interacción fluido-deflector es insignificante.
- Se desprecia de la dispersión lateral de un chorro plano.
- Flujo estable y uniforme.
- Cambios de altura insignificantes
- Deflector estacionario.

Por lo tanto:

$$-R_Y = Q_M (v_2 \cos \phi - v_1) = Q_M v_1 (\cos \phi - 1) \quad \text{Ecuación 37}$$

$$R_X = Q_M v_2 \text{sen} \phi = Q_M v_1 \text{sen} \phi \quad \text{Ecuación 38}$$

$$R = \sqrt{R_X^2 + R_Y^2} \quad \text{Ecuación 39}$$

Donde:

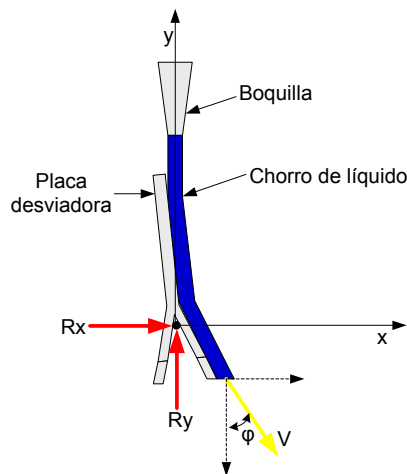
$R_Y$  - Reacción en el eje y

$R_X$  - Reacción en el eje x

R - Resultante

$\varphi$  - Ángulo de desviación total del líquido

**Figura 41. Fuerzas de reacción del deflector.**



Fuente: El autor

El espesor de la placa desviadora se determinó a partir de la deflexión máxima que se producía en el deflector por causa de las fuerzas de impacto del chorro. Debido a la que no se encontró documentación al respecto, se consideró que una deflexión inferior de 2,5 mm en el punto medio de la zona de corte del chorro (borde de la placa desviadora) para los divertir 2 y 3, y 0,5 mm para el diveter más pequeño, no afectarían los resultados de la medición.

La presión debida al impacto del chorro en la placa se deriva a partir de la resultante calculada para en apoyo del deflector. Entonces:

$$p_{pd} = \frac{R}{A_{pd}} \quad \text{Ecuación 40}$$

Donde:

$P_{pd}$  - Presión sobre la superficie de la placa desviadora

$A_{pd}$  - Área de la placa desviadora

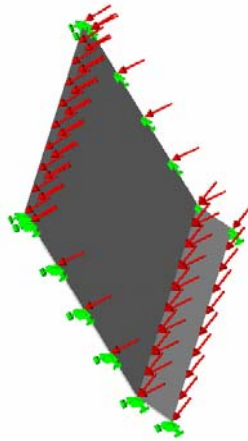
Para poder determinar el espesor al cual la placa no sufriría una deflexión considerable, se utilizó como herramienta CAE el software Cosmos Desing Star Versión 3.0.

Para su análisis, la placa se simuló como una cáscara (shell) sometida a presión por una de sus caras y apoyada de su parte lateral como muestra la figura 42. Los esfuerzos producidos son despreciables, por eso el espesor de la lámina fue determinado por la deflexión producida en su parte crítica. Los resultados se muestran en la tabla 10.

**Tabla 10. Espesores de las placas desviadoras.**

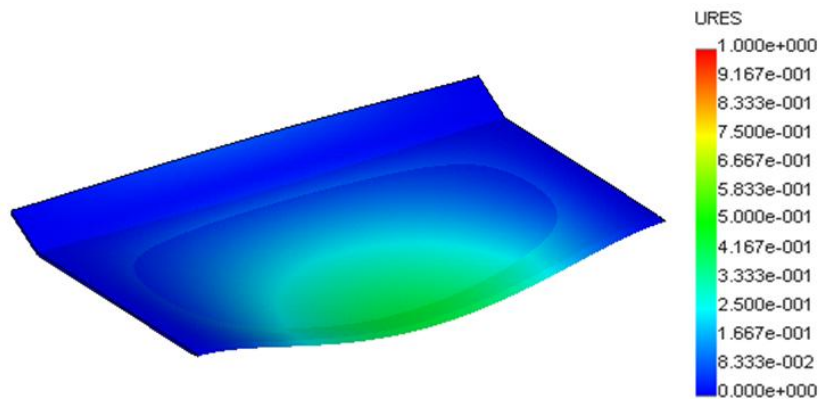
Diverter	R (N)	$P_{imp}$ (N/m <sup>2</sup> )	Espesor de la placa (mm)	Deflexión (mm)
1	2,6	560	0,6	despreciable
2	96	2200	1,5	0,5
3	313	2000	1,9	2

Figura 42. Fuerzas aplicadas en el deflector.



Fuente: El autor

Figura 43. Ejemplo de la deflexión que sufre la placa desviadora en escala 1:50.



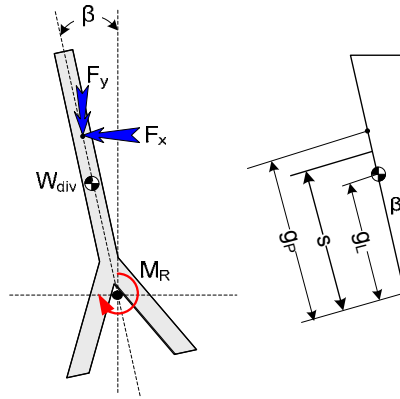
Fuente: El autor

El conducto bifurcado está compuesto por una parte móvil y una estacionaria. La parte móvil, la cual realiza un barrido de  $15^\circ$ , está unida a un actuador neumático que lo posiciona al momento de realizar la prueba.

La fuerza mínima de los actuadores se determinó a partir de la resultante provocada en el eje debido al cambio de dirección del fluido y al peso del deflector. Realizando una sumatoria de momentos en el eje como muestra la figura 44, dividiendo por la

distancia del eje al punto de apoyo del actuador para cada diverter, encontramos en valor de la fuerza mínima requerida para realizar el movimiento.

Figura 44. DCL del deflector.



Fuente: El autor.

$$F_Y = R_Y$$

$$F_X = R_X$$

$$MT_R = (F_Y * s_p * \sin(\beta)) + (F_X * s_L * \cos(\beta)) + (W_{div} * s_L * \sin(\beta)) \quad \text{Ecuación 41}$$

$$F_{act} = \frac{MT_R}{s} \quad \text{Ecuación 42}$$

Donde:

$s_p$  - Distancia entre el eje y el punto de aplicación de la fuerza,

$s_L$  - Distancia entre el eje y el centro de gravedad,

$MT_R$  - Momento provocado en el eje,

$F_{act}$  - Fuerza necesaria en el actuador para contrarrestar el momento,

s - Distancia entre el eje y el punto de apoyo del actuador en el diverter,

$\beta$  - Máximo ángulo de impacto (7,5°).

**Tabla 11. Fuerza mínima de los actuadores.**

Diverter	F <sub>x</sub> (N)	F <sub>y</sub> (N)	W <sub>div</sub>	MT <sub>R</sub> (N/mm)	s (mm)	F <sub>act</sub> (N)
1	2,5	0,5	1,5	90	50	1,8
2	76,5	15,2	35,3	8239,6	95	87
3	307,2	61,1	87	34820	95	366,5

### 5.3.2. Línea de calibración.

Los requerimientos de longitud de tubería recta están fuertemente ligados al dispositivo de medición y al tipo de disturbios que existan aguas arriba del mismo, así mismo, los acondicionadores de flujo juegan un papel muy importante al momento de determinar la extensión de tubería necesaria. Basados en la norma API 5-3 se estableció la longitud de tubería recta aguas arriba (ecuación 25) y aguas abajo del medidor teniendo en cuenta que el accesorio aguas arriba del medidor es una válvula de bola que al momento de la prueba, se encontrará totalmente abierta (para el caso en que el medidor de prueba sea de 4" u 8") o un reductor concéntrico (para el resto de diámetros). Ver figura 31.

A continuación se muestran las longitudes aguas arriba y aguas abajo para medidores de turbina sin utilizar acondicionadores de flujo.

**Tabla 12. Tabla de resultados para longitudes de tubería recta para medidores de turbina sin acondicionadores de flujo.**

Diámetro nominal (pulgadas)	factor de fricción	Longitud aguas arriba (mm)		Longitud aguas abajo 5D (mm)
		Factor K <sub>s</sub>		
		0.75	2	
1	0,024297148	274	732	203
1 1/2	0,021765179	460	1226	305
2	0,020455607	652	1739	406

2 1/2	0,019601399	850	2268	508
3	0,018629801	1074	2864	610
4	0,017508471	1524	4062	813
6	0,016000467	2500	6668	1219
8	0,015099181	3534	9420	1626

Utilizando acondicionadores de flujo tipo C (conjunto de tubos) se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 13. La caída de presión provocada por los acondicionadores de flujo tipo C se calculó, según la norma ISO 5167, con la siguiente expresión:

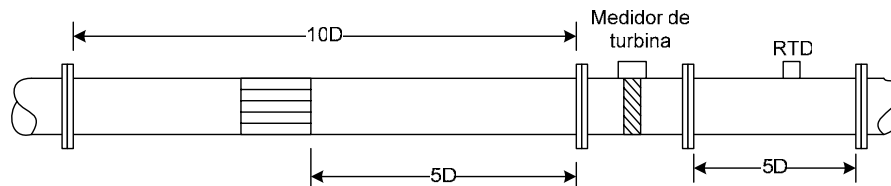
$$\Delta p = 5\rho \frac{v^2}{2} \quad \text{Ecuación 43}$$

Donde  $\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) y  $v$  (m/s). Los resultados se realizaron con agua a 26°C y 5 m/s.

**Tabla 13. Longitud de tubería recta aguas arriba usando acondicionadores de flujo tipo C para medidores de turbina.**

Diámetro nominal (pulgadas)	Longitud aguas arriba (mm)	Longitud aguas abajo (mm)	Caída de presión (psi)
2 1/2	640	508	13
3	770	610	13
4	1020	813	13
6	1530	1219	13
8	2040	1626	13

**Figura 45. Instalación de un medidor de turbina utilizando acondicionadores de flujo.**

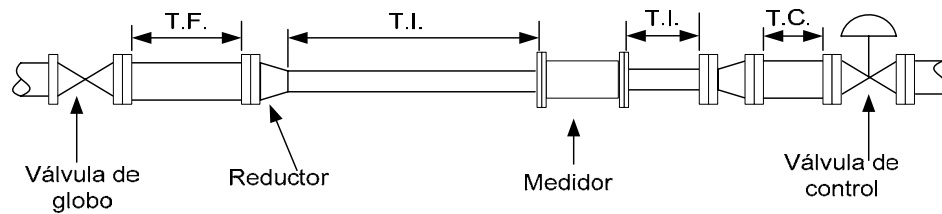


Fuente: El autor

A pesar de que la utilización de acondicionadores de flujo disminuye las longitudes de tubería recta aguas arriba considerablemente, las pérdidas en el sistema se incrementan en aproximadamente siete veces, demandando bombas de mayor potencia. Adicionalmente, disponer de estos elementos para cada sección de tubería recta, representa un costo muy elevado.

Con el fin de facilitar la maniobrabilidad del banco al momento de realizar un montaje para un determinado diámetro, la tubería de calibración aguas arriba del medidor se fraccionó en una parte fija y un parte intercambiable como muestra la figura 46. Las dimensiones se muestran en la tabla 14.

**Figura 46. Diagrama de la sección de tubería de calibración.**



T.F. Sección de tubería fija

T.C. Tubo telescópico

T.I. Sección de tubería intercambiable

Fuente: El autor

Las dimensiones finales de la tubería de calibración se muestran a continuación.

**Tabla 14. Dimensiones de la tubería de calibración.**

Línea	Longitud de tubería fija (mm)	Longitud de tubería intercambiable (mm)		Longitud total aguas arriba (mm)
		aguas arriba	aguas abajo	
1	2200	2000	1000	4400
2	2800	6800	1700	9600

**Tubo telescópico:** Si para la calibración de un determinado medidor, la longitud de la tubería aguas arriba y aguas abajo ya está preestablecida, ¿Cómo compensar la diferencia de tamaños entre medidores de un mismo diámetro? Para tal fin se diseñó un tubo telescópico en base a la NTC - 2587 (Tubos, acoples y accesorios de hierro dúctil y sus juntas, para aplicaciones en gas o agua) para cada línea, con una capacidad de extensión de 500 mm y una presión máxima de 5 MPa.

Existirá uno por cada línea de calibración adaptados con bridas para facilidad de instalación. Cada tubo estará compuesto por una camisa (tubo exterior) con un acabado superficial interno de dos triángulos (0,0025 mm). El sistema de sellado estará compuesto por un par de O-rings los cuales estarán alojados en uno de los extremos del tubo interno o extensible.

El espesor de los tubos se calculó, según la NTC - 2587, de acuerdo a la siguiente expresión:

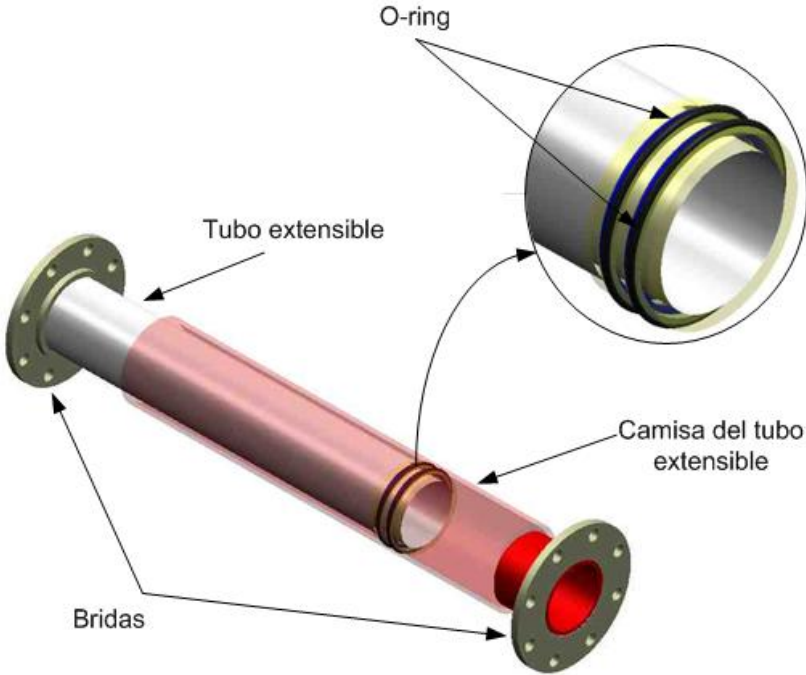
$$es = K_p(0,5 + 0,001D) \quad \text{Ecuación 44}$$

Donde:

es - Espesor del tubo en mm (no debe ser inferior a 6 mm)

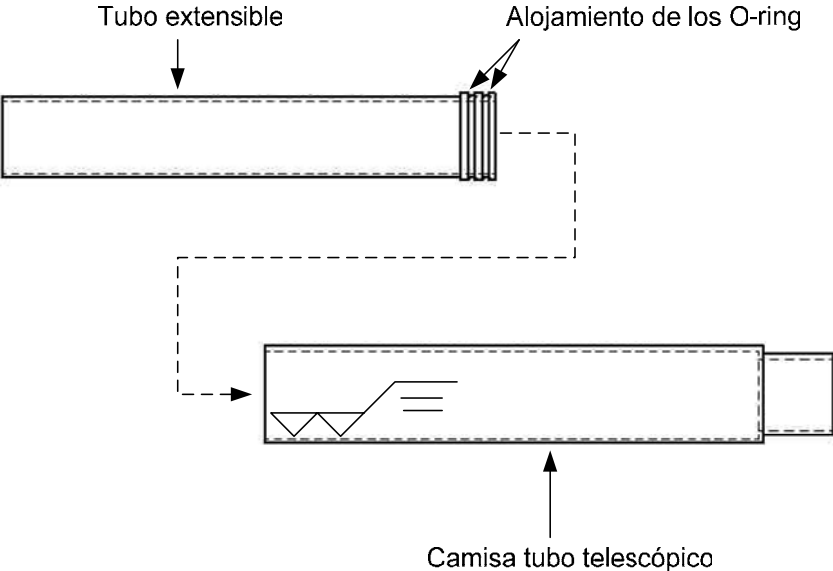
$K_p$  - Coeficiente usado para la designación de la clase de espesor, ( $K_p= 9$ , en nuestro caso)

**Figura 47. Tubo telescópico.**



Fuente: El autor

**Figura 48. Detalles del tubo telescópico.**



Fuente: El autor

### 5.3.3. Tanques de colección.

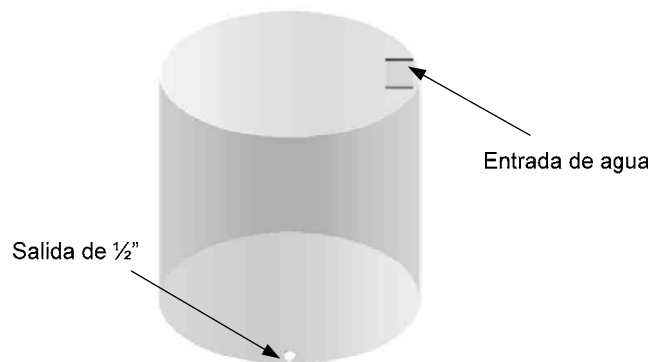
Son los encargados de almacenar el fluido durante el período de calibración, los cuales oscilan entre los 30 y 50 segundos. En la tabla 15 se muestran la capacidad mínima de los tanques para un ciclo de 50 segundos a máximo caudal.

Tabla 15. Mínima capacidad de los tanques de colección.

Diverter	Caudal (m <sup>3</sup> /h)	Volumen (m <sup>3</sup> )
1	4,7	0,065
2	144,5	2
3	580	8

El tanque colector del diverter 1 corresponderá a un tanque con una capacidad de 68 litros. Será fabricado en acrílico para hacerlo mas liviano y se encontrará alojado en una balanza de plataforma plana.

Figura 49. Tanque de acrílico de 68 litros.



Fuente: El autor

Para el segundo diverter corresponderá un tanque marca Ajovert de 2 m<sup>3</sup> de capacidad dotado con válvula de 1" en su parte lateral para su drenado. Tiene un peso de 47 Newton incluyendo la tapa. Tiene una altura de 1410 mm y su diámetro superior e inferior es 1580 mm y 1250 mm respectivamente.

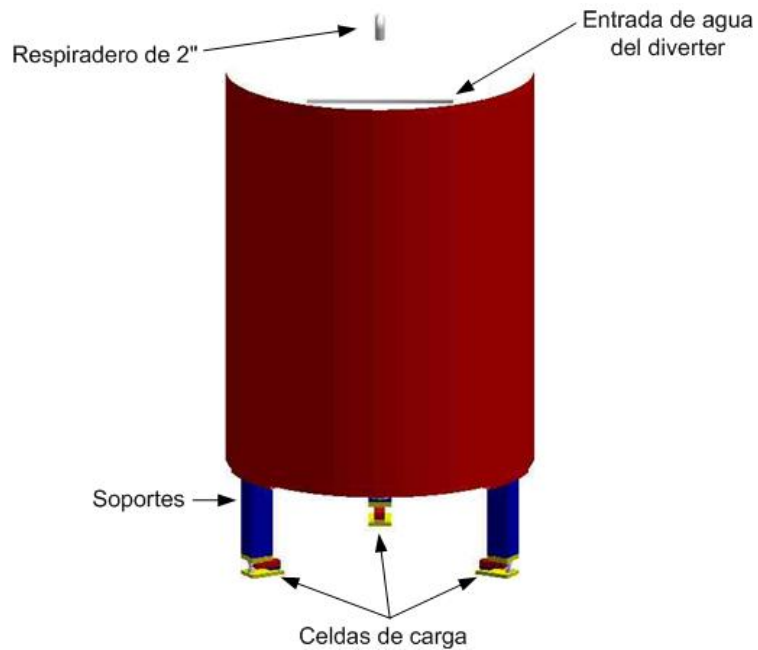
Figura 50. Tanque de 2000 lt.



Fuente: [www.ajover.es](http://www.ajover.es)

El tercer tanque tendrá una capacidad de 8,2 m<sup>3</sup> y su válvula de drenaje de 4" se encontrará en la parte inferior. Su altura será de 2,5 metros con un diámetro interior en el cilindro de 2 metros.

Figura 51. Tanque de 8200 litros.



Fuente: El autor

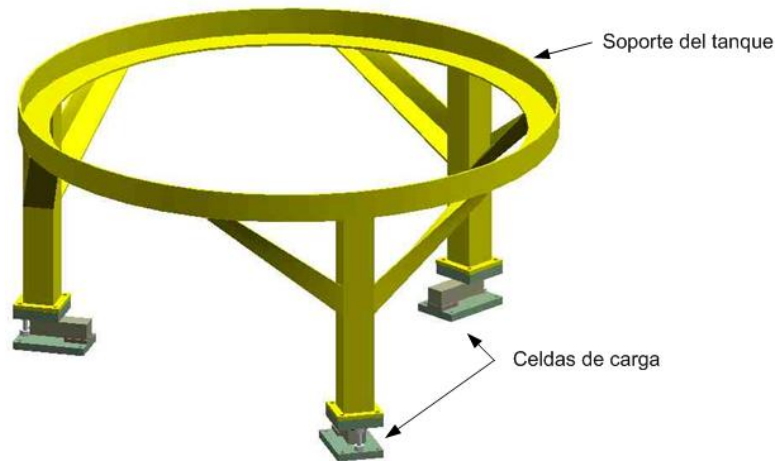
Según recomendación de la norma API Standard 650, sección 3.6, para tanques cilíndricos con un diámetro nominal menor de 50 pies, el espesor nominal de la lámina no debe ser inferior a 3/16". El material de las láminas sería acero estructural A36. La tabla 16 muestra los espesores de lámina para diámetros mayores.

**Tabla 16. Espesores de lámina para tanques cilíndricos.**

Diámetro nominal del tanque (pies)	Espesor nominal de la lámina (pulgadas)
< 50	3/16
50 a < 120	1/4
120 < a 200	5/16
> 200	6/16

Los tanques 2 y 3 estarán apoyados sobre un soporte en los que en su parte inferior se encontrarán alojados los mecanismos de pesaje (celdas de carga) como muestra la figura 52.

**Figura 52. Soporte de los tanques.**



Fuente: El autor

El diseño del trípode fue evaluado utilizando el software SAP2000 Nonlinear Versión 7.01, Structural Análisis Program producido por Computers and Structures Inc, de la Universidad de Ave, Berkeley, U.S.A. Este programa utiliza la metodología de análisis mediante elementos finitos.

Para la solución del problema se debe seguir el algoritmo de solución que consiste principalmente en:

1. Dibujar la estructura.
2. Asignar el tipo de perfil a ser utilizado para el cálculo.
3. Definir la orientación de los perfiles en la estructura.
4. Asignar el tipo de apoyo a ser utilizado por la estructura.
5. Aplicar las cargas sobre los elementos que están soportando la carga.
6. Seleccionar el tipo de análisis a ser utilizado.
7. Ejecutar el programa.
8. Evaluar los resultados. Si la resistencia o las deformaciones no son las deseadas volver a repetir el ciclo desde el segundo paso.

El material de construcción sería acero estructural A-36, sus propiedades son<sup>6</sup>:

- Límite de fluencia: 2550 kg/cm<sup>2</sup>.
- Resistencia a la tracción: 4080 kg/cm<sup>2</sup>.

Los perfiles calculados para la construcción de los soportes de los tanques tienen las siguientes características:

---

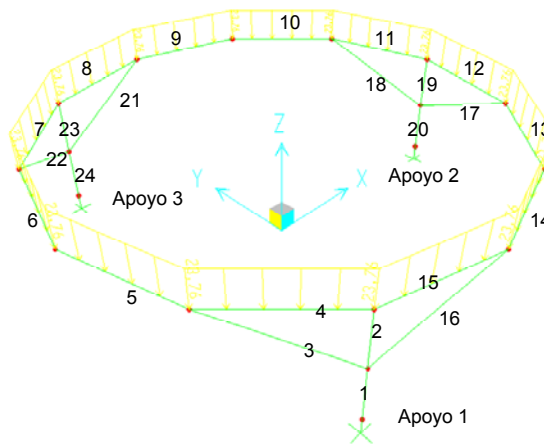
<sup>6</sup> Datos suministrados por la Compañía General de Aceros.

**Tabla 17. Propiedades de los perfiles**

Perfil	Peso	Área
	kg/m	cm <sup>2</sup>
Perfil en L 3/8" X 4"	14,58	18,45
Perfil en L 1 1/2" X 6"	29,17	37,1
Tubo cuadrado 3" X 1/4"	29,16	36,9
Tubo cuadrado 5/16" X 4"	24,4	30,96

El soporte para el tanque marca Ajoever estará constituido en su parte superior por un perfil el L de 3/8"X4" y las patas con tubo cuadrado de 3"X1/4". La carga total sería de 20,6 kN, la cual se incrementó 1,4 veces (29 kN) para evaluar el soporte, lo que correspondería a una carga distribuida sobre el anillo de 7,35 N/mm como muestra la figura 53. Los resultados son mostrados en la tabla 18 y 19.

**Figura 53. Cargas en el soporte.**



Fuente: El autor

**Tabla 18. Esfuerzos en el soporte del tanque 2.**

Sección	Longitud (mm)	Factor de seguridad	Esfuerzo axial máximo (N/mm <sup>2</sup> )	Esfuerzo flector máximo (N/mm <sup>2</sup> )	Esfuerzo cortante máximo (N/mm <sup>2</sup> )
1-24	250	8,06	5,497	8,971	2,141
2-23	250	8,77	1,038	11,016	1,563
3-16-18-17-21-22	408	5,69	4,799	14,482	1,033
4-7-8-11-12-15	323,5	6,13	3,117	13,219	2,078
5-6-9-10-13-14	323,5	5,37	0,984	21,831	3,327
19	250	11,76	1,038	12,720	8,805
20	250	9,16	5,497	10,358	2,474

**Tabla 19. Reacciones en los apoyos tanque 2.**

Apoyo	Carga	X	Y	Z
1-3	Fuerza (N)	1197,2	2073,5	9787
	Momento (N-mm)	-175875	101541,5	-0,02
2	Fuerza (N)	-2394	0	9789
	Momento (N-mm)	0	203083	0

El soporte del tercer tanque estará constituido en su parte superior por un perfil de 11/2 X 6" y en sus patas un perfil cuadrado de 5/16" X 4". La carga total del sistema sería de 90 kN, pero se evaluó con una carga de 150 kN. Los resultados son mostrados en la tabla 20 y 21.

**Tabla 20. Esfuerzos en el soporte del tanque 3.**

Sección	Longitud (mm)	Factor de seguridad	Esfuerzo axial máximo (N/mm <sup>2</sup> )	Esfuerzo flector máximo (N/mm <sup>2</sup> )	Esfuerzo cortante máximo (N/mm <sup>2</sup> )
1-24	250	2,1	17,024	35,468	10,468
2-23	250	2,71	4,073	35,329	5,784
3-16-18-17-21-22	577	2,6	10,502	28,102	3,374

4-7-8-11-12-15	520	2,79	7,020	26,502	3,109
5-6-9-10-13-14	520	3,1	2,925	33,592	6,478
19	250	3,59	4,073	40,795	6,679
20	250	2,73	17,024	40,955	12,088

**Tabla 21. Reacciones en los apoyos tanque 3.**

Apoyo	Carga	X	Y	Z
1-3	Fuerza (N)	9702,3	16804	50463
	Momento (N-mm)	-1154689	666666	1,345
2	Fuerza (N)	-19404	0	50463,6
	Momento (N-mm)	0	-1333314	0

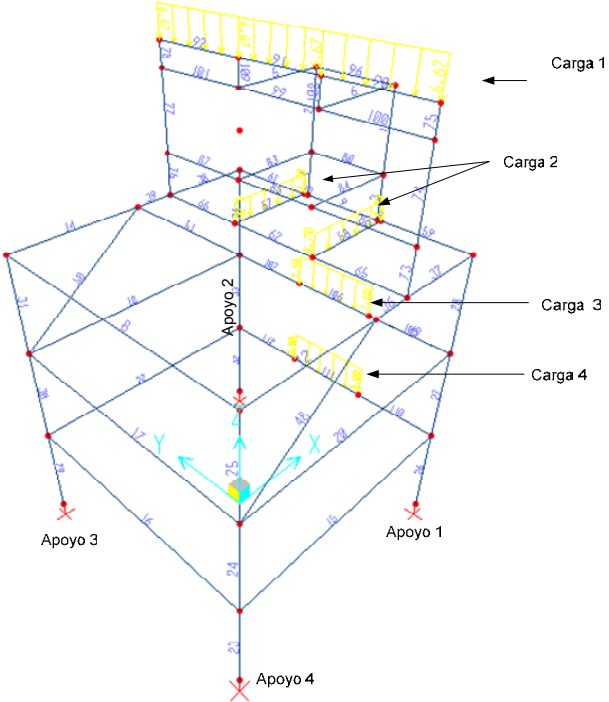
#### 5.3.4. Estructura de soporte del diverter.

Es la encargada de soportar y rigidizar el sistema desviador de flujo. Para el diverter 2, la estructura tiene una altura de 3,3 metros. Estará construida con perfil cuadrado de 2" X 3/16" de acero estructural A-36. El diseño de la estructura se realizó aplicando cargas distribuidas en aquellas barras en las que estarán apoyados los diferentes accesorios del diverter. El procedimiento de diseño fue el mismo utilizado para el diseño de los soportes de los tanques de colección.

**Tabla 22. Fuerzas sobre la estructura del diverter 2.**

Barra	Carga	Carga de trabajo (N)	Carga de diseño (N)
11-12-14	1	1310	8000
39-58	2	156	1575
71	3	573	3000

Figura 54. Estructura de soporte del diverter.



Fuente: El autor.

Figura 55. Estructura de soporte del diverter.



Fuente: El autor

**Tabla 23. Esfuerzos de las barras en la estructura del diverter 2.**

Barra	Factor de seguridad	Longitud (mm)	Esfuerzo axial (N/mm)	Esfuerzo flector (N/mm)	Esfuerzo cortante (N/mm)
1-4	38,5	720	20,6	0,890	0,039
7-10	10,2	720	7,065	4,607	0,039
5-2	33,3	720	1,907	0,915	0,080
8-17	4,6	720	7,396	23,345	1,099
3-6	27,0	720	0,153	4,151	0,250
9-18	3,3	720	3,703	26,183	1,544
66-68	76,9	2000	0,002	1,700	0,140
65	83,3	2000	0,032	1,731	0,134
64	76,9	2000	0,048	0,826	0,134
13	8,3	2000	0,064	1,587	0,134
83-78	9,8	1000	0,140	14,863	0,556
82-79	2,1	517	0,733	68,728	5,479
31-34	3,9	483	0,239	40,928	3,723
81-77	8,1	1232	3,253	13,254	0,445
80-76	7,0	1232	2,555	14,647	0,424
119-117	8,6	745	1,019	17,405	1,061
118	11,6	510	1,017	12,800	0,000
16-29	6,6	745	0,223	24,219	1,409
26	10,8	510	0,225	14,871	0,000
57-59	3,5	236	4,485	25,830	2,130
55-56	8,1	236	0,820	10,870	1,987
50-60	14,5	483	0,948	10,029	0,900
106-104	23,3	800	1,156	4,678	0,293
105	31,3	400	1,159	2,950	0,000
109-107	15,6	800	1,031	8,818	0,588
108	34,5	400	0,890	3,613	0,000
56-48	11,6	600	4,764	4,367	0,050
42-43	5,9	300	4,457	16,996	2,073
69-38	3,2	250	3,029	46,452	7,163
70-15	22,2	600	0,318	4,315	0,251
19-21	20,0	300	0,403	6,598	0,090
103-101	18,5	800	1,115	7,447	0,430
102	27,8	400	1,112	4,377	0,000
91-89	3,7	800	2,800	40,410	2,560
90	9,9	400	5,405	10,409	0,000
14-11	3,1	800	3,947	46,456	5,497
12	10,2	400	6,553	7,001	0,000
94-95	2,8	483	0,065	51,636	1,763

97-98	6,1	483	0,024	23,969	0,706
-------	-----	-----	-------	--------	-------

**Tabla 24. Reacciones en los soportes de la estructura del diverter 2.**

Apoyo	Carga	X	Y	Z
1	Fuerza (N)	-18,9	-114	6924
	Momento (N-mm)	25966	-5296	-1787
2	Fuerza (N)	-18,9	114	6924
	Momento (N-mm)	-25966	-5296	1787
3	Fuerza (N)	18,3	-12	1847
	Momento (N-mm)	2887	3315	-864
4	Fuerza (N)	18,3	12,1	1847
	Momento (N-mm)	-2887	3315	864

La estructura del diverter 3 tiene una altura de 5 metros. Estará construida con perfil cuadrado de 3" X ¼" de acero estructural A-36. El resultado de los cálculos se muestra en las siguientes tablas.

**Tabla 25. Fuerzas sobre la estructura del diverter 3.**

Barra	Carga	Carga de trabajo (N)	Carga de diseño (N)
90-91-92	1	4220	20010
57-58	2	800	10001
106	3	2050	7500
111	4	2050	8000

**Tabla 26. Esfuerzos de las barras en la estructura del diverter 3.**

Barra	Factor de seguridad	Longitud (mm)	Esfuerzo axial (N/mm)	Esfuerzo flector (N/mm)	Esfuerzo cortante (N/mm)
23-29	20,8	1124	3,769	0,710	0,100
24-30	16,4	1124	3,535	2,135	0,129
25-31	19,2	1124	0,201	5,525	0,342
26-32	3,3	1124	12,103	31,500	1,650

27-33	2,9	1124	9,604	39,619	2,529
28-34	2,3	1124	3,602	42,617	2,683
15-22	71,4	3000	0,045	2,737	0,216
16	62,5	3000	0,020	2,320	0,210
20-18	18,5	3000	4,553	3,465	0,230
110-112	2,0	1000	0,478	72,747	4,378
111	2,3	1000	0,478	62,998	0,000
49-107	2,1	1000	0,185	70,732	1,117
106	2,6	1000	0,185	56,776	0,000
48-50	5,7	1875	5,750	18,071	0,620
51-49	5,2	1875	5,169	19,627	0,544
12-14	7,1	1500	0,186	20,433	0,791
36-39	2,2	436	0,659	64,597	11,011
37-38	3,1	1064	0,540	50,749	2,702
57-58	10,9	1064	0,136	12,714	3,528
73-76	3,2	468	6,265	32,298	3,003
74-77	4,4	834	5,807	23,271	1,477
75-78	2,8	251	3,733	53,734	12,546
86-87	11,4	1050	0,823	11,328	0,527
85	20,8	900	0,800	4,511	0,000
84-83	4,4	1064	0,281	32,057	0,335
3-4	3,2	468	0,154	37,373	3,795
1-2	27,0	834	0,219	5,090	0,257
96	125,0	900	0,986	0,109	0,000
90-92	2,6	1050	0,838	53,734	6,848
91	4,9	900	12,967	14,816	0,000

**Tabla 27. Reacciones en los soportes de la estructura del diverter 3.**

Apoyo	Carga	X	Y	Z
1	Fuerza (N)	-25,3	1543	22461
	Momento (N-mm)	-569383	-8764,6	-6180
2	Fuerza (N)	-25,3	-1543	22461
	Momento (N-mm)	569383	-8764,6	6180
3	Fuerza (N)	25,3	-89,3	6890,5
	Momento (N-mm)	32915,8	10318,8	-3758,6
4	Fuerza (N)	25,3	89,3	6890,5

	Momento (N-mm)	-32915,8	10318,8	3758,6
--	-------------------	----------	---------	--------

### 5.3.5. Soportes del sistema.

El montaje y mantenimiento de las válvulas de control de caudal, requiere de un espacio determinado, por tal motivo, el banco se encontrará elevado 1,3 metros del suelo, siguiendo las recomendaciones del fabricante de las válvulas.

Basando el diseño de las columnas en las fórmulas propuestas por el American Institute of Steel Construction (AISC), se determinó la sección de la misma. El procedimiento de diseño se muestra a continuación:

1. Se selecciona la sección de la columna.
2. Se evalúa la relación de esbeltez ( $K_c L/r$ ), donde  $K_c$  corresponde al factor de longitud efectiva y  $r$  al radio de giro, y se determina el criterio de diseño, ya sea Euler (columnas largas) o Jonson (columnas cortas).

$$\left( \frac{K_c L}{r} \right)_c \leq \frac{K_c L}{r} \leq 200 \quad \text{Ecuación 45}$$

Donde:

$$\left( \frac{K_c L}{r} \right)_c = \sqrt{\frac{2\pi^2 E}{\sigma_Y}} \quad \text{Ecuación 46}$$

3. Si  $(KL/r) < (KL/r)_c$ , se utiliza el criterio de Johnson, de lo contrario, el criterio de Euler. En este diseño, las columnas se evaluaron bajo el criterio de Johnson.

4. Se determina la carga crítica ( $P_{CR}$ ) y el esfuerzo admisible ( $\sigma_{adm}$ )

Criterio de Johnson:

$$P_{CR} = A_s \sigma_Y \left[ 1 - \frac{\sigma_Y \left( \frac{K_c L}{r} \right)^2}{4\pi^2 E} \right] \quad \text{Ecuación 47}$$

$$\sigma_{adm} = \frac{\left[ 1 - \frac{\left( \frac{K_c L}{r} \right)^2}{\left( \frac{K_c L}{r} \right)_c^2} \right] \sigma_Y}{\left\{ \left( \frac{5}{3} \right) + \left[ \frac{\left( \frac{3}{8} \right) \left( \frac{K_c L}{r} \right)}{\left( \frac{K_c L}{r} \right)_c} \right] - \left[ \frac{\left( \frac{K_c L}{r} \right)^3}{8 \left( \frac{K_c L}{r} \right)_c^3} \right] \right\}} \quad \text{Ecuación 48}$$

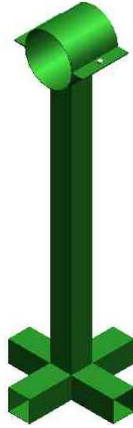
5. Si  $\sigma_{adm} < \sigma_Y$ , cumple, si no, se repite el proceso con una nueva sección.

Evaluados los cálculos, los soportes del sistema estarán constituidos por tubos cuadrados de 1/8" X 2" y 1/8" X 4" para la línea 1 y 2 respectivamente. El material de construcción será acero estructural A-36. Los resultados se muestran a continuación.

**Tabla 28. Soportes de la red de tubería.**

Sección	Área (mm <sup>2</sup> )	KL/r	(KL/r) <sub>c</sub>	P <sub>cr</sub> (kN)	σ <sub>adm</sub> (kPa)
1/8" X 2"	590	43,3	125,6	139.1	134
1/8" X 4"	1221	21	125,6	300	143

**Figura 56. Soporte de la red de tubería.**



Fuente: El autor.

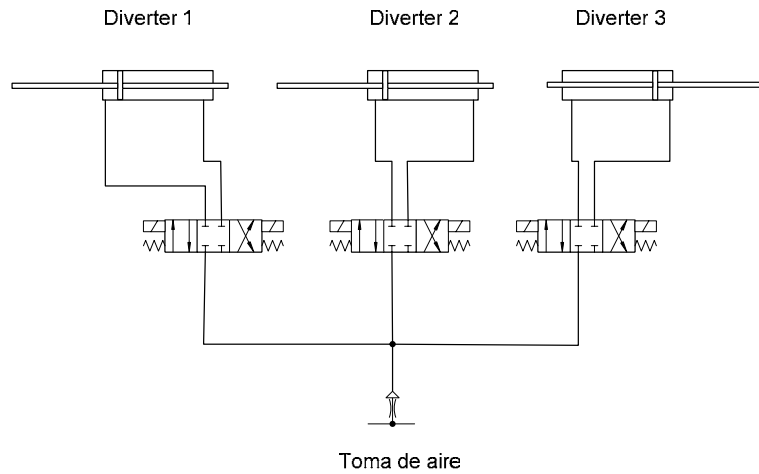
### **5.3.6. Sistema neumático.**

La velocidad de la placa desviadora juega un papel muy importante, ya que un menor tiempo de transición disminuye la incertidumbre del diverter. En nuestro caso, el período de transición debe ser inferior a 50 ms en los diverter 1 y 2, y 150 ms para el diverter 3.

Además, es de resaltar que la velocidad de la placa debe ser la misma en los dos sentidos. Por tal motivo, se seleccionó un actuador de doble vástago el cual estará ubicado en el centro de la placa desviadora.

Cada sistema de desviación es controlado independientemente gracias a que cada uno estará dotado de una válvula de una válvula 4/3 accionada por solenoide y centrada por resortes. El esquema del sistema se muestra a continuación.

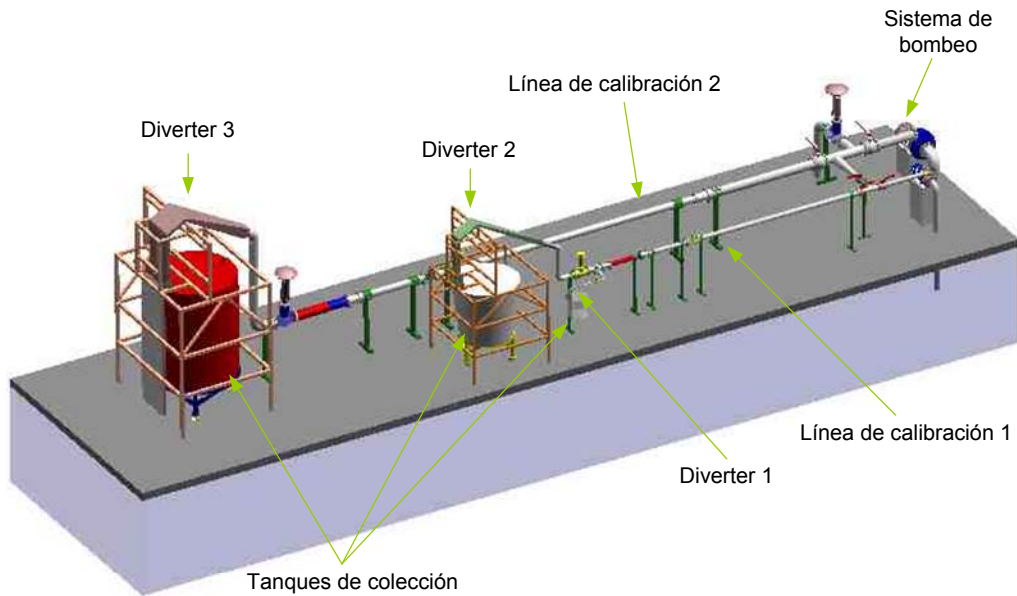
**Figura 57. Sistema neumático**



Fuente: El autor

Uniendo todos los elementos mencionados anteriormente, la disposición final del banco de calibración será como se muestra en la figura 58.

**Figura 58. Banco de calibración.**

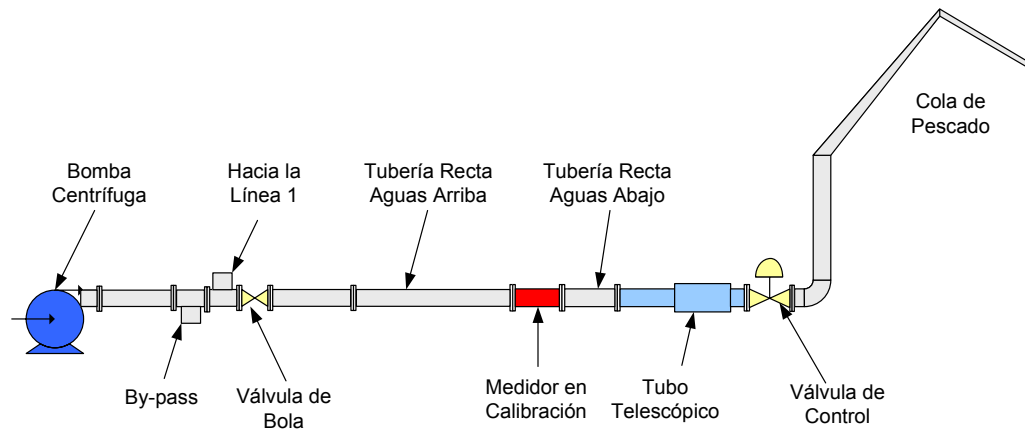


Fuente: El autor

#### 5.4. DETERMINACIÓN DE LAS PÉRDIDAS DEL SISTEMA.

Considerando que durante una prueba de calibración solo será utilizada una de las líneas, se determinó que la mayor caída de presión se presentará cuando se someta a calibración un medidor de 8" a máximo caudal (580 m<sup>3</sup>/h). El diagrama de la instalación se muestra en la siguiente figura.

**Figura 59. Diagrama de la línea 2.**



Fuente: El autor

La red de tubería será de acero inoxidable por brindar la ventaja de no presentar reducción por oxidación en su diámetro interno con el paso del tiempo.

Los tubos de diámetro de 1" hasta 6" serán de sch 40 y de 8" en adelante sch 20. La rugosidad interna de la tubería es de 0,05 mm.

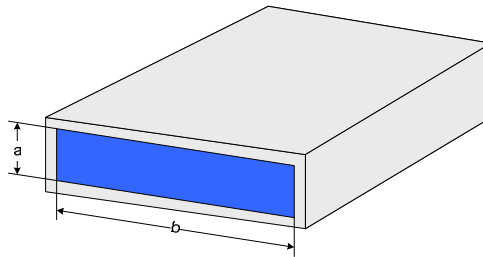
La velocidad máxima en la tubería de calibración sería de 4,7 m/s para evitar el ruido excesivo, según recomendación del paper "Estimación de la caída de presión en las válvulas de control de líquidos", Bauman; por lo tanto, los caudales para la línea 1 no superan los 150 m<sup>3</sup>/h, y para la línea 2 los 580 m<sup>3</sup>/h.

Las pérdidas en la red de tubería se estimaron utilizando la ecuación de Colebrook para el cálculo del factor de fricción (ecuación 5), y la de Darcy-Weisbach (ecuación

2) para la caída de presión, considerando que circula agua a una temperatura de 26°C.

Las pérdidas en las secciones rectangulares de área constante se calcularon bajo el concepto de radio hidráulico, que en nuestro caso, corresponde a la mitad de la altura ( $R_H = a/2$ ). El diámetro equivalente se calcula según la ecuación 11.

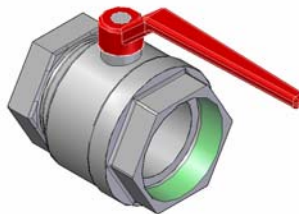
**Figura 60. Diámetro equivalente.**



Fuente: El autor

El bloqueo del fluido en una línea determinada se realizará a través de válvulas de bola de cierre rápido ya que ofrecen facilidad de operación y buena hermeticidad. Su coeficiente de resistencia se calcula como  $K = 3f_T$

**Figura 61. Válvula de bola.**



Fuente: El autor

La caída de presión de la válvula de control de caudal se determinó en función de dos parámetros que son la velocidad en el tubo con máximo flujo de diseño y la máxima pérdida por fricción en el tubo y caída en la bomba (reducción de la carga

de la bomba entre cero y máximo flujo de diseño). Para estimar su valor, inicialmente se les asignó un  $\Delta p$  de 15 psi (conservativo) y se determinó un valor de  $C_v$ , el cual indica el caudal de agua a 60 °F, en gpm, que pasará por la válvula totalmente abierta con una diferencia de presión de 1 psi entre las bridas de entrada y salida.

$$C_v = Q \sqrt{\frac{\rho}{62,4\Delta p}} \quad \text{Ecuación 49}$$

Este valor de  $C_v$  es comparado con los  $C_v$  suministrados por los fabricantes de las válvulas, el cual debe ser menor que el calculado. Escogida la válvula, el  $\Delta p$  se calcula con la siguiente expresión:

$$\Delta p_v = \frac{6Sv^2}{C_v \frac{D^4}{D^4}} \quad \text{Ecuación 46}$$

Donde S corresponde a la densidad relativa en condiciones del flujo,  $\Delta p$  está dado en psi, la velocidad en ft/s y el diámetro en pulgadas.

Los coeficientes de resistencia de los diferentes accesorios se muestran en la siguiente tabla:

**Tabla 29. Factor K para accesorios en la línea 2.**

Accesorio	Característica	Factor K
Conexión en T	Flujo directo	20f
Tubo telescópico	Ensanchamiento brusco	0,0827
Tubo telescópico	Estrechamiento brusco	0,0185
Codo 90°	Estándar	30f
Codo 60°	Estándar	25f
Salida de la tubería	Con resalte	1

Implementando estas ecuaciones en hojas de cálculo del programa Excel, fue posible determinar las pérdidas totales del sistema y la potencia requerida por la bomba (BHP), la cual se calcula con:

$$BHP = \frac{Qh(ge)}{3960\eta} \quad \text{Ecuación 50}$$

Donde BPH está dado en caballos de agua, h en pies, ge - gravedad específica y  $\eta$  corresponde a la eficiencia de la bomba.

Para evitar las filtraciones de aire en la tubería de succión de las bombas por causa de los vórtices formados en el tanque de reserva, es necesario sumergir esta tubería una longitud de 1,5 m.

La carga neta positiva de succión (NPSH<sub>A</sub>) se determinó utilizando la expresión:

$$NPSH_A = \frac{2.31(p_s - p_v)}{ge} + h + h_L \quad \text{Ecuación 51}$$

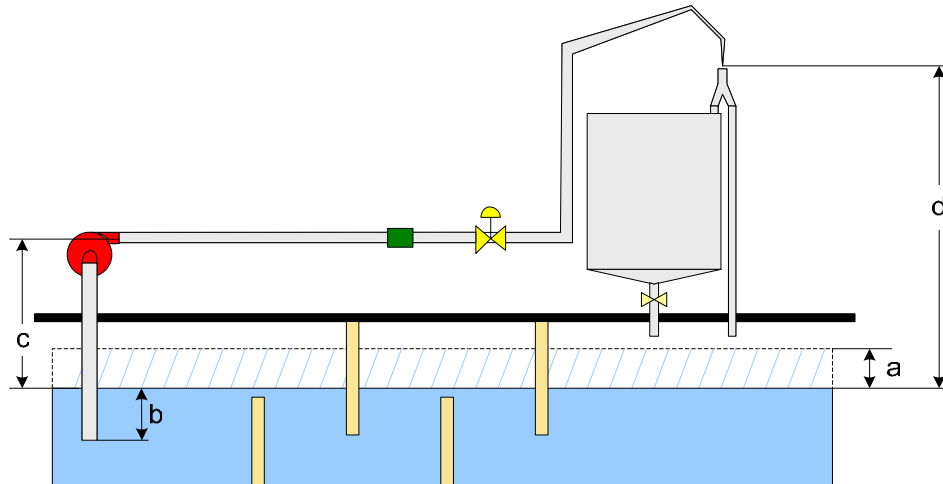
Donde  $p_s$  corresponde a la presión sobre la superficie del líquido y  $p_v$  corresponde a la presión de vapor del líquido dados en psia, y  $h$  y  $h_L$  están dados en pies.

Es importante mantener constante el caudal durante el ciclo de calibración ya que una variación provocaría errores significativos en la medición. En el sistema, el cambio de nivel en el tanque de reserva durante el período de prueba sería la variable a controlar, ya que todas las demás se mantienen constantes, si se considera un bombeo uniforme por parte del sistema de impulsión del fluido.

Se determinó una variación de 0,1 metros en la carga estática como límite para la situación crítica. Esta se presentaría cuando se haga fluir el máximo caudal por la tubería de calibración de la línea de 8" (580 m<sup>3</sup>/h). Este caudal durante 50 segundos que es el máximo tiempo de prueba, desplazaría del tanque de reserva un total de 8 m<sup>3</sup> de agua. Las dimensiones del tanque corresponderían a 13 metros a lo largo y 6 metros a lo ancho del banco con una profundidad de 2 metros para una capacidad

de almacenamiento de 156 m<sup>3</sup>. El movimiento del agua dentro del tanque sería atenuado por baffles como muestra la figura 62.

**Figura 62. Carga estática.**



Fuente: El autor

**Tabla 30. Carga estática.**

Línea	a (mm)	b (mm)	c (mm)	d (mm)
1	despreciable	1500	2100	3400
2	100	1500	2100	5300

**Tabla 31. Pérdidas totales del sistema y potencia requerida por la bomba.**

Pérdidas totales m H <sub>2</sub> O	Potencia de la bomba BHP	NPSH <sub>A</sub> (m)
23,4	58,16	6,8

**Tabla 32. Cálculo de pérdidas de la línea de calibración 1.**

Elementos	Longitud (m)	Cantidad	Factor K	Caída de presión (m H <sub>2</sub> O)
Tubería recta 4"	7,110			1,426
Tubería 4" salida de la bomba	1,000			0,362
Succión, 5"	3,500			0,399
Sección rectangular 350 x 46	2,605			0,125
Tubo telescópico	1,400			0,281
Válvula reguladora de caudal		1		6,000
Medidor 1"		1		2,812
Boquilla				0,740
Válvulas apertura-cierre 4"		2	0,106	
Codo 60° 4"		1	0,443	
Codo 90° 5"		1	0,510	
Codos 90° 4" (estancar)		1	0,532	
Codo 60° usando radio equivalente 350 x 46		2	0,900	
Accesorio de entrada		1	0,500	
Accesorio de salida		1	1,000	
Accesorio en T DIRECTO		1	0,349	
Sección de transición de cuadrada a rectangular (asumida como cambio gradual de sección)			0,012	

<b>CAÍDA DE PRESIÓN DINÁMICA TOTAL</b>	<b>15,8</b>	<b>m H<sub>2</sub>O</b>
--	-------------	-------------------------

**Tabla 33. Cálculo de pérdidas de la línea de calibración 2.**

<b>ELEMENTOS</b>	<b>Longitud (m)</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Factor K</b>	<b>Caída de presión (m H<sub>2</sub>O)</b>
Tubería recta 8"	15,110			1,300
Tubería a la salida de la bomba 8"	1,000			0,157
Succión, 10"	3,800			0,190
Sección rectangular 806 x 80	2,605			0,063
Tubo telescópico	1,400			0,120
Boquilla				1,940
Válvulas de apertura-cierre 8"		2	0,091	
Codo 90° 10"		1	0,457	
Codos 90° 8" (estándar)		1	0,457	
Codo 60° usando radio equivalente 806 x 80		2	0,900	
Codos 60° 8"		1	0,381	
Accesorios de entradas		1	0,500	
Accesorio de salida		1	1,000	
Accesorio en T DIRECTO		2	0,609	
Válvula reguladora de caudal 8"		1		7,100
Medidor 8"		1		2,812
Sección de transición de cuadrada a rectangular (asumida como cambio gradual de sección)			0,072	

<b>CAÍDA DE PRESIÓN DINÁMICA TOTAL</b>	<b>18,0</b>	<b>m H<sub>2</sub>O</b>
--	-------------	-------------------------

**Tabla 34. Cálculo del NPSH y la potencia de la bomba**

Caudal en la línea de calibración	580,00 m <sup>3</sup> /h
perdidas dinámicas	17,95 m H <sub>2</sub> O
perdidas estáticas nivel superior	5,00 m H <sub>2</sub> O
perdidas estáticas nivel inferior	5,30 m H <sub>2</sub> O
Eficiencia	0,85
<b>POTENCIA DE LA BOMBA NIVEL BAJO</b>	<b>57,86 BPH</b>

Carga estática, nivel inferior	2,50 m
Presión sobre la superficie del líquido	14,43 psia
Presión de vapor del líquido	0,88 psia
pérdidas	0,24 m H <sub>2</sub> O
<b>NPSH</b>	<b>6,80 m</b>

#### 5.5. PROCEDIMIENTO DE CALIBRACIÓN DE LOS MEDIDORES.

Después de instalar el medidor de prueba en su línea correspondiente y operar las válvulas necesarias para establecer el circuito de calibración, se descarga una cantidad suficiente de líquido en el tanque de colección hasta alcanzar el umbral de operación de los mecanismos de pesaje, con el fin de eliminar los efectos de líquido residual que probablemente tienden a permanecer en el fondo del tanque o adherido a las paredes del mismo.

Posteriormente, se direcciona el flujo hacia el tanque de reserva y se ajusta el sistema en su punto de operación con ayuda de las válvulas de control. Inmediatamente se verifica que todas las variables se encuentran dentro de los límites requeridos y se procede a realizar la calibración.

El proceso de calibración para un medidor con odómetro es el siguiente:

1. Se establece el número de vueltas que va a dar el odómetro y se procede a correr el ciclo de calibración.
2. El sensor óptico (OP1) instalado en el medidor activa simultáneamente el cronómetro y el solenoide (S1) de la válvula del diverter correspondiente en el punto P0. (Ver figura 63 y 64)
3. La placa desviadora se desplaza y al pasar por el centro del chorro (P2), activa un segundo óptico (OP2) dando la orden para registrar el valor del tiempo en ese punto.
4. Al finalizar el número de vueltas del odómetro (P5), el controlador graba el valor del tiempo, desenergiza el solenoide S1 de la válvula y energiza el solenoide S2, haciendo que el deflector regrese a su posición inicial.
5. Al pasar el deflector por el centro del chorro (P7), nuevamente se activa el óptico OP2 y se graba el tiempo correspondiente.
6. Finaliza el ciclo de calibración.

Si el medidor es de pulsos, el proceso a seguir es el siguiente:

1. Se establece un tiempo de calibración y se procede a correr el ciclo desde el computador.
2. Desde el mismo instante en que se activa el ciclo en el punto P0, se registra el número de pulsos del medidor. Igualmente se activa el cronómetro y el solenoide de la válvula (S1) del diverter correspondiente.

3. La placa desviadora se desplaza y al pasar por el centro del chorro (P2), activa el sensor óptico OP2 el cual hace que la memoria del controlador grabe el valor del tiempo en ese punto.
4. Finalizado el tiempo de prueba preestablecido, se graba el tiempo transcurrido en el cronómetro en la memoria y simultáneamente se desenergiza el solenoide S1 de la válvula y se energiza el solenoide S2, retornando el deflector a su posición inicial.
5. Al pasar el deflector por el centro del chorro (P7), se graba el tiempo correspondiente y se detiene el registro de conteo de pulsos emitidos por el medidor.
6. Finaliza el ciclo de calibración.

Cuando las oscilaciones en el tanque de colección han desaparecido, se mide la temperatura dentro del tanque y el valor de la masa final es registrado. Posteriormente el tanque es drenado.

Este procedimiento se debe realizar un mínimo de dos veces por caudal de prueba. Debe incluir el caudal máximo y mínimo permitido por el medidor y por lo menos dos puntos entre su rango de operación, según recomendación de la norma API 5-3.



## 5.6. INCERTIDUMBRE DEL BANCO.

### 5.6.1. Factores que afectan la estimación de la incertidumbre.

El sistema gravimétrico estático mide directamente el flujo másico definido como:

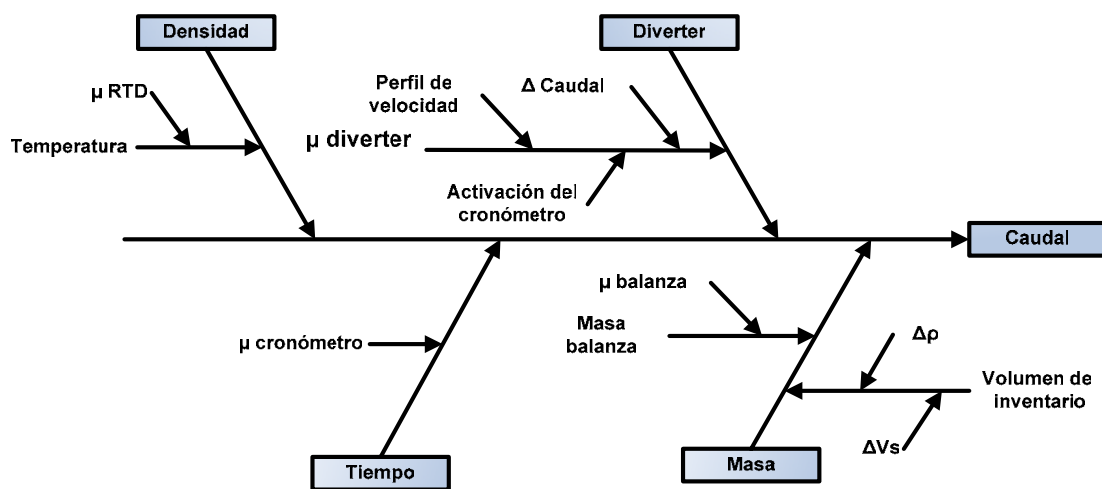
$$Q_M = \frac{M_M}{\Delta t} \quad \text{Ecuación 52}$$

Donde  $M_M$  es la masa de líquido colectado durante el ciclo de calibración durante el tiempo  $\Delta t$ . El caudal es deducido de dividir la masa por la densidad del líquido calculado a la temperatura a la que se encuentra cuando pasa por el medidor. Entonces:

$$Q = \frac{Q_M}{\rho} = \frac{M_M}{\rho \Delta t} \quad \text{Ecuación 53}$$

Cada una de las variables implica una incertidumbre en su medición. El siguiente esquema (figura 65) muestra las variables implicadas en la estimación de la incertidumbre.

Figura 65. Representación gráfica del análisis de incertidumbre.



Fuente: El autor

**Medición de la masa de líquido colectado:** Considerando que no existen fugas en el sistema, la masa que pasa a través del medidor, es igual a:

$$m = m_B + m_S \quad \text{Ecuación 54}$$

Donde  $m_B$  es la masa de líquido colectado en el tanque indicada por la balanza con una incertidumbre  $\mu_B$  y  $m_S$  corresponde a los incrementos de almacenamiento de masa en las tuberías del sistema por variaciones en la temperatura (volumen de inventario).

Los cambios de temperatura producen cambios en la densidad del fluido y en volumen del recipiente contenedor. Están dados por:

$$m_S = \Delta(\rho V_S) = V_S \Delta\rho + \rho \Delta V_S \quad \text{Ecuación 55}$$

Donde  $V_S$  es el volumen dentro de la tubería. La incertidumbre debido a estos efectos de almacenamientos se debe a la inestabilidad en la temperatura. Para asegurar que estos efectos sean despreciables, la variación de la temperatura durante el ciclo de calibración no debe ser superior a 0,5 K. Para esta variación, el cambio de volumen relativo en la línea  $3\alpha\Delta T$ , es  $2,55 \times 10^{-6} V_S$ , para un  $\alpha = 17 \times 10^{-6}/K$  (para acero inoxidable). Esto corresponde a una incertidumbre de 0,000255%. El cambio en la densidad del agua es  $0,0001\rho$ , lo que produce una incertidumbre de 0,01%.

La corrección por peso aparente no se tiene en cuenta, ya que la calibración de la balanza se haría en el sitio y las cantidades a pesar son suficientemente altas como para ser afectadas por este fenómeno.

Por lo tanto, la incertidumbre debido a la medición de la masa dependerá solamente de la incertidumbre de la balanza. Se debe seleccionar un buen sistema de pesaje ya que representa un alto porcentaje en la estimación de la incertidumbre del banco.

**Medición del tiempo:** En la medida en que se tenga un buen sistema de pesaje, la influencia de la medición del tiempo se hace menor, sin embargo, su contribución es de gran importancia. Una manera de disminuir su influencia es incrementando los períodos de calibración, pero a expensas de tanques de colección y balanzas más grandes, por lo que se necesita encontrar un equilibrio.

Debido a que la medición del tiempo no depende de ninguna otra variable, la incertidumbre inherente a la medición del tiempo depende solamente de la provocada por el instrumento de medición.

**Medición de la densidad:** Para obtener el caudal conocida la rata másica, es esencial conocer la densidad del líquido que atraviesa el medidor. Según la norma ASME MFC-9M (Measurement of liquid flow in closed conduit by weighing method), si el líquido es razonablemente puro y limpio, es aceptable medir su temperatura y derivar la densidad de una tabla de propiedades físicas del líquido. En el caso del agua, teniendo en cuenta la pequeña desviación de la densidad a temperaturas cercanas a la ambiental, una variación de 0,5 °C asegura un error menor a  $10^{-4}$  en el cálculo de la densidad. Esto implica que la incertidumbre concerniente a la medición de la densidad depende de la precisión del instrumento con el que se mida la temperatura. Utilizando el programa Curvexpert, se calculó la ecuación que describe el comportamiento de la densidad del agua cuando varía la temperatura entre 0°C y 35°C.

$$\rho = k_1 + k_2T + k_3T^2 + k_4T^3 + k_5T^4 + k_6T^5 \quad \text{Ecuación 56}$$

Donde:

$k_1 =$	3.717514e-10	$k_3 =$	0.22672514	$k_5 =$	2.8247531e-06
$k_2 =$	-9.8631104	$k_4 =$	-0.0012443924	$k_6 =$	-2.3586061e-09

**Incertidumbre del diverter:** Recordando lo mencionado en el capítulo 3, el funcionamiento del diverter provoca un error que debe ser tenido en cuenta. Según la regla de operación del diverter (figura 28), estas áreas a cada lado después de ser activado el cronómetro deberían ser iguales y anularse, pero en la práctica no es así. Los volúmenes A y B no se anulan y la diferencia entre ellos depende principalmente del perfil de velocidad del chorro, la velocidad del diverter, la duración del período de arranque y del momento de activación del cronómetro en el instante  $t_1$ . De igual manera, C y  $D_V$  no se cancelan y se determinan por el perfil de velocidad, la velocidad del diverter, la duración del tiempo de cierre y del instante  $t_4$  en el que se detiene el cronómetro.

La duración efectiva del período de colección debería posicionarse entre el período de flujo constante,  $t_C = t_3 - t_2$ , y la duración del intervalo total durante el cual el tanque recibe fluido es  $t_T = t_5 - t_0$ . Como se muestra en la figura 28, el volumen A y  $D_V$  corresponde al excedente de líquido colectado antes y después de la medición del intervalo  $t_M$ , y los volúmenes B y C son el déficit de líquido colectado durante el tiempo de medición. En general, estos dos grupos de volúmenes no son iguales y por lo tanto no se anulan, lo que provoca un error en el diverter. Este error,  $t_{err}$ , puede ser definido como la diferencia entre el tiempo efectivo de colección y el tiempo de colección, entonces:

$$t_{err} = t_{eff} - t_M = \frac{(A + D_V - B - C)}{Q_T} \quad \text{Ecuación 57}$$

En forma adimensional:

$$ERROR = \frac{t_{err}}{t_M} = \frac{(A + D_V - B - C)}{Q_T t_M} \quad \text{Ecuación 58}$$

La disminución, e incluso, la completa eliminación de este error, puede conseguirse si:

- La velocidad del chorro sea constante a lo ancho de la boquilla,
- El perfil de velocidad del chorro sea simétrico,

- La velocidad del diverter sea simétrica, y
- La no desalineación entre la línea central del diverter y la línea central del chorro.

Cuando todos estos factores se cumplen a cabalidad, la regla de operación del diverter se cumple y las curvas  $C_O$  y  $C_C$  son simétricas haciendo que  $A + D_V = B + C$ , anulando el error. Sin embargo, en la práctica tales condiciones son difíciles de conseguir.

Para minimizar este error se puede:

- Incrementar el tiempo de medición  $t_M$ , o
- Ajustar la posición de los sensores que activan el cronómetro en los instantes  $t_1$  y  $t_4$  con respecto al flujo que sale de la boquilla, según recomendación de la norma ASME-9M.

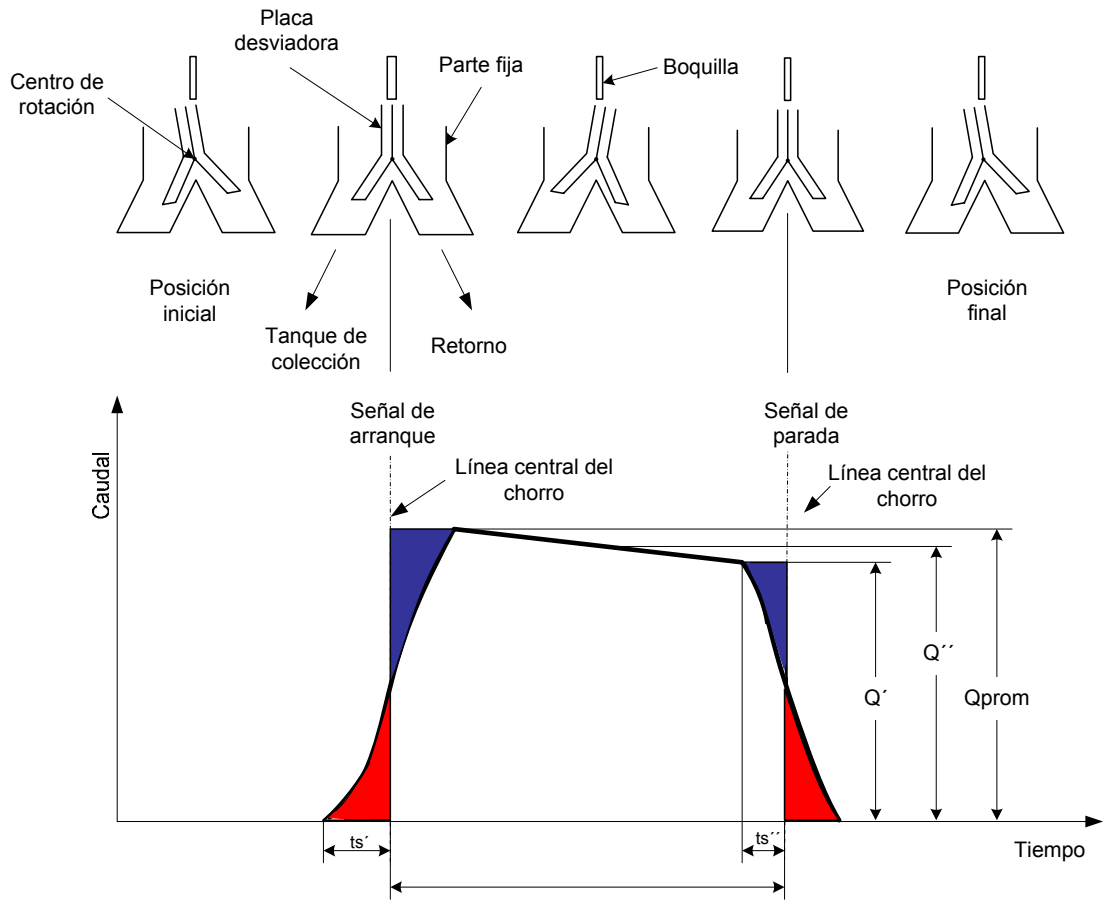
Se optó por la segunda alternativa, ya que la primera requiere incrementar el volumen de los tanques de colección, lo que repercute en balanzas de mayor capacidad.

Considerando la velocidad del diverter constante y un flujo simétrico a la salida de la boquilla durante el período de desviación, es posible estimar su incertidumbre. El proceso de desviación, representado por la figura 66, está dado por la ecuación 59. Entonces<sup>7</sup>:

$$C_{div} = \frac{t'_S - t''_S}{t_M} + \frac{(Q' - Q'')(t'_S - t''_S + \bar{t}_S)}{\bar{Q}t_M} + \frac{(Q_{iZQ} - Q_{DER})\bar{t}_{CHORRO}}{2\bar{Q}t_M} \quad \text{Ecuación 59}$$

<sup>7</sup> POESCHEL, A unique fluid diverter design for water flow calibration facilities.

Figura 66. Características principales del proceso de desviación.



Fuente: El autor

Donde las variables de la ecuación se definen como:

$C_{DIV}$  - Factor de corrección del diverter,

$t'_s, t''_s$  - tiempo de señal de inicio y parada respectivamente, al tiempo cuando la placa desviadora está pasando por la línea central del chorro,

$\bar{t}_s$  - corresponde al promedio entre  $t'_s$  y  $t''_s$ ,

$Q', Q''$  - caudal al comienzo y respectivamente, al final de la medición,

$\bar{Q}$  - Promedio de la rata de flujo entre  $Q'$  y  $Q''$ ,

$Q_{IZQ}, Q_{DER}$  - parte de la rata de flujo izquierda y respectivamente, derecha de la línea central del chorro,

$\bar{t}_{CHORRO}$  - promedio del tiempo de transición.

El factor de corrección del diverter  $C_{div}$  abarca tres componentes representados en los tres términos de la ecuación. El primero, considera la diferencia entre los tiempos  $t'_s$  y  $t''_s$ , es el principal componente y depende de la precisa sincronización de las señales de arranque y parada simétricas con la línea central del chorro. El segundo término de la ecuación considera la diferencia entre el caudal al comienzo y al final de la medición. El tercer término describe la influencia de una asimetría en el perfil de velocidad a lo ancho del chorro. Debido a las consideraciones tomadas, este término se hace cero.

### 5.6.2. Modelo matemático.

Teniendo en cuenta todas las anteriores consideraciones, nuestro modelo matemático queda expresado como:

$$Q = \frac{m}{(k_1 + k_2 T + k_3 T^2 + k_4 T^3 + k_5 T^4 + k_6 T^5) \Delta t} * (1 + C_{diverter}) \text{Ecuación 60}$$

Los cálculos de estimación de la incertidumbre del banco fueron realizados utilizando el software Math Cad® (ver anexo 1). Las tablas 35, 36 y 37 muestran los resultados de los cálculos para la situación más crítica en cada diverter.

**Tabla 35. Estimación de la incertidumbre del diverter 1.**

N	Magnitud de entrada ( $X_i$ )	Valor estimado ( $x_i$ )	Fuente de inf.	Incertidumbre original	Tipo distribución	Incertidumbre estándar $u(x_i)$	Coeficiente de sensibilidad ( $c_i$ )	Contribución $u_i$ (y)		Grados de libertad
									%	
1	Masa	90 kg	C.C.	1 kg	B, rectangular	0,577 kg	2,01E-05 m <sup>3</sup> /ks.s	1,15E-05	99,99	Infinito
2	Tiempo	80 s	C.C.	0,001 s	B, rectangular	0,00057	3,48E-07 m <sup>3</sup> /s <sup>2</sup>	-1,5E-08	1,7E-4	Infinito
3	Diverter			5,80E-05	B, rectangular	5,80E-05	1,31E-03 m <sup>3</sup> /s	1,1E-10	7,73E-05	Infinito
4	Temp.	299 K	C.C.	0,1 K	B, rectangular	0,057	-2,612E-05 m <sup>3</sup> /s.K	2,0E-08	3E-04	Infinito

<b>Mejor estimado</b>	5,5	m <sup>3</sup> /h
-----------------------	-----	-------------------

<b>U</b>	0,1 %	<b>Grados de libertad</b>	50,01
----------	-------	---------------------------	-------

C.C. Certificado de calibración

**Tabla 36. Estimación de la incertidumbre del diverter 2.**

N	Magnitud de entrada (Xi)	Valor estimado (xi)	Fuente de inf.	Incertidumbre original	Tipo distribución	Incertidumbre estándar u(xi)	Coficiente de sensibilidad (ci)	Contribución ui (y)		Grados de libertad
1	Masa	2000 kg	C.C.	2 kg	B, rectangular	1,155	2,01E-02 m <sup>3</sup> /ks.s	9,6E-03	99	Infinito
2	Tiempo	50 s	C.C.	0,001 s	B, rectangular	0,00057	-8,03E-01 m <sup>3</sup> /s <sup>2</sup>	-4,6E-04	0,2	Infinito
3	Diverter			1,39E-05	B, rectangular	1,39E-05	0,04 m <sup>3</sup> /s	5,5E-04	0,3	Infinito
4	Temp.	299 K	C.C.	0,1 K	B, rectangular	0,057	1,07E-02 m <sup>3</sup> /s.K	6,2E-04	0,5	Infinito

<b>Mejor estimado</b>	144,5	m <sup>3</sup> /h
-----------------------	-------	-------------------

<b>U</b>	0.16 %	<b>Grados de libertad</b>	52,22
----------	--------	---------------------------	-------

C.C. Certificado de calibración

**Tabla 37. Estimación de la incertidumbre del diverter 3.**

N	Magnitud de entrada (Xi)	Valor estimado (xi)	Fuente de inf.	Incertidumbre original	Tipo distribución	Incertidumbre estándar u(xi)	Coeficiente de sensibilidad (ci)	Contribución ui (y)		Grados de libertad
									%	
1	Masa	8050 kg	C.C.	5 kg	B, rectangular	2,888	0,0201m <sup>3</sup> /ks.s	9,62E-03	89,45	Infinito
2	Tiempo	50 s	C.C.	0,001 s	B, rectangular	0,00057	-3,21 m <sup>3</sup> /s <sup>2</sup>	-1,85E-03	3,36	Infinito
3	Diverter			6,93E-03	B, rectangular	6,93E-03	0,161 m <sup>3</sup> /s	1,11E-03	1,21	Infinito
4	Temp.	299 K	C.C.	0,1 K	B, rectangular	0,057	0,0428 m <sup>3</sup> /s.K	2,47E-03	5,97	Infinito

<b>Mejor estimado</b>	581,47	m <sup>3</sup> /h
-----------------------	--------	-------------------

<b>U</b>	0,072%	<b>Grados de libertad</b>	62,11
----------	--------	---------------------------	-------

C.C. Certificado de calibración

## 5.7. SELECCIÓN DE EQUIPOS.

### 5.7.1. Válvulas reguladoras de caudal.

Operando conjuntamente las válvulas es posible encontrar el caudal necesario para la calibración de un medidor sin alterar demasiado el punto de operación del sistema de bombeo. Para tal fin, se requeriría de 4 válvulas, una por cada diverter mas una adicional para la línea de bypass.

Las válvulas de control pueden ser de flujo lineal, cuando el caudal que pasa por la válvula es proporcional a la elevación del obturador; o de igual porcentaje o proporcionales, cuando en cualquier posición, ocurre el mismo porcentaje de cambio en el caudal con la misma cantidad de movimiento del macho.

Se seleccionaron válvulas de control proporcional que son las que se utilizan para control de presión o de flujo o cuando varía mucho la caída de presión en la válvula; las lineales son utilizadas preferentemente para control de nivel de líquido.

Después de realizar un sondeo por los diferentes proveedores de válvulas automáticas en Colombia, se escogieron las válvulas FISCHER como las más apropiadas para nuestro objetivo. Sus características son:

**Figura 67. Válvula de control de flujo automática**



Fuente: [www.emersonprocess.com](http://www.emersonprocess.com)

**Tabla 38. Coeficiente de flujo de las válvulas.**

Tamaño de la válvula	1"	4"	8"
C <sub>v</sub> (gpm)	17,2	224	818

Características:

- Posicionador electro neumático de acción inversa
- Fugas permitidas según norma ANSI B16-104-1976: Clase I
- Sistema de control final: Flo Vue
- Presión nominal de alimentación: 4 o 6 bar
- Protocolo de comunicaciones: HART
- Proveedor: Instrumentos y Controles, Bogotá

#### **5.7.2. Bomba centrífuga.**

Es la encargada de suministrar el flujo a las líneas de calibración. Se seleccionó una bomba de 75 hp marca Barnes, sería suministrada por Penagos, Bucaramanga. Sus características son:

**Figura 68. Bomba centrífuga.**



Fuente: [www.Barnes.com](http://www.Barnes.com)

Características:

- Modelo GSM 8E-75-4P

- Potencia motor: 75 hp
- Voltaje: 220/440
- RPM: 1750

### 5.7.3. Actuadores neumáticos.

Su función es desplazar la palca desviadora a la posición requerida durante la prueba.

**Figura 69. Actuador neumático**



Fuente: [www.boschrexroth.com](http://www.boschrexroth.com)

Las características de los actuadores son:

**Tabla 39. Características de los actuadores**

Características	Diverter 1	Diverter 2	Diverter 3
Referencia	0822390702	0822391704	0822393704
Presión de trabajo (bar)	1 a 10	1 a 10	1 a 10
Fuerza teórica (push / pull) N	106 / 91	164 / 137	422 / 364
Diámetro del cilindro (mm)	16	20	32
Velocidad del pistón (m/s)	1	1	0,7
Longitud del vástago (mm)	15	25	25

Los actuadores seleccionados son marca BOSCH REXROTH y distribuidos por SUMEQUIPOS Ltda., Bucaramanga

#### **5.7.4. Válvula electro neumática.**

Es la encargada de direccionar el flujo de aire hacia el actuador neumático. Las válvulas serían marca BOSCH REXROTH, suministradas por SUMEQUIPOS Ltda. Sus características son:

- Presión de trabajo:
- Alimentación: 110 V.
- Cuerpo de la válvula: 4vías, 3 posiciones centrada por resorte

#### **5.7.5. Cronómetro.**

Es el dispositivo encargado de determinar el tiempo de calibración requerido en el cálculo del caudal que pasa a través del medidor en prueba. Para esta labor se escogió un Electronic Digital Timer ofrecido por la empresa ABTEK CONTROLS.

Características:

- Referencia: TA0801-RS232.
- Rango de aplicación: de 1 mS a 9 999 999 horas
- Potencia de salida: 12 V DC
- Display de 7 dígitos

#### **5.7.6. Sensores de temperatura.**

Encargados de tomar la variable física de temperatura y transformarla en una señal eléctrica. Para esta labor se seleccionaron todos los sensores RTD's del tipo PT 100, la única variable entre ellos es la geometría, ya que esta depende de la instalación en cada un de las tuberías.

Características:

- Descripción: RTD's (Resistance Detector Temperature), PT 100, elaboradas de platino. Diámetro de 1/8", de tres hilos y 2 m de cable en teflón para conexión.
- Características: alta exactitud. Rango de operación: 0-100° C.
- Proveedor: TERMOCUPLAS Ltda. Medellín.

**Tabla 40. Características y función de las RTD's seleccionadas.**

Cantidad	Longitud	Función
3	2"	Determinación de la temperatura del líquido aguas abajo del medidor en la línea 1 y el tanque de colección
1	4"	Determinación de temperaturas del líquido aguas abajo del medidor en la línea 2.

#### 5.7.7. Sensor óptico.

Se compone de un sensor de fibra óptica que envía una señal de voltaje a un amplificador donde se amplifica la señal enviada por el sensor y de desde allí se transmite al módulo digital cuando ha encontrado el reflectivo. Serían suministrados por la empresa Sincrón de la ciudad de Cali.

- Referencia: UZFRT8
- Cantidad: 4

#### 5.7.8. Balanzas y celdas de carga.

Son los instrumentos de más importantes en el banco y son los encargados de determinar el peso del líquido colectado en los tanque de pesaje. Cada tanque de colección estaría dotado de su sistema de pesaje. Para la línea 1 corresponderían balanzas de plataforma, en tanto que para la línea 2, debido al tamaño y capacidad del tanque, se emplearían celdas de carga. Los sistemas de pesaje serían marca Metter Toledo, suministrados por Vansolix, Colombia. Las características de cada un de las se mencionan a continuación:

### **Balanza tanque 1**

- Referencia: Spider 1-35
- Capacidad: 100 kg
- Precisión: 10 g
- Dimensión del plato: 30 cm X 40 cm
- Protección industrial: IP 56
- Interfase bidireccional: RS232C
- Temperatura admisible: -10 °C a 40 °C
- Alimentación: 110 V, 60 Hz

### **Balanza tanque 2**

- Referencia: 2158 con terminal Spider 1
- Capacidad: 5000 kg
- Precisión: 1 kg
- Dimensión del plato: 1,5 m X 1,5 m
- Protección industrial: IP 65
- Interfase bidireccional: RS232C
- Temperatura admisible: -10 °C a 40 °C
- Alimentación: 110 V, 60 Hz

### **Celdas de carga:**

- Kit de módulos de pesaje: modelo Flexmount, ref. 0958
- Capacidad del sistema: 30000 lb
- Capacidad de cada módulo: 10000 lb
- Precisión: 5 kg
- Protección industrial: IP 65
- Terminal: Panther Plus

- Protocolo de comunicaciones: RS232C

#### **5.7.9. Módulos de entradas digitales y entradas análogas.**

Estos módulos reciben y acondicionan las señales eléctricas provenientes de los sensores de temperatura (en forma análoga), la balanza y el óptico (en forma digital). La clase de módulos seleccionados son: Módulo Temperatura o SNAP AIRTD y módulo óptico o SNAP IDC5 FAST. Debido al número de sensores, se requerirán dos módulos para las RTD y tres módulos para los ópticos.

#### **5.7.10. Módulos de salidas digitales.**

Estos módulos son mecanismos que trabajan en dos estados: on-off y se usarán para la manipulación de las electro válvulas. La clase de módulo de seleccionado es el SNAP OAC5 (12 – 280 V AC). Se requerirán dos de estos módulos.

#### **5.7.11. Módulo de puertos seriales.**

Este módulo recibe la señal proveniente de las balanzas y celdas de carga, las cuales se comunican a través del protocolo de comunicaciones RS232C. El módulo seleccionado es el SNAP SCM 232. Se requerirá de un módulo.

#### **5.7.12. Cerebro B-3000**

Es usado para el control de módulos de entradas y salidas digitales y análogas, debe ser usado con el controlador en una comunicación serial.

Características:

- Alimentación : 5 Voltios
- Temperatura de operación : 0 y 70C
- Interfases de comunicación: RS 485/422 a dos o 4 cables.

- Velocidades de transmisión de 115200 baud.

### **5.7.13. Controlador SNAP -LCSX-PLUS**

Es el dispositivo donde reside el programa de control e intercambia continuamente datos con el cerebro B3000, este último recibe la información de los módulos para enviarlos al controlador.

Características:

- Alimentación de 5 Voltios,
- comunicación con el PC por un puerto serial RS 232 (puerto HOST).
- Puerto de comunicación con el cerebro.
- Velocidades de transmisión de 115200 baud.
- Modo de comunicación: binario o ASCII.

### **5.7.14. Fuente de alimentación.**

La fuente de alimentación para el sistema de control proporciona 5 Voltios DC cumpliendo con las especificaciones de cada uno de los dispositivos. Se seleccionó la SNAP PS5.

Características:

- Alimentación: 110V
- Salida: 5V - 4A
- Capacidad: 8 módulos digitales y 8 módulos análogos.

### **5.7.15. Base SNAP B12M**

Soporta y comunica todos los módulos con el cerebro, contiene tanto al cerebro como a los módulos de entradas y salidas, posee 12 posiciones en las cuales permite módulos mezclados análogos y digitales.

## RECOMENDACIONES

- ✓ Buscar el aval del proyecto por parte de laboratorios de medición de flujo de fluidos reconocidos internacionalmente como el Instituto de Pesquisas Tecnológicas de la Universidad de Sao Paulo en Brasil (IPT), con el cual el CDT de GAS está vinculado, con el fin de dar trazabilidad al banco y brindar seguridad a sus patrocinadores.
- ✓ Gestionar la financiación del proyecto con instituciones del estado como COLCIENCIAS y empresas del sector como ECOPETROL interesados en su ejecución.
- ✓ Asegurarse que durante el montaje del banco y en especial, en las líneas de calibración y el diverter, los empaques entre bridas no interfieran con el flujo.
- ✓ Garantizar la hermeticidad del sistema.
- ✓ No dejar el banco a la intemperie.
- ✓ Realizar la programación del banco de acuerdo a los lineamientos planteados en el proyecto.
- ✓ Adquirir los equipos con las características especificadas para no afectar en gran medida la incertidumbre total.
- ✓ Continuar realizando proyectos de investigación financiados por COLCIENCIAS que permitan la apropiación de conocimientos y desarrollo de nuevas tecnologías aplicadas al área de la metrología.

## CONCLUSIONES

Después de desarrollar el presente proyecto podemos concluir que:

- ✓ Se logró fortalecer el vínculo existente entre la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander y el Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas, obteniéndose excelentes resultados a nivel personal y profesional, reflejados en el conocimiento adquirido por ambas partes en la rama del flujo de líquidos y en la elaboración de la propuesta que será presentada ante COLCIENCIAS y ECOPETROL para su posterior financiación.
- ✓ Se diseñó un banco con capacidad de calibrar medidores de flujo de líquidos en un rango de 0,47 m<sup>3</sup>/h hasta 580 m<sup>3</sup>/h con una incertidumbre teórica inferior a 0,2%, cumpliendo con las expectativas propuestas durante la fase inicial del proyecto.
- ✓ La apropiación de nuevos conocimientos en lo que respecta a desviación de flujo de alta precisión.
- ✓ El uso de herramientas computacionales de tipo CAD y CAE juegan un papel muy importante en la etapa de modelamiento, ya que permiten la visualización del efecto producido por la variación de parámetros, facilitando de esta manera los procesos iterativos que intervienen en el diseño.
- ✓ Los sensores y dispositivos seleccionados para el sistema de control y adquisición de datos cuentan con las especificaciones necesarias para que el banco opere bajo los niveles de incertidumbre proyectados.

- ✓ El costo total del banco oscila cerca de los doscientos cincuenta y seis millones de pesos moneda colombiana (\$256`000.000,00)
  
- ✓ Los resultados obtenidos durante el desarrollo del proyecto serán publicados en la página de SINTEGAS ([www.sintegas.com](http://www.sintegas.com))

## BIBLIOGRAFÍA

- ✓ Potter Merle, wiggert David. Mecánica de Fluidos. Segunda edición. Editorial Prentice Hell, México, 1998, Capitulo 4, 7.
- ✓ Miller R. Flow Measurement Engineering Handbook. Editorial Mc Graw Hill. Capítulo 6, 14.
- ✓ ISA. Flow Measurement: Practical Guide for Measurement and Control. Segunda edición. Editorial D.W. Spitzer, New York, 2001, Capítulo 27.
- ✓ Hibbeler R. Mecánica de Materiales. Tercera edición. Editorial Prentice Hall, México, 1998, Capítulo 13.

## NORMAS

- ✓ **AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS.** Measurement of Liquid Flow in Closed Conduits by Weighing Methods. ASME/ ANSI MFC-9M -1988.
- ✓ **AMERICAN PETROLEUM INSTITUD.** Measurement of Liquid Hydrocarbons by Turbine Meters. API 5-3

## APÉNDICES

## APÉNDICE A MEDIDORES DE FLUJO.

### A.1. GENERALIDADES.

Una curva de calibración (o curva característica) es un gráfico que muestra como varía el desempeño de un medidor con la tasa de flujo, con la velocidad, o con el número de Reynolds.

Generalmente, esta curva se obtiene por medio de una calibración, es decir, a través de una serie de pruebas a lo largo de un rango de operación del medidor, comparando las lecturas mostradas por el instrumento (volumen, masa o velocidad) contra los valores obtenidos a través de un medidor de clase de exactitud más elevada (medidores maestros).

### A.2. INDICE DE DESEMPEÑO.

Existen varios tipos de índice de desempeño, pero solamente cuatro son de uso común, estos son:

#### A.2.1. Coeficiente de descarga.

El coeficiente de descarga  $C$  se define para medidores de flujo como:

$$C = \frac{Q_i}{Q_t}$$

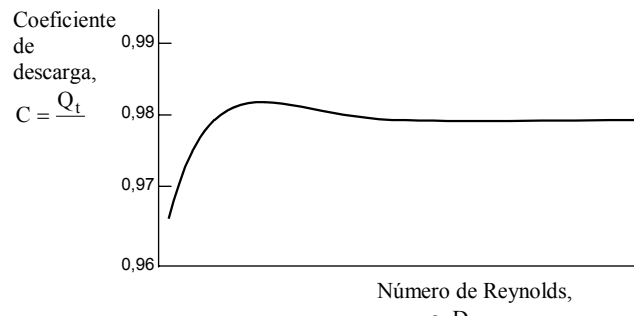
**Ecuación 3**

y para medidores de velocidad, como:

$$C = \frac{v_t}{v_i} \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde  $Q_t$  y  $v_t$  son comúnmente llamados *de tasa de flujo convencionalmente verdadera y velocidad convencionalmente verdadera*, respectivamente, indicando que estos valores se obtienen a partir de medidores maestros, normalmente utilizados en calibración de otros medidores. Los parámetros  $Q_i$  y  $v_i$  representan, respectivamente, la tasa de flujo y la velocidad indicadas por el medidor, o calculadas a partir de la lectura en los medidores.

**Figura 70. Ejemplo de una curva característica basada en el coeficiente de descarga de un medidor de rata de flujo.**



El coeficiente de descarga, que generalmente es menor que la unidad, es ampliamente aplicado en el caso de medidores de presión diferencial. Normalmente, el coeficiente de descarga,  $C$ , es graficado con relación al número de Reynolds calculado para la garganta del medidor,  $Re_d$ , aunque debe ser utilizado, siempre que sea posible el número de Reynolds basado en el diámetro de la tubería,  $Re_D$ .

#### **A.2.2. Error de indicación del medidor.**

El término error del medidor ( $\epsilon$ ), es utilizado en conjunto con medidores volumétricos cuya indicación es dada directamente en unidades de volumen, principalmente medidores de desplazamiento. Esto se define como:

$$\varepsilon = \frac{V_i - V_t}{V_t} \quad \text{Ecuación 5}$$

donde  $V_t$  e  $V_i$  indican, respectivamente, el volumen convencionalmente verdadero y el indicado. Generalmente, el error se expresa en términos de porcentaje del valor verdadero convencional

### A.2.3. Factor F del medidor.

El factor del medidor,  $F$ , es un término aplicado principalmente con medidores utilizados para medir volumen total y, especialmente, con medidores de tipo turbina y desplazamiento positivo. Desafortunadamente, en el pasado cada operador utilizaba este factor de manera diferente, y eso generaba confusión. Actualmente, existe un consenso de que la correcta definición del factor del medidor sea:

$$F = \frac{V_t}{V_i} \quad \text{Ecuación 4}$$

Este valor representa el factor por el cual el volumen indicado por el medidor debería ser multiplicado a fin de obtener el "volumen verdadero".

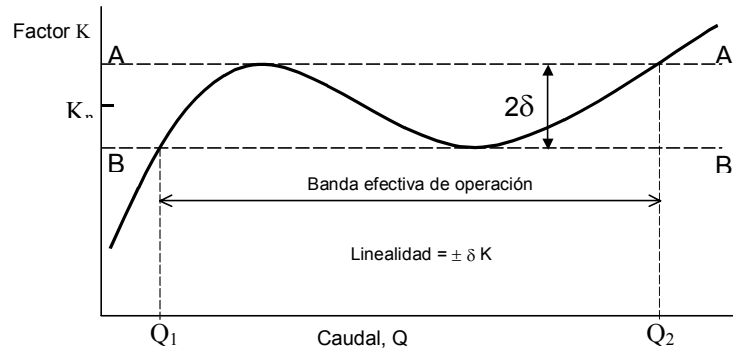
### A.2.4. Factor K.

El factor  $K$  es un término utilizado para evaluar el desempeño de medidores como turbina, por ejemplo, cuya señal de salida está disponible en forma de una serie de pulsos eléctricos, y donde, normalmente, el número de pulsos totales,  $n$ , es nominalmente proporcional al volumen de flujo total del fluido que fluye, y la frecuencia de pulsos,  $d_n/d_t$ , es nominalmente proporcional a la tasa de flujo de fluido. Entonces:

$$K = \frac{n}{V_t} \quad \text{Ecuación 5}$$

Las curvas características de medidores de tipo turbina se representan generalmente en forma de un gráfico de factor K en función de la tasa de flujo, como muestra la figura 2.

**Figura 71. Ejemplo de curva característica basada en el factor K.**



### **A.3. PROPIEDADES DE LOS ELEMENTOS DE MEDICIÓN.**

#### **A.3.1. Precisión.**

Por medio de un acuerdo internacional, la palabra “precisión” es utilizada para describir que tan discriminante un instrumento puede medir. Por ejemplo, la precisión de un cronómetro digital electrónico con lectura en milisegundos es una centena de veces mayor del cronómetro manual con graduación en décimas de segundos.

#### **A.3.2. Repetibilidad y reproducibilidad.**

La repetibilidad de un instrumento de medición es una indicación de su capacidad de lograr el mismo resultado cuando es utilizado para medir la misma cantidad varias veces sucesivamente. La repetibilidad es confundida frecuentemente con exactitud. A continuación se muestra la diferencia:

**Figura 72. Reproducibilidad y repetibilidad.**



Si un instrumento posee una repetibilidad pobre, tendrá también una exactitud pobre. Por otro lado, un factor de un medidor que presente una buena repetibilidad no significa necesariamente que presente también una buena exactitud, ya que puede estar presentando el mismo valor incorrecto repentinamente.

El término relacionado con la repetibilidad es la reproducibilidad. Este se traduce en la capacidad que un instrumento posee de lograr el mismo resultado cuando es utilizado para medir la misma magnitud en momentos diferentes y bajo condiciones diferentes.

### **A.3.3. Exactitud e incertidumbre.**

Si pensamos en repetibilidad como la capacidad de un instrumento de “contar siempre la misma historia”, exactitud sería la medida de su capacidad de “decir la verdad”.

Según la definición del VIM (Vocabulario Internacional de Metrología), exactitud se define como la cercanía entre los resultados de mediciones sucesivas de la misma magnitud por medir, efectuadas en las mismas condiciones de medición. Actualmente, el término internacionalmente aceptado para expresar la exactitud o inexactitud de una medición es la incertidumbre, la cual se considera como la media de la banda de valores dentro de la cual se espera que se encuentre el valor verdadero de la medida.

La incertidumbre, al contrario del error, puede calcularse, siendo la misma un estimativo del error.

#### **A.3.4. Banda de medición y rangeabilidad.**

Una banda de medición de un instrumento se define como la banda de trabajo del instrumento en el cual cumple los requisitos para una determinada exactitud. Esta definición se ilustra en figura 2, donde las líneas horizontales A-A y B-B representan los límites aceptables de exactitud. De esta forma, la banda de medición es de  $Q_1$  hasta  $Q_2$ . La relación  $Q_1/Q_2$  se denomina rangeabilidad de un instrumento, o, en el caso de medidores de flujo, *tumdown ratio* o simplemente *tumdown*.

#### **A.3.5. Linealidad.**

La linealidad de un instrumento indica respecto a su desempeño, cuando está trabajando en su banda efectiva de medición

## **APENDICE B.**

### **ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE LA MEDICIÓN<sup>8</sup>.**

Toda medición tiene un error correspondiente a la diferencia entre el valor medido y el valor real, provocando una incertidumbre, que de acuerdo al VIM, es un parámetro que caracteriza la dispersión de los valores que pueden ser atribuidos razonablemente al mensurando. La figura 1 muestra un procedimiento para la estimación de la incertidumbre de la medición:

#### **B.1. ASPECTOS CRÍTICOS EN LA ESTIMACIÓN DE LA INCERTIDUMBRE DE LA MEDICIÓN**

##### **B.1.1. El Mensurando.**

El propósito de una medición es determinar el valor de una magnitud, llamada mensurando. El mensurando es el atributo sujeto a medición de un fenómeno, cuerpo o sustancia que puede ser distinguido cualitativamente y determinado cuantitativamente.

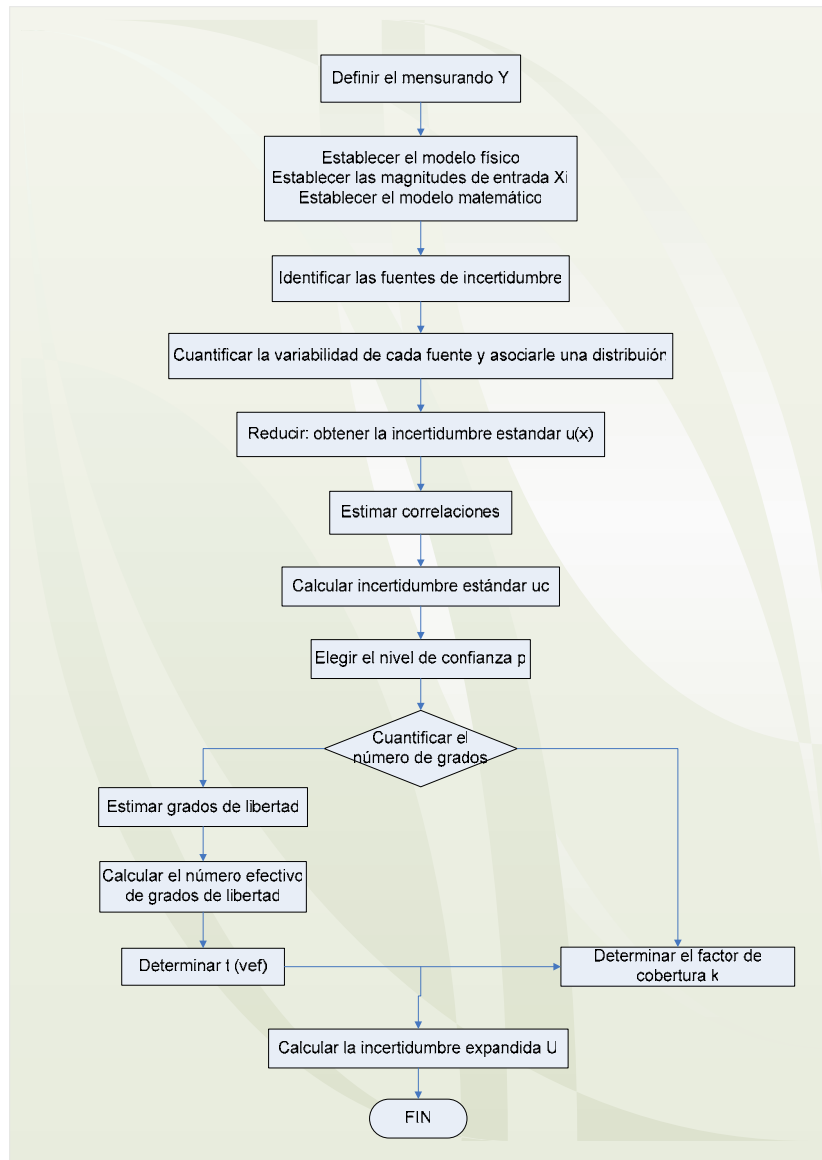
El resultado de una medición incluye la mejor estimación del valor del mensurando y una estimación de la incertidumbre sobre ese valor. La incertidumbre se compone de contribuciones de diversas fuentes, algunas de ellas descritas por las magnitudes de entrada respectivas. Algunas contribuciones son inevitables por la definición del

---

<sup>8</sup> Tomado de la Guía para estimar la Incertidumbre de la medición, CENAM, 2000

propio mensurando, mientras otras pueden depender del principio de medición, del método y del procedimiento seleccionados para la medición.

**Figura 73. Diagrama para la estimación de la incertidumbre**



Fuente: El autor

También pueden influir en el resultado de la medición, y por lo tanto en la incertidumbre, algunos atributos no cuantificables en cuyo caso es siempre recomendable reducir en lo posible sus efectos, preferentemente haciendo uso de criterios de aceptación en las actividades tendientes a reducir tales efectos.

### **B.1.2. Modelo físico.**

Un modelo físico de la medición consiste en el conjunto de suposiciones sobre el propio mensurando y las variables físicas o químicas relevantes para la medición. Estas suposiciones usualmente incluyen:

- relaciones fenomenológicas entre variables;
- consideraciones sobre el fenómeno como conservación de cantidades, comportamiento temporal, comportamiento espacial, simetrías;
- consideraciones sobre propiedades de la sustancia como homogeneidad e isotropía.
- Una medición física, por simple que sea, tiene asociado un modelo que sólo aproxima el proceso real.

### **B.1.3. Modelo matemático.**

El modelo físico se representa por un modelo descrito con lenguaje matemático. El modelo matemático supone aproximaciones originadas por la representación imperfecta o limitada de las relaciones entre las variables involucradas.

Considerando a la medición como un proceso, se identifican magnitudes de entrada denotadas por el conjunto:

$$\{X_i\}$$

Expresión en la cual el índice  $i$  toma valores entre 1 y el número de magnitudes de entrada  $N$ .

La relación entre las magnitudes de entrada y el mensurando  $Y$  como la magnitud de salida se representa como una función

$$Y = f(X_i) = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$$

Representada por una tabla de valores correspondientes, una gráfica o una ecuación

$Y$  - puede considerarse como un escalar, o puede aplicarse el mismo formalismo para elementos matemáticos más complejos como vectores o matrices.

$x_i$  - mejor estimado de las magnitudes de entrada  $X_i$ .

Los valores de las magnitudes de entrada pueden ser resultados de mediciones recientes realizadas por el usuario o tomados de fuentes como certificados, literatura, manuales, etc.

El mejor estimado del valor del mensurando es el resultado de calcular el valor de la función  $f$  evaluada en el mejor estimado de cada magnitud de entrada,

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N)$$

#### **B.1.4. Identificación de las fuentes de incertidumbre.**

Determinados el mensurando, el principio, el método y el procedimiento de medición, se identifican las posibles fuentes de incertidumbre. Éstas provienen de los diversos factores involucrados en la medición, por ejemplo,

- Los resultados de la calibración del instrumento;
- La incertidumbre del patrón o del material de referencia;
- La repetibilidad de las lecturas;

- La reproducibilidad de las mediciones por cambio de observadores, instrumentos u otros elementos;
- Características del propio instrumento, como resolución, histéresis, deriva, etc.;
- Variaciones de las condiciones ambientales;
- La definición del propio mensurando;
- El modelo particular de la medición;
- Variaciones en las magnitudes de influencia.

No es recomendable desechar alguna de las fuentes de incertidumbre por la suposición de que es poco significativa sin una cuantificación previa de su contribución, comparada con las demás, apoyadas en mediciones. Es preferible la inclusión de un exceso de fuentes que ignorar algunas entre las cuales pudiera descartarse alguna importante. No obstante, siempre estarán presentes efectos que la experiencia, conocimientos y actitud crítica del metrologo permitirán calificar como irrelevantes después de las debidas consideraciones.

#### **B.1.5. Cuantificación.**

Se utilizan dos métodos:

- Método de evaluación tipo A: basado en un análisis estadístico de una serie de mediciones.

- Método de evaluación tipo B: comprende todas las demás maneras de estimar la incertidumbre. Por este método, el metrologo supone una distribución con base en experiencia o información externa.

En la práctica, esta clasificación no tiene consecuencia alguna en las etapas para obtener una estimación de la incertidumbre combinada.

En la evaluación tipo A, la incertidumbre de una magnitud de entrada  $X_i$  obtenida a partir de observaciones repetidas bajo condiciones de repetibilidad, se estima con base en la dispersión de los resultados individuales.

Si  $X_i$  se determina por  $n$  mediciones independientes, resultando en valores  $q_1, q_2, \dots, q_n$ , el mejor estimado  $x_i$  para el valor de  $X_i$  es la media de los resultados individuales:

$$x_i = \bar{q} = \frac{1}{n} * \sum_{j=1}^n q_j \quad \text{Ecuación 1}$$

La dispersión de los resultados de la medición  $q_1, q_2, \dots, q_n$  para la magnitud de entrada  $X_i$  se expresa por su desviación estándar experimental:

$$s(q) = \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2} \quad \text{Ecuación 2}$$

La incertidumbre estándar  $u(x_i)$  de  $X_i$  se obtiene finalmente mediante el cálculo de la desviación estándar experimental de la media:

$$u(x_i) = s(\bar{q}) = \frac{s(q)}{\sqrt{n}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Así que resulta para la incertidumbre estándar de  $X_i$ :

$$u(x_i) = \frac{1}{\sqrt{n}} * \sqrt{\frac{1}{n-1} * \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2} \quad \text{Ecuación 4}$$

Para una medición que se realiza por un método bien caracterizado y bajo condiciones controladas, es razonable suponer que la distribución (dispersión) de los  $q_j$  no cambia, o sea se mantiene prácticamente igual para mediciones realizadas

en diferentes días, por distintos metrólogos, etc. (esto es, la medición está bajo control estadístico). En este caso esta componente de la incertidumbre puede ser más confiablemente estimada con la desviación estándar  $s_p$  obtenida de un solo experimento anterior, que con la desviación estándar experimental  $s(q)$  obtenida por un número  $n$  de mediciones, casi siempre pequeño, según la ecuación 2. La incertidumbre estándar de la media se estima en este caso por:

$$u(x_i) = \frac{s_p}{\sqrt{n}} \quad \text{Ecuación 5}$$

Cabe mencionar que  $n$  es el número de mediciones repetidas para evaluar  $x_i = \bar{q}$ , según la ecuación 1, mientras  $s_p$  se determinó por un número distinto (y grande) de mediciones.

No se puede dar una recomendación general para el número ideal de las repeticiones  $n$ , ya que éste depende de las condiciones y exigencias (meta para la incertidumbre) de cada medición específica. Hay que considerar que:

- Aumentar el número de repeticiones resulta en una reducción de la incertidumbre tipo A, la cual es proporcional a  $\frac{1}{\sqrt{n}}$
- Un número grande de repeticiones aumenta el tiempo de medición, que puede ser contraproducente, si las condiciones ambientales u otras magnitudes de entrada no se mantienen constantes en este tiempo.
- En pocos casos se recomienda o se requiere  $n$  mayor de 10 (ver Sección B.1.8.1 y B.1.8.2). Por ejemplo cuando se caracterizan instrumentos o patrones, o se hacen mediciones o calibraciones de alta exactitud.
- Para determinar el impacto que tiene  $n$  en la incertidumbre expandida hay que estimar su influencia en el número de grados efectivos de libertad (ver Sección B.1.8.1).

- Otras fuentes de incertidumbre que se evalúan con este método son la reproducibilidad y las obtenidas al hacer una regresión lineal.

Las fuentes de incertidumbre tipo B son cuantificadas usando información externa u obtenida por experiencia. Estas fuentes de información pueden ser:

- Certificados de calibración.
- Manuales del instrumento de medición, especificaciones del instrumento.
- Normas o literatura.
- Valores de mediciones anteriores.
- Conocimiento sobre las características o el comportamiento del sistema de medición.

Distribuciones de probabilidad: La cuantificación de una fuente de incertidumbre incluye la asignación de un valor y la determinación de la distribución a la cual se refiere este valor. Las distribuciones que aparecen más frecuentemente son:

- a) Distribución normal: Los resultados de una medición repetida afectada por una o más magnitudes de influencia que varían aleatoriamente, generalmente siguen en buena aproximación una distribución normal. También la incertidumbre indicada en certificados de calibración se refiere generalmente a una distribución normal.
- b) Distribución rectangular: En una distribución rectangular cada valor en un intervalo dado tiene la misma probabilidad, o sea la función de densidad de probabilidad es constante en este intervalo. Ejemplos típicos son la resolución de

un instrumento digital o la información técnica sobre tolerancias de un instrumento. En general, cuando exclusivamente hay conocimiento de los límites superior e inferior del intervalo de variabilidad de la magnitud de entrada, lo más conservador es suponer una distribución rectangular.

- c) Distribución triangular: Si además del conocimiento del límite superior e inferior hay evidencia de que la probabilidad es más alta para valores en el centro del intervalo y se reduce hacia los límites, puede ser más adecuado basar la estimación de la incertidumbre en una distribución triangular.
- d) Otras distribuciones: Pueden encontrarse también distribuciones como la U, en la cual los extremos del intervalo presentan los valores con probabilidad máxima, típicamente cuando hay comportamientos oscilatorios subyacentes. También se encuentran distribuciones triangulares con el valor máximo en un extremo como en las asociadas a “errores de coseno”.

#### **B.1.6. Reducción.**

Antes de comparar y combinar contribuciones de la incertidumbre que tienen distribuciones diferentes, es necesario representar los valores de las incertidumbres originales como incertidumbres estándar. Para ello se determina la desviación estándar de la distribución asignada a cada fuente.

- a) Distribución normal: La desviación estándar experimental de la media calculada a partir de los resultados de una medición repetida según la ecuación 4 ya representa la incertidumbre estándar.

Cuando se dispone de valores de una incertidumbre expandida  $U$ , como los presentados por ejemplo en certificados de calibración, se divide  $U$  entre el factor

$$u(x_i) = \frac{U}{k}$$

**Ecuación 6**

de cobertura  $k$ , obtenido ya sea directamente o a partir de un nivel de confianza dado:

- b) Distribución rectangular: Si la magnitud de entrada  $X_i$  tiene una distribución rectangular con el límite superior  $a_+$  y el límite inferior  $a_-$ , el mejor estimado para el valor de  $X_i$  está dado por:

$$x_i = \frac{a_+ + a_-}{2} \quad \text{Ecuación 7}$$

y la incertidumbre estándar se calcula por:

$$u(x_i) = \frac{a_+ - a_-}{\sqrt{12}} \quad \text{Ecuación 8}$$

o por:

$$u(x_i) = \frac{a/2}{\sqrt{3}} \quad \text{Ecuación 9}$$

donde  $a/2$  es el semiancho del intervalo  $a$  con

$$a = a_+ - a_- \quad \text{Ecuación 10}$$

Una aplicación típica es la resolución de un instrumento digital. También la incertidumbre relacionada con el número finito de cifras significativas de datos tomados de la literatura puede ser tratada con esta distribución (siempre y cuando no haya indicios que la incertidumbre en realidad es mayor que la incertidumbre relacionada con la última cifra significativa). Si se aplica a la resolución o a datos tomados de la literatura,  $a$  corresponde al último dígito significativo o a la última cifra significativa respectivamente.

- c) Distribución triangular: Como en una distribución rectangular, para una magnitud de entrada  $X_i$  que tiene una distribución triangular con los límites  $a_+$  y  $a_-$ , el mejor estimado para el valor de  $X_i$  está dado por:

$$x_i = \frac{a_+ - a_-}{2} \quad \text{Ecuación 11}$$

La incertidumbre estándar se calcula en este caso por:

$$u(x_i) = \frac{a_+ - a_-}{\sqrt{24}} = \frac{a/2}{\sqrt{6}} \quad \text{Ecuación 12}$$

con  $a$  definido por la ecuación 10

### B.1.7. Combinación.

El resultado de la combinación de las contribuciones de todas las fuentes es la incertidumbre estándar combinada  $u_c(y)$ , la cual contiene toda la información esencial sobre la incertidumbre del mensurando  $Y$ .

La contribución  $u_i(y)$  de cada fuente a la incertidumbre combinada depende de la incertidumbre estándar  $u(x_j)$  de la propia fuente y del impacto de la fuente sobre el mensurando. Es posible encontrar que una pequeña variación de alguna de las magnitudes de influencia tenga un impacto importante en el mensurando, y viceversa. Se determina  $u_i(y)$  por el producto de  $u(x_i)$  y su coeficiente de sensibilidad  $c_i$  (o factor de sensibilidad):

$$u_i(y) = c_i * u(x_i) \quad \text{Ecuación 13}$$

*Coficiente de sensibilidad:* El coeficiente de sensibilidad describe, qué tan sensible es el mensurando con respecto a variaciones de la magnitud de entrada correspondiente. Para su determinación existen dos métodos:

- a) Determinación a partir de una relación funcional: Si el modelo matemático para el mensurando  $Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N)$  describe la influencia de la magnitud de entrada  $X_i$  suficientemente bien mediante una relación funcional, el coeficiente de sensibilidad  $c_i$  se calcula por la derivada parcial de  $f$  con respecto a  $X_i$ :

$$c_i = \frac{\partial f(X_1, \dots, X_N)}{\partial X_i} \quad \text{Ecuación 14}$$

- b) Otros métodos de determinación: Si la influencia de la magnitud de entrada  $X_i$  en el mensurando  $Y$  no está representada por una relación funcional, se

$$c_i = \frac{\Delta Y}{\Delta X_i} \quad \text{Ecuación 15}$$

- c) determina el coeficiente de sensibilidad  $c_i$  por una estimación del impacto de una variación de  $X_i$  en  $Y$  según:

Esto es, manteniendo constantes las demás magnitudes de entrada, se determina el cambio de  $Y$  producido por un cambio en  $X_i$  por una medición o a partir de la información disponible (como una gráfica o una tabla).

*Propagación de la incertidumbre para magnitudes de entrada no correlacionadas:* En el caso de magnitudes de entrada no correlacionadas, la incertidumbre combinada  $u_c(y)$  se calcula por la suma geométrica de las contribuciones particulares:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad \text{Ecuación 16}$$

Considerando (13) y (14) resulta finalmente:

$$u_c(y) = \sqrt{\sum_{i=1}^N [c_i * u(x_i)]^2} = \sqrt{\sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial X_i} * u(x_i) \right]^2} \quad \text{Ecuación 17}$$

La regla presentada en ecuación 17 es llamada *ley de propagación de incertidumbre*. Note que la última expresión en esta ecuación se aplica cuando se dispone de la relación funcional entre  $Y$  y  $\{X_i\}$ .

*Magnitudes de entrada relacionadas con más de una fuente de incertidumbre:* En la mayoría de los casos una magnitud de entrada  $X_i$  es afectada por varias fuentes de incertidumbre, que pueden ser por ejemplo la resolución del instrumento, la dispersión de datos obtenidas por mediciones repetidas y la incertidumbre de la calibración del instrumento. En este caso hay dos maneras (equivalentes) de calcular la incertidumbre combinada.

Como primera alternativa, se calcula la incertidumbre total (combinada) relacionada con cada magnitud de entrada  $X_i$  por la suma geométrica de las incertidumbres individuales:

$$u(x_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^{M_i} [u_j(x_i)]^2} \quad \text{Ecuación 18}$$

donde  $u_j(x_i)$  es la incertidumbre estándar de la fuente de incertidumbre número  $j$  de las  $M_i$  fuentes relacionadas con la magnitud de entrada  $X_i$ . Después se introducen los valores de  $u(x_i)$  la ecuación (C.17).

Si uno está interesado en ver el efecto particular que tiene cada una de las fuentes en la incertidumbre combinada  $uc(y)$ , cada fuente puede entrar individualmente en la ecuación 17, sustituyendo el número de magnitudes de entrada  $N$  en la suma por el número total de fuentes de incertidumbre. Cabe mencionar que el coeficiente de sensibilidad  $c_i$  es igual para todas las fuentes de incertidumbre relacionadas con la misma magnitud de entrada  $X_i$ .

Cuando el coeficiente de sensibilidad  $c_i$  es cero o cuando la función no admite una representación lineal adecuada (únicamente con la primera derivada) en el intervalo  $\pm u(x_j)$  es conveniente y aun indispensable considerar términos de segundo orden (que dependen de las segundas derivadas).

#### **B.1.8. Incertidumbre expandida.**

La forma de expresar la incertidumbre como parte de los resultados de la medición depende de la conveniencia del usuario. A veces se comunica simplemente como la incertidumbre estándar combinada, otras ocasiones como un cierto número de veces tal incertidumbre, algunos casos requieren se exprese en términos de un nivel de confianza dado, etc.

*Factor de cobertura y nivel de confianza:* La incertidumbre estándar  $u_c$  representa un intervalo centrado en el mejor estimado del mensurando que contiene el valor verdadero con una probabilidad  $p$  de 68% aproximadamente, bajo la suposición de que los posibles valores del mensurando siguen una distribución normal.

Generalmente se desea una probabilidad mayor, lo que se obtiene expandiendo el intervalo de incertidumbre por un factor  $k$ , llamado factor de cobertura. El resultado se llama incertidumbre expandida  $U$

$$U = k * u_c \qquad \text{Ecuación 19}$$

La incertidumbre expandida  $U$  indica entonces un intervalo que representa una fracción  $p$  de los valores que puede probablemente tomar el mensurando. El valor de  $p$  es llamado el nivel de confianza y puede ser elegido a conveniencia.

*Distribución t de Student:* Frecuentemente, los valores del mensurando siguen una distribución normal. Sin embargo, el mejor estimado del mensurando, la media (obtenida por muestreos de  $n$  mediciones repetidas) dividida entre su desviación estándar, sigue una distribución llamada t de Student, la cual refleja las limitaciones de la información disponible debidas al número finito de mediciones.

Esta distribución coincide con la distribución normal en el límite cuando  $n$  tiende a infinito, pero difiere considerablemente de ella cuando  $n$  es pequeño.

La distribución t de Student es caracterizada por un parámetro  $n$  llamado número de grados de libertad.

Considerando lo anterior, es necesario ampliar el intervalo correspondiente al nivel de confianza  $p$ , por lo que la ecuación C.19 se transforma a

$$U = t_p(v) * u_c \qquad \text{Ecuación 20}$$

El factor  $t_p(v)$  indica los límites del intervalo correspondiente al nivel de confianza  $p$  de la distribución y su valor siempre es mayor o igual que el factor  $k$  (tomado de la distribución normal). Sus valores se encuentran en tablas.

Cuando se combinan varias fuentes de incertidumbre con sus respectivas distribuciones para obtener la incertidumbre combinada  $u_c$  del mensurando, el Teorema del Límite Central permite aproximar la distribución resultante por una distribución normal. La aproximación será mejor mientras más grande sea el número de fuentes y sus contribuciones sean similares, independientemente de la forma particular de sus distribuciones.

Nuevamente, la disponibilidad limitada de información hace necesario el uso de la distribución  $t$  de Student para determinar la incertidumbre expandida de manera rigurosa (con la suposición de que los valores del mensurando obedecen una distribución normal). El número efectivo de grados de libertad  $v_{ef}$  para esta situación se discute en la siguiente sección.

Cuando sólo es relevante la contribución de una fuente cuya distribución no sea normal, lo más conveniente es estimar la incertidumbre expandida directamente de los parámetros de la distribución.

*Grados de libertad:* De cierta manera el número  $v$  de grados de libertad asociado a una distribución de una magnitud ( $X_i$  o  $Y$ ) puede considerarse una medida de incertidumbre de la incertidumbre de esa magnitud. Entre mayor sea  $v$  la estimación de la incertidumbre será más confiable.

El número efectivo de grados de libertad  $v_{ef}$  del mensurando considera el número de grados de libertad  $v_i$  de cada fuente de incertidumbre.

En las incertidumbres tipo A,  $v_i$  depende directamente del número de datos considerados y disminuye conforme el número de parámetros estimados a partir de los mismos datos. La repetibilidad de una medición, estimada por la desviación estándar experimental de  $n$  lecturas tiene  $n-1$  grados de libertad. Una regresión lineal de  $M$  puntos mediante una ecuación de  $m$  parámetros tiene  $M-m$  grados de libertad.

La determinación del número de grados de libertad de una incertidumbre tipo B implica el criterio del metrologo soportado por su experiencia, aun cuando sea subjetiva, para determinar la incertidumbre relativa de la propia incertidumbre, y calcular el número de grados de libertad para esa fuente específica  $i$  con la ecuación ):

$$v_i \approx \frac{1}{2} * \left[ \frac{\Delta u(x_i)}{u(x_i)} \right]^{-2} = \frac{1}{2} * \left[ \frac{u(x_i)}{\Delta u(x_i)} \right]^2 \quad \text{Ecuación 21}$$

La cantidad  $\Delta u(x_i)$  es una estimación de la incertidumbre de la incertidumbre  $u(x_j)$  de la fuente  $i$  cuantificada por el metrologo. Es recomendable aproximar el resultado del cálculo con la ecuación anterior al entero cercano más bajo.

Siguiendo, el número efectivo de grados de libertad se calcula según la ecuación de Welch-Satterthwaite, aun cuando existan observaciones sobre su validez merecedoras de atención, la cual puede escribirse en términos de la relación entre la contribución de la fuente  $i$  y la incertidumbre combinada como:

$$\frac{1}{v_{ef}} = \sum_{i=1}^N \frac{\left( \frac{u_i(y)}{u_c(y)} \right)^4}{v_i} \quad \text{Ecuación 22}$$

Si el valor de  $v_{nef}$  resultante no es entero, generalmente se considera  $nef$  como el entero menor más próximo.

Un análisis de la ecuación anterior muestra el dominio de las fuentes con pocos grados de libertad en el cálculo de  $v_{ef}$ , sobre todo de aquellas cuyas contribuciones

son grandes a la incertidumbre combinada. De hecho una fuente cuya contribución es alta y con pocos grados de libertad, es determinante del valor de  $v_{ef}$ .

*Incertidumbre expandida* Resumiendo, de manera rigurosa la incertidumbre expandida se calcula de acuerdo a la ecuación B.20 como:

$$U = u_c * t_p(v_{ef}) \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde  $t_p(v_{ef})$  es el factor derivado de la distribución t de Student a un nivel de confianza p y  $n_{ef}$  grados de libertad. Comparando la ecuación B.19 con la ecuación B.20 es evidente que el factor de cobertura  $k$  de la ecuación B.19 corresponde al valor de  $t_p(v_{ef})$ .

*Expresión de la incertidumbre:* La incertidumbre puede expresarse de forma absoluta o de forma relativa. En la absoluta, el valor numérico va acompañado por la unidad de medida de la magnitud correspondiente. Ejemplo: Al medir un la intensidad de corriente eléctrica se obtuvieron los siguientes valores:

$$I = 10A \quad \mu = 0.05A$$

La expresión de la incertidumbre de forma relativa ayuda a formar una idea de que tan importante es el error cometido o la duda que se tiene con respecto a ese valor.

Ejemplo:

$$\mu_{rel} = \frac{0.05A}{10A} = 0.005$$

El valor relativo también puede expresarse en porcentajes:

$$\mu_{rel\%} = 0.5\%$$

El valor de la incertidumbre no debe ser expresado con un número excesivo de cifras. De acuerdo a los lineamientos de la GEIE se deben tener en cuenta los siguientes lineamientos para expresar los resultados finales de una medición o una calibración:

- La incertidumbre debe expresarse con dos cifras significativas, y los demás parámetros con tantas cifras, como para que solo las dos últimas estén afectadas por la incertidumbre.
- Cuando la incertidumbre presenta un mayor número de cifras se debe aproximar por regla general, al número superior.

## ANEXOS

## **ANEXO 1**

## COSTOS DEL BANCO

<b>COSTO DE FABRICACIÓN DEL BANCO</b>		
<b>Item</b>	<b>Accesorio</b>	<b>Valor</b>
1	Tubería y accesorios	65.000.000
2	Válvulas de control de flujo	18.000.000
3	Válvula de cierre y apertura	5.062.000
4	Actuadores neumáticos	690.000
5	Válvulas electroneumáticas	397.800
6	Diverter, estructuras y soportes	10.000.000
7	Sistema de control y adquisición de datos	15.375.000
8	Sistema de pesaje	25.000.000
9	Tanques de colección	1.560.000
10	Tanque de reserva	40.000.000
11	Mano de obra	3.500.000
12	Motobomba	9.000.000

<b>COSTO TOTAL</b>	<b>190.084.800</b>
--------------------	--------------------

<b>SISTEMA NEUMÁTICO</b>				
<b>Item</b>	<b>Nombre</b>	<b>Cant</b>	<b>Costo unitario</b>	<b>Costo total</b>
1	Cilindro 16 mm	1	132.096	132.096
2	Cilindro 20 mm	1	151.656	151.656
3	Cilindro 32 mm	1	198.445	198.445
4	Válvulas electroneumáticas	3	132.600	397.800

<b>TOTAL</b>	<b>879.997</b>
--------------	----------------

<b>VÁLVULAS DE CONTROL DE FLUJO</b>					
<b>Item</b>	<b>Nombre</b>	<b>Características</b>	<b>Cant</b>	<b>Costo unitario</b>	<b>Costo total</b>
1	1"	Proporcional	1	1.500.000	1.500.000
2	4"	Proporcional	1	3.200.000	3.200.000
3	8"	Proporcional	2	6.650.000	13.300.000

<b>TOTAL</b>	<b>18.000.000</b>
--------------	-------------------

<b>VÁLVULAS DE CIERRE Y APERTURA</b>					
<b>Item</b>	<b>Nombre</b>	<b>Características</b>	<b>Cant</b>	<b>Costo unitario</b>	<b>Costo total</b>
1	Válvula de bola de 1/2"	Acero, roscada	1	45.133	45.133
2	Válvula de bola de 1"	Acero, roscada	1	380.157	380.157
3	Válvula de bola de 4"	Acero, bridada	2	1.493.060	2.986.120
4	Válvula de bola de 8"	Acero, bridada	1	1.938.430	1.938.430

<b>TOTAL</b>	<b>3.411.410</b>
--------------	------------------

<b>SISTEMA DE CONTROL Y ADQUISICIÓN DE DATOS</b>					
<b>Item</b>	<b>Nombre</b>	<b>Características</b>	<b>Cant</b>	<b>Costo unitario</b>	<b>Costo total</b>
1	Controlador		1	3.061.800	3.061.800
2	Brain		1	1.917.000	1.917.000
3	Fuente de poder		2	928.800	1.857.600
4	Rack		1	496.800	496.800
5	Módulo de temperatura		2	866.700	1.733.400
6	Módulo de puertos seriales		1	1.393.200	1.393.200
7	Módulo entradas dig. y ana.		3	186.300	558.900
8	Módulo de salida digital		2	175.500	351.000
9	Cronómetro		1	900.000	900.000
10	RTD	PT 100	5	150.000	750.000
11	Ópticos	Sensor y amplif.	5	750.000	3.750.000
12	Balanza	Cap. 100 kg	1	1.460.500	1.460.500
13	Kit de celdas de carga	Cap. 5000 kg	1	9.337.500	9.337.500
14	Kit de celdas de carga	Cap. 15000 kg	1	14.202.000	14.202.000

<b>TOTAL</b>	<b>41.769.700</b>
--------------	-------------------

## ANEXO 2

# DISEÑO DE UN BANCO PATRÓN PARA LA CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE FLUJO DE LÍQUIDOS POR EL MÉTODO GRAVIMÉTRICO ESTÁTICO

Henry Abril Blanco, Javier Rugeles, Érik S. Tapias Chávez  
Escuela Ingeniería Mecánica, Universidad Industrial de Santander.  
Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas.  
Bucaramanga, Colombia. Julio de 2004.

**Resumen:** En el presente trabajo se llevó a cabo el diseño de un banco patrón para la calibración de medidores de flujo de líquidos utilizando el método gravimétrico estático el cual cuenta con amplio reconocimiento en el ámbito metrológico. El diseño del banco se fundamentó principalmente en la norma internacional ASME MFC-9M-1988. El banco está en capacidad de calibrar medidores de flujo de líquidos en un rango de 0,48 a 580 m<sup>3</sup>/h, con diámetros entre 1” hasta 8”, con niveles de incertidumbre teórica inferiores a  $\pm 0.5\%$ .

## INTRODUCCIÓN

La falta de cobertura e infraestructura metrológica en Colombia se ve reflejada en pérdidas por falta de regulación de agua a más del 30% en todo el país; sin olvidar el ambiente de tensión que se vive en el sector petrolero por causa de manifestaciones de casos de poca satisfacción por parte de los transportadores y distribuidores, al no tener la certeza de la cantidad de fluido que reciben en los procesos de transferencia de custodia.

Frente a esta situación, el Centro de Desarrollo Tecnológico de Gas, la Universidad Industrial de Santander y en su nombre la Escuela de Ingeniería Mecánica desarrollaron un proyecto como alternativa de solución aportando desarrollo tecnológico y al mismo tiempo contribuyendo a la apropiación de nuevos conocimientos en la rama del flujo de líquidos en Colombia.

La calibración de medidores de flujo de líquidos se puede realizar a través de varios métodos o dispositivos, entre ellos los probadores volumétricos (empleados para calibración en campo), el método volumétrico y el método gravimétrico. El proyecto se

desarrolló utilizando el método gravimétrico estático por las siguientes ventajas:

- Gran estabilidad a largo plazo,
- Bajos niveles de incertidumbre, inferiores a  $\pm 0.5\%$ .
- Los mecanismos de pesaje no presentan partes móviles que puedan afectar la medición durante el ciclo de calibración.

Este método utiliza un mecanismo de desviación de flujo conocido como diverter, el cual se encarga de direccionar el flujo hacia el tanque de colección durante el período de calibración con una alta rapidez y precisión. Las condiciones de entrada al diverter son conseguidas por la cola de pescado (accesorio que transición de tubería circular a rectangular) y la boquilla.

El resultado de este proceso es el diseño de un banco patrón primario que estará en capacidad de calibrar medidores de flujo de líquidos tipo turbina (por ser los más dominantes en el país) en un rango de 0,47 a 580 m<sup>3</sup>/h, con diámetros que van desde 1”

hasta 8", con niveles de incertidumbre estándar teórica inferiores a  $\pm 0.5\%$ .

## DESCRIPCIÓN DEL BANCO

El banco de calibración de flujo de líquidos está compuesto de cuatro componentes fundamentales:

- *Sistema de generación de flujo:* compuesto por las bombas de velocidad constante y el sistema de control de flujo formado por las válvulas reguladoras de caudal.
- *Línea de calibración:* es el sistema de tubería dispuesta para el acondicionamiento del flujo y donde se incorpora el medidor a calibrar.
- *Sistema de referencia:* compuesto por las balanzas de precisión, tanques de colección y mecanismos de direccionamiento (diverter).
- *Sistema de control y adquisición de datos:* Aquí se incluyen los sensores y equipos necesarios para el control de variables y procesamiento de datos.

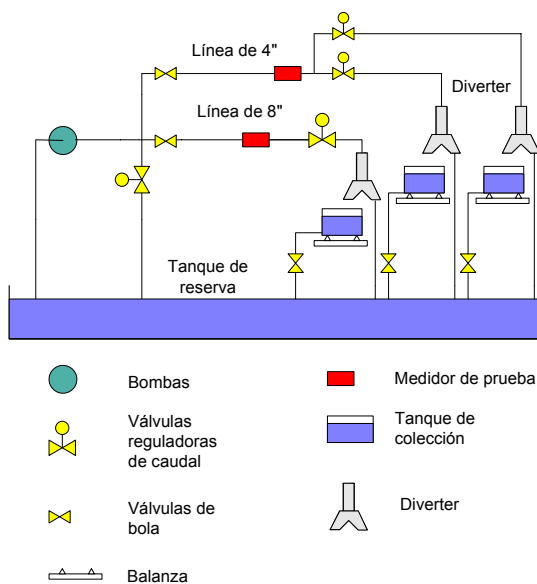


Figura 74. Descripción del banco de calibración.

## FUNCIONAMIENTO

Para la calibración de un medidor inicialmente se hace recircular agua a través del sistema hasta estabilizar las variaciones de temperatura en un rango determinado y encontrar el caudal de calibración con ayuda de las válvulas de control de flujo. Durante este período, el diverter direcciona el flujo hacia el tanque de reserva.

Antes de iniciar el ciclo de calibración se descarga una cantidad suficiente de líquido en el tanque de colección hasta alcanzar el umbral de operación de los mecanismos de pesaje, con el fin de eliminar los efectos de líquido residual que probablemente tienden a permanecer en el fondo del tanque o adherido a las paredes del mismo.

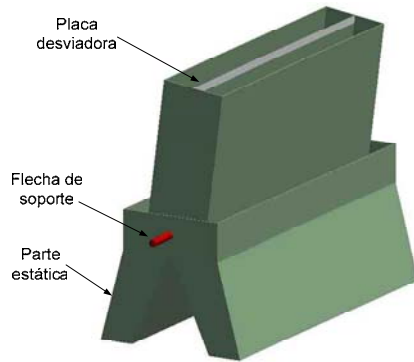
Estabilizado el sistema y encontrado su punto de operación, el diverter redirecciona el flujo hacia el tanque de colección, en el mismo instante en que es activado un cronómetro de alta precisión.

Al culminar el período de calibración, el diverter regresa a su posición inicial deteniendo el cronómetro y enviando el flujo al tanque de reserva. Cuando las oscilaciones en el tanque de colección han desaparecido, se mide la temperatura dentro del tanque y el valor de la masa final es registrado. Posteriormente el tanque es drenado. Este procedimiento se debe realizar un mínimo de dos veces por caudal de prueba. Debe incluir el caudal máximo y mínimo permitido por el medidor y por lo menos dos puntos entre su rango de operación, según recomendación de la norma API 5-3.

## DISEÑO

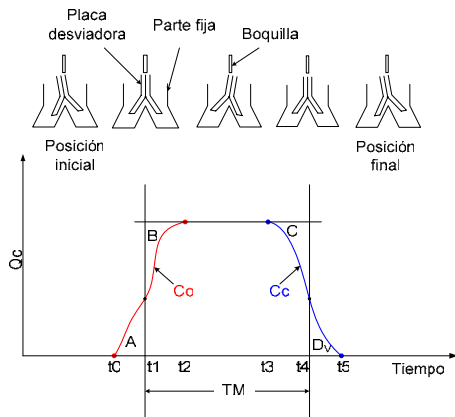
### Diverter

Uno de los elementos más importantes después de los mecanismos de pesaje es el denominado diverter. Este mecanismo es el encargado de desviar el flujo hacia el tanque de colección durante el período de calibración o hacia el tanque de reserva. El movimiento del diverter deberá ser lo suficientemente rápido al atravesar el chorro formado a la salida de la boquilla, con el fin reducir la posibilidad de encontrar un error significativo durante la medición del tiempo de llenado.



**Figura 75. Modelamiento de la placa desviadora del diverter en Solid Edge.**

El principio de funcionamiento de la válvula diverter se menciona a continuación:



**Figura 76. Líquido de flujo colectado en función del tiempo.**

Un ciclo de calibración puede ser separado en tres distintos períodos:

1. Período de arranque, ( $t_0 < t < t_3$ )
2. Período de flujo constante, ( $t_2 < t < t_3$ )
3. Período de cierre, ( $t_3 \leq t \leq t_5$ )

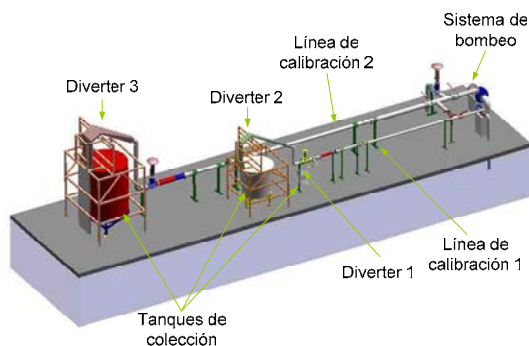
El instante  $t_0$  es el inicio del período de arranque y denota el instante en el cual el mecanismo del diverter es activado. Durante este período, la válvula diverter redirecciona el chorro de líquido de la línea de by-pass al tanque de colección. Como resultado, el flujo colectado pasa de cero a  $Q_T$ . El tiempo  $t_1$  indica el instante en que se activa el cronómetro. El instante  $t_2$  indica el final del período de arranque, para este momento ya se encuentra totalmente direccionado el flujo de líquido al tanque de colección. El flujo colectado durante este período es mostrado por la curva  $C_0$ .

Durante el período de cierre, el diverter redirecciona el chorro del tanque de colección de regreso a la línea de by-pass, consiguiendo que el flujo en el tanque de colección pase de  $Q_T$  a cero. La curva  $C_C$  muestra el período de transición durante el período de cierre. El cronómetro se detiene en el instante  $t_4$ .

### Línea de calibración

La calibración de un medidor tipo turbina requiere de unas características especiales como son un flujo totalmente desarrollado, axisimétrico y libre de remolinos y pulsaciones. Según la norma API 5-3, estas condiciones son conseguidas si se cumplen ciertas especificaciones de tubería recta aguas arriba y aguas abajo del medidor.

Todos los demás elementos constitutivos del banco se dimensionaron y seleccionaron de acuerdo con los requerimientos exigidos teniendo en cuenta la reducción de costos y el cumplimiento de los requerimientos de operación del banco.



**Figura 77. Modelamiento del banco de calibración en Solid Edge.**

## CONCLUSIONES

Como resultado de este proceso se obtuvo el diseño de un banco patrón para calibrar medidores de flujo de líquidos que operen entre un rango de 0.47 y 580 m<sup>3</sup>/h utilizando el método gravimétrico estático.

El uso de la herramienta CAD Solid Edge en la etapa de diseño facilitó la visualización del banco en general y la obtención de los planos necesarios para la futura construcción de los elementos constitutivos del banco.

## REFERENCIAS

- ✓ **ISA. FLOW MEASUREMENT: PRACTICAL GUIDE FOR MEASUREMENT AND CONTROL.** 2<sup>a</sup> Edición. D.W. Spitzer, editor. New York, 2001.
- ✓ **AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS.**

Measurement of Liquid Flow in Closed Conduits by Weighing Methods. ASME/ANSI MFC-9M-1988.

- ✓ **AMERICAN PETROLEUM INSTITUD.** Measurement of Liquid Hydrocarbons by Turbine Meters. API 5-3
- ✓ **POESCHEL, W. A UNIQUE FLUID DIVERTER DESING FOR WATER FLOW CALIBRATION FACILITIES.** Alemania, 2000.
- ✓ **GOWDA, VIKRAM. THE NEW NIST WATER FLOW CALIBRATION FACILITY.** USA, 2000.

## ANEEXO 3



**INSTITUTO COLOMBIANO PARA EL DESARROLLO DE LA CIENCIA Y LA  
TECNOLOGIA "FRANCISCO JOSE DE CALDAS", COLCIENCIAS**

**CONVOCATORIA PARA EL FORTALECIMIENTO DE LAS  
CAPACIDADES TECNOLOGICAS Y DE GESTION, DE  
LOS CENTROS DE DESARROLLO TECNOLOGICO,  
CENTROS REGIONALES DE PRODUCTIVIDAD E  
INCUBADORAS DE EMPRESAS DE BASE  
TECNOLOGICA- AÑO 2004**

## 1. Información General del Proyecto y/o Actividad

Título del proyecto	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO PATRÓN PARA LA CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE LÍQUIDOS UTILIZANDO EL MÉTODO GRAVIMÉTRICO ESTÁTICO		
CDT , CRP o IEBT	CDT de GAS		
Otras instituciones participantes	ECOPETROL, UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER		
Duración del proyecto (Meses)	12		
Costo Total del proyecto			
Monto solicitado			
Monto total de la contrapartida			
Discriminación de la Contrapartida	<b>En Efectivo</b>		<b>En Especie</b>

## 2. Información del Centro

Nombre o Razón Social	Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas				
Dirección	Kilómetro 2 Vía al Refugio				
Teléfono	6542266	Fax	6543800		
E-Mail	<a href="mailto:cdt@uis.edu.co">cdt@uis.edu.co</a>	Web-Site	<a href="http://www.sintegas.com">www.sintegas.com</a>		
NIT		Ciudad	Piedecuesta	Departamento	Santander
Representante legal					
Número de Identificación				De (Ciudad)	
	C.C.	<input type="checkbox"/>	Cédula de Extranjería	<input type="checkbox"/>	Pasaporte <input type="checkbox"/>

### 3. Descripción del Proyecto y/ o Actividad

#### 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACION DE LA REALIZACIÓN DEL PROYECTO Y/O ACTIVIDAD

En la actualidad, Colombia cuenta con 2 entidades para la calibración de medidores de agua potable acreditados por la Superintendencia de Industria y Comercio (SIC) , en rangos de caudal que van desde 0,0012 m<sup>3</sup>/h hasta 10 m<sup>3</sup>/h, con incertidumbres inferiores al +/- 0,25%, utilizando recipientes metálicos con capacidades hasta de 0,1 m<sup>3</sup>.

La Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico (CRA) y la Agencia para el Comercio y Desarrollo de los Estados Unidos suscribieron un acuerdo de asistencia técnica para fortalecer la actividad regulatoria y disminuir las pérdidas de agua, las cuales están por encima de 30 por ciento en todo el país; esto deja en claro la falta de cobertura e infraestructura metrológica para satisfacer las necesidades del sector industrial, comercial y domiciliario.

En el campo de los hidrocarburos, ECOPETROL S.A., cuenta con sus propios patrones, compuesto por serafines móviles con capacidad hasta de 200 barriles, utilizados para la calibración de probadores mecánicos que en procesos de transferencia de custodia, permiten calibrar los medidores que se emplean para la transferencia de los fluidos; sin embargo, estos procesos de calibración carecen de procedimientos estandarizados debidamente acreditados por la Superintendencia de Industria y Comercio – SIC -, y a la vez, son de momento realizados por una sola empresa particular, que puede reflejar confiabilidad restringida para las partes involucradas en el proceso de comercialización de los hidrocarburos; actualmente existe un ambiente de tensión en lo concerniente a las relaciones inter-empresariales del sector, debido a la manifestación de casos de poca satisfacción por parte de los transportadores y distribuidores, por no tener la certeza de la cantidad de fluido que reciben, situación que se repite en las estaciones surtidoras de combustible derivados del petróleo (bombas de gasolina).

Para remediar esta situación, el CDT del GAS como una institución que propicia el desarrollo tecnológico, basada en el marco de la transferencia de tecnologías y generación de nuevos conocimientos, incursionando en el campo de la metrología de líquidos, propone desarrollar con la asesoría técnica del grupo de medición de flujo del Instituto de Pesquisas Tecnológicas de la Universidad de Sao Paulo en Brasil (IPT) y de expertos en el tema, un proyecto que consiste en el diseño y la construcción de un sistema para la calibración de medidores de líquidos con diámetros hasta 8" y caudales cercanos a 580 m<sup>3</sup>/h, con baja incertidumbre en la medición, control de variables y adquisición de datos automatizada.

Con la realización de este banco, el CDT de GAS contribuye a satisfacer las necesidades actuales del país, generar un ambiente de entendimiento entre transportadores, distribuidores y usuarios, brindar una alternativa imparcial, confiable y transparente trazable a patrones internacionales y finalmente, busca elevar el nivel de conocimiento relativo en el área de la medición de flujo de líquidos en Colombia.

Desde el punto de vista de apoyo a las relaciones institucionales y a la formación de nuevos

investigadores, el CDT de GAS ha contemplado la participación de un estudiante de pregrado que contribuirá al logro del objetivo propuesto.

Los resultados del proyecto de investigación y desarrollo tecnológico serán divulgados a través del Sistema de Información Tecnológica del Gas (SINTEGAS) y adicionalmente se contempla la preparación de un documento científico que pueda ser presentado y difundido a nivel nacional, en donde se muestre el desarrollo alcanzado, se exponga el estudio general del proyecto, se favorezca la realización de íter-comparaciones entre laboratorios y se ofrezca los servicios del CDT de GAS a través de su portafolio de servicios tecnológicos.

## **2. OBJETIVO DEL PROYECTO Y/O ACTIVIDAD**

### **OBJETIVO GENERAL**

Diseñar y construir un sistema para la calibración de medidores de líquidos utilizando el método gravimétrico estático el cual debe tener trazabilidad a patrones internacionales y presentar bajos valores de incertidumbre. Las investigaciones realizadas, el desarrollo del modelo y la contribución a la profundización y adquisición de nuevos conocimientos serán enfocados a satisfacer las necesidades tanto de la industria como de los consumidores, generando un ambiente de confianza entre las partes.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar un estudio detallado de los sistemas de calibración por el método gravimétrico que se encuentran implementados en el ámbito internacional, para detectar fortalezas y debilidades de los sistemas existentes, en cuanto a su concepción, instrumentación y sistema de procesamiento de la información de manera que sirva de guía para el diseño del sistema propuesto.
- Identificar las prioridades metrológicas del país en el ámbito de la medición de líquidos e identificar los aspectos que requieren atención inmediata en los diferentes sectores, de manera que se concreten las soluciones a las necesidades pero a la vez se obtengan los beneficios para el impulso del desarrollo tecnológico del país.
- Diseñar el sistema de calibración de medidores de flujo de líquidos, compuesto básicamente por un sistema de bombeo, válvulas de control de caudal, válvulas desviadoras de flujo (diverter) y balanzas de alta precisión. El banco presentará bajos valores de incertidumbre.
- Realizar un estudio para el diseño óptimo de la válvula desviadora de flujo denominada Diverter.
- Construir el sistema propuesto usando tecnología nacional y herramientas propias de centros de mecanizado fino de la región, utilizando en lo posible materiales y equipos que se produzcan en el país.

- Desarrollar los sistemas de control, instrumentación, adquisición de datos y procesamiento de señales con los cuales se obtienen los informes de resultados de las calibraciones.
- Realizar ensayos para evaluar el desempeño del sistema mediante el uso de patrones de referencia trazables a patrones internacionales.
- Planear y ejecutar una presentación a nivel nacional del sistema construido, haciendo énfasis en su principio de funcionamiento, operación y trazabilidad internacional para fomentar la generación de nuevos servicios prestados en el CDT de GAS, basando su fortaleza en el aseguramiento metrológico, en la imparcialidad del Centro y buscando servir de referencia nacional realizando comparaciones interlaboratorios.

### **3. METODOLOGIA DEL PROYECTO Y/ O ACTIVIDAD**

Para llevar a cabo los objetivos propuestos, se llevarán a cabo las siguientes actividades:

- El estudio de factibilidad se realizará en varias etapas:
  1. Investigación de la estructura metrológica de líquidos en Colombia y análisis de los aspectos jurídicos involucrados.
  2. Análisis de mercado en la que se muestre la viabilidad de posibles alianzas y/o convenios y los clientes potenciales.
  3. Reforma de la estructura administrativa del laboratorio.
- El diseño y construcción del banco se basará en normas nacionales e internacionales y estará compuesto por un tanque de reserva de 156 m<sup>3</sup> de capacidad, válvulas automatizadas encargadas de controlar el flujo (agua a condiciones atmosféricas) a través del medidor, válvulas diverter las cuales desviarán el fluido eficientemente hacia el reservorio o a tanques de colección, en los que se encuentran los mecanismos de pesaje. La caída de presión a través del sistema será constante y la temperatura se mantendrá casi invariable, debido al tamaño del reservorio. Todas las variables estarán constantemente supervisadas para asegurar la estabilidad del sistema y mantener los márgenes de incertidumbre establecidos.
- Para la construcción del diverter se realizarán simulaciones de las condiciones del flujo por medio de un software CAE con diferentes diseños, en busca de datos como el punto óptimo para el inicio de la medición de flujo, procurando obtener una mínima incertidumbre en los primeros instantes; de igual manera, y el perfil de velocidad lo más simétrico posible a la salida del diverter para facilitar el cálculo de la incertidumbre asociada al cambio de dirección.
- Los sistemas de control neumático se diseñan teniendo en cuenta una operación segura e inmediata, con leve inercia entre la orden y el accionamiento.

La instrumentación necesaria para el banco de calibración consiste en transductores de temperatura y sensores ópticos, todos los instrumentos deben estar calibrados contra patrones trazables que aseguren una baja incertidumbre en la medición.

Las señales se colectan por medio de un sistema de adquisición de datos y procesamiento electrónico de señal para ser enviada posteriormente a un computador que cumple con diversas funciones: controlar el banco, ingresar variables de calibración, monitorear la calibración en tiempo real, procesar matemáticamente los datos obtenidos y emitir un informe de calibración en medio impreso y digital conteniendo los resultados y la incertidumbre de la medición.

- Mediante el uso de patrones de transferencia se comprobará el óptimo desempeño del banco de calibración, dichos patrones permitirán establecer el grado de conformidad del banco con las referencias de laboratorios acreditados internacionalmente en la medición de flujo de líquidos, estableciendo de esta forma la trazabilidad del sistema desarrollado.

#### 4. RESULTADOS ESPERADOS DEL PROYECTO Y/O ACTIVIDAD

**Tabla 4.1 Generación de nuevo conocimiento o nuevos desarrollos tecnológicos**

Resultado/Producto Esperado	Indicador	Beneficiario
Un sistema para la calibración de medidores de líquidos en Colombia para diámetros hasta de 8", trazable a patrones internacionales.	Operación y calibración satisfactoria para medidores de líquidos construidos en diámetros entre 1" y 8" y que indiquen su caudal con bajas incertidumbres	Comunidad Metrológica Internacional, Superintendencia de Industria y Comercio – SIC -, Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, ECOPETROL, Laboratorios de Investigación y todas las Industrias que involucren en sus procesos la medición de líquidos.
Incremento del portafolio de servicios de calibración de medidores en Colombia	Cadena de Trazabilidad de Mediciones para Colombia	

**Tabla 4.2 Fortalecimiento de la Capacidad Científica Nacional**

Resultado/Producto Esperado	Indicador	Beneficiario
Fortalecimiento de relaciones interinstitucionales con centros de metrología de líquidos de Brasil, Venezuela, México y Argentina buscando consolidar convenios de cooperación	Convenios de cooperación internacional, Asesoría para la ejecución del proyecto y colaboración en la realización de intercomparaciones	Comunidad Metrológica Internacional, Superintendencia de Industria y Comercio – SIC -, Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, ECOPETROL, Laboratorios de Investigación y todas las Industrias que involucren en sus procesos la medición de líquidos.
Formación de un profesional del CDT de GAS en el Sistema de Calibración de Medidores de Líquidos de la Universidad Simón Bolívar de Caracas – Venezuela.	Certificación del Centro en donde se acredite la capacidad científica desarrollada.	El Centro de Desarrollo Tecnológico del Gas – CDT de GAS -.
Publicación de una tesis de grado de Ingeniería relacionada con el tema	Sustentación y Aprobación de la tesis por parte del Centro Educativo seleccionado	Comunidad Universitaria

**Tabla 4.3 Apropiación Social del conocimiento**

Resultado/Producto Esperado	Indicador	Beneficiario
Presentación de los resultados de la investigación	Publicación de un artículo científico relacionado con los logros obtenidos y preparación y ejecución de una Jornada Técnica Nacional que permita la difusión	Comunidad Metrológica Internacional, Superintendencia de Industria y Comercio – SIC -, Comisión de Regulación de Agua Potable y Saneamiento Básico, ECOPETROL,

	del tema.	Laboratorios de Investigación y todas las Industrias que involucren en sus procesos la medición de líquidos.
--	-----------	--

**5. CRONOGRAMA**

<b>Actividad</b>	<b>TRIM 1</b>	<b>TRIM 2</b>	<b>TRIM 3</b>	<b>TRIM 4</b>
Estudio de factibilidad técnico-económico.				
Diseño y construcción del banco.				
Diseño y construcción del diverter.				
Automatización del banco.				
Evaluación del desempeño del banco.				

**6. PRESUPUESTO**

*Presente el presupuesto global y la descripción de los rubros, indicando los montos solicitados y la contrapartida en especie y efectivo (debe tener en cuenta los rubros financiables y no financiables). El presupuesto debe ser presentado de acuerdo a los formatos que se incluyen en el anexo 1.*

**7. IMPACTOS ESPERADOS DEL PROYECTO Y/O ACTIVIDAD**

*Describa los impactos esperados del proyecto o actividad con referencia a la formación de recursos humanos en nuevas tecnologías y en gestión tecnológica, desarrollo de capacidades tecnológicas y/o de gestión del Centro, conformación y consolidación de redes de información y colaboración de actividades tecnológicas o de mejoramiento de los Centros participantes. Clasifique estos impactos en el corto, mediano o largo plazo.*

## Anexo 1. Presupuesto y Fuentes de Financiación (Miles de Pesos)

*Todos los cuadros de presupuesto del proyecto deben estar diligenciados y totalizados*

RUBROS	COLCIENCIAS	CONTRAPARTIDA				TOTAL
		CENTRO		UIS, ECOPETROL		
		Efectivo	Especie	Efectivo	Especie	
PERSONAL	18.100	3.000			10.000	<b>31.100</b>
EQUIPOS <sup>9,3,4</sup>	45.375				<b>31.700</b>	<b>77.075</b>
			5.000			<b>5.000</b>
MATERIALES E INSUMOS					65.000	<b>65.000</b>
SERVICIOS TECNICOS	2.200					2.200
CAPACITACION	18.000					<b>18.000</b>
VIAJES						
SOFTWARE						
MANTENIMIENTO <sup>2</sup>						
ADECUACION DE INFRAESTRUCTURA <sup>4</sup>	40.000					<b>40.000</b>
GASTOS DE REGISTRO DE PROPIEDAD INTELECTUAL						
BIBLIOGRAFÍA						
		1.000				<b>1.000</b>
MATERIAL DE DIFUSION Y PROMOCION DE RESULTADOS	1.000					<b>1.000</b>
ADMINISTRACION <sup>5</sup>	10.000					<b>10.000</b>
OTROS (DISCRIMINAR)						
<b>TOTAL</b>	<b>135.675</b>	<b>3.000</b>	<b>5.000</b>		<b>109.900</b>	<b>250.385</b>

1. Equipos para investigación y desarrollo.

2. Los rubros con casillas sombreadas no son financiables por COLCIENCIAS pero se aceptan como aporte de contrapartida al proyecto

3y 4. Estos rubros se podrán financiar con recursos propios de COLCIENCIAS en montos limitados, siempre y cuando estén completamente justificados para la realización del proyecto.

5. Se financiará hasta el 10% del valor solicitado como administración del proyecto.

**Nota:** Con contrapartida se deben incluir todos los gastos relacionados con pago de impuestos tales como IVA, impuestos de importación, retención en la fuente, ICA u otros.

**DESCRIPCIÓN GASTOS EN PERSONAL (Miles de Pesos)Δ**

Nombres y Apellidos	Título		Función en el Proyecto	Dedicación Horas / Semana	No. de Meses	Fuentes			TOTAL
	Formación Básica	Posgrado				COLCIENCIAS	CENTRO	UIS, ECOPETROL	
Henry Abril	Adm. de Empresas	Esp. Ing. Gas	Director	10	12		3.000		<b>3.000</b>
Erick Tapias	Ing. Mecánico		Investigador	20	12	10.000			<b>10.000</b>
Pedro Perez	Est. práctica		Investigador	20	12	4.000			
Jabid Eduardo Quiroga	Ing. Mecánico		Investigador	20	12			10.000	<b>10.000</b>
Fabio A. Buitrago P	Tecnolog Electrome		Auxiliar de Investigador	20	12	4.100			<b>4.100</b>
<b>TOTAL</b>						<b>18.100</b>	<b>3.000</b>	<b>10.000</b>	<b>31.100</b>

Δ Discriminar solo el personal profesional vinculado al proyecto.

**DESCRIPCIÓN EQUIPOS QUE SE PLANEA ADQUIRIR (Miles de Pesos) ♦**

Descripción	Cantidad	Justificación de su uso dentro del Proyecto	Fuentes			TOTAL
			COLCIENCIAS	CENTRO	Otras Entidades	
Bomba centrífuga trifásica con cabeza de 33 m y 400 lt/m	1	Envían el agua al tanque elevado y mantienen en este, el nivel constante			9.000	<b>9.000</b>
Balanzas y celdas de carga	3	Determinan la masa del líquido colectado en los tanques de almacenaje	25.000			<b>25.000</b>
Tanque de reserva	1	Reservorio	35.000			<b>35.000</b>
Válvulas automáticas	4	Control de flujo			18.000	<b>18.000</b>
Válvulas de cierre y apertura	5	Bloqueo de líneas y drenaje de tanques			3.500	<b>3.500</b>
Tubería y accesorios		Sistema hidráulico			65.000	<b>65.000</b>
Sistema neumático	1	Para ejecutar las funciones del diverter			1.200	<b>1.200</b>
Instrumentación: Temperatura, Tiempo y pulsos		Para control de variables	5.375			<b>5.375</b>
Computador	1	Control de variables y recolección de información	3.000			<b>3.000</b>
Sistema de adquisición de datos	1	OPTO 22 Colectar y procesar señales	12.000			<b>12.000</b>
<b>TOTAL</b>			<b>80.375</b>		<b>96.700</b>	<b>177.075</b>

\* Se debe diligenciar un cuadro similar en el caso de adquisición de software

**DESCRIPCIÓN CAPACITACIÓN (Miles de Pesos)**

Proveedor	Tema de la capacitación	Ciudad	No. de días	No. de personas	Costo Capacitación por persona	Costo de pasajes por persona	Costo de estadía por pers.	FUENTES			TOTAL
								COLCIENCIAS	CENTRO	Otras Entidades	
USB	Flujo de Líquidos	Caracas	20	1	5.000	2.000	6.000	13.000			
SIC	Termometría	Bogotá	3	1	400	350	400	1.150			
SIC	Manometría	Bogotá	3	1	400	350	400	1.150			
SIC	Volumen	Bogotá	2	1	300	350	250	900			
SIC	Longitud	Bogotá	2	1	300	350	250	900			
SIC	Tiempo	Bogotá	2	1	300	350	250	900			
<b>TOTAL</b>								<b>18.000</b>			

**DESCRIPCIÓN VIAJES (Miles de Pesos)**

Lugar	Justificación	Costo Pasaje por pers.	Costos Estadía por pers,	No. de Personas	No. de Días	FUENTES			TOTAL
						COLCIENCIAS	CENTRO	Otras Entidades	
<b>TOTAL</b>									

**DESCRIPCIÓN OTROS RUBROS (Miles de Pesos)**

Descripción	Cantidad	Justificación de su uso dentro del proyecto	FUENTES			TOTAL
			COLCIENCIAS	CENTRO	Otras Entidades	
<b>TOTAL</b>						

⊗ Para rubros que superen el 10% del presupuesto total.

## **ANEXO 2**

### **DOCUMENTOS QUE DEBEN ADJUNTARSE A LA PROPUESTA**

1. Carta de presentación firmada por el representante legal-
2. Certificado de existencia y de representación legal del Centro, expedido por la respectiva Cámara de Comercio, vigente y con antigüedad no mayor a 90 días.
3. Dos ejemplares impresos de la propuesta completa.
4. Comunicación del impacto ambiental que pueda generar el proyecto.
5. Acta del Comité de Ética de la institución, en caso de incluir experimentos con seres vivos, de acuerdo a la Resolución 008430 de 1993 del Ministerio de Salud.
6. En el caso de proyectos que involucren organismos genéticamente modificados, deberán acogerse a la regulación vigente sobre bioseguridad: Resolución 3492 de 1995 y Resolución 2935 de 2001 del Instituto Colombiano Agropecuario. Este hecho deberá explicarse mediante carta o certificación del representante institucional responsable de la institución. También deberán tenerse en cuenta las disposiciones o normas (Decisión 391 de la Comunidad Andina de Naciones) aplicadas por Colombia en materia de recursos biológicos y genéticos.<sup>o</sup>

## **ANEXO 4**

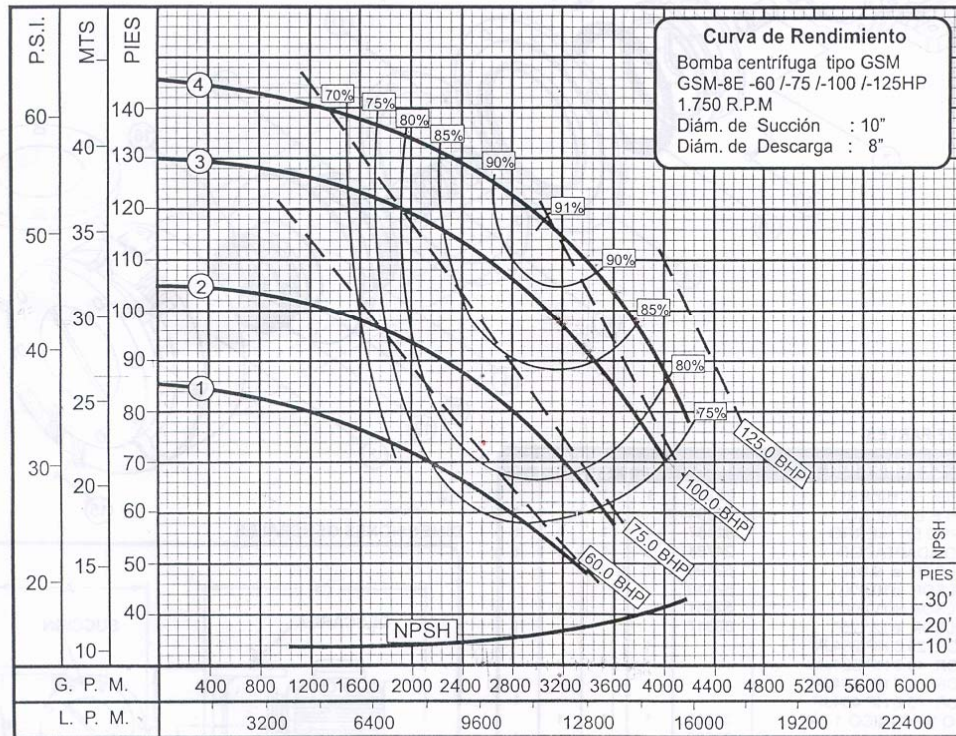
## CURVA DE LA BOMBA

### CARACTERISTICAS

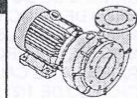
Bomba centrífuga de construcción monobloque fabricada en hierro fundido.  
 Diámetro de succión de 10" y descarga de 8"  
 Impulsor cerrado fabricado en hierro fundido  
 Temperatura máxima de operación 70° C  
 Sello mecánico

### APLICACION

Bombeo de líquidos limpios o turbios a grandes alturas y distancias  
 En la industria, agricultura y ganadería  
 Distribución de agua en unidades residenciales  
 Riego por aspersión  
 Equipos contra incendio  
 Equipos de presión



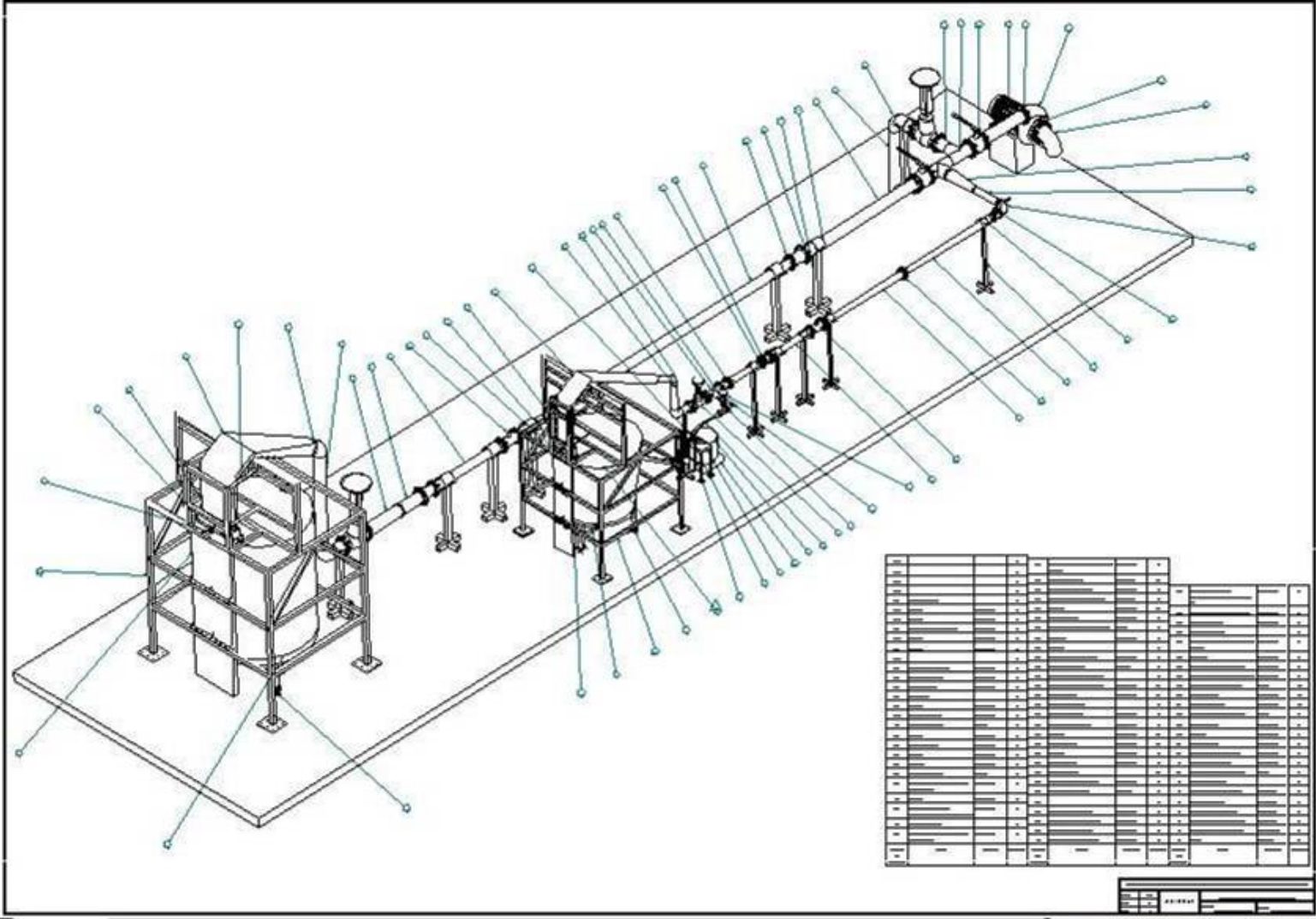
No	MODELO	HP	VOLTAJE	FASES	Ø IMP.	Ø SUCC.	Ø DESC.
1	GSM-8E-60-4P	60.0	220/440	3	9.500"	10"	8"
2	GSM-8E-75-4P	75.0	220/440	3	10.500"	10"	8"
3	GSM-8E-100-4P	100.0	220/440	3	11.500"	10"	8"
4	GSM-8E-125-4P	125.0	220/440	3	12.125"	10"	8"



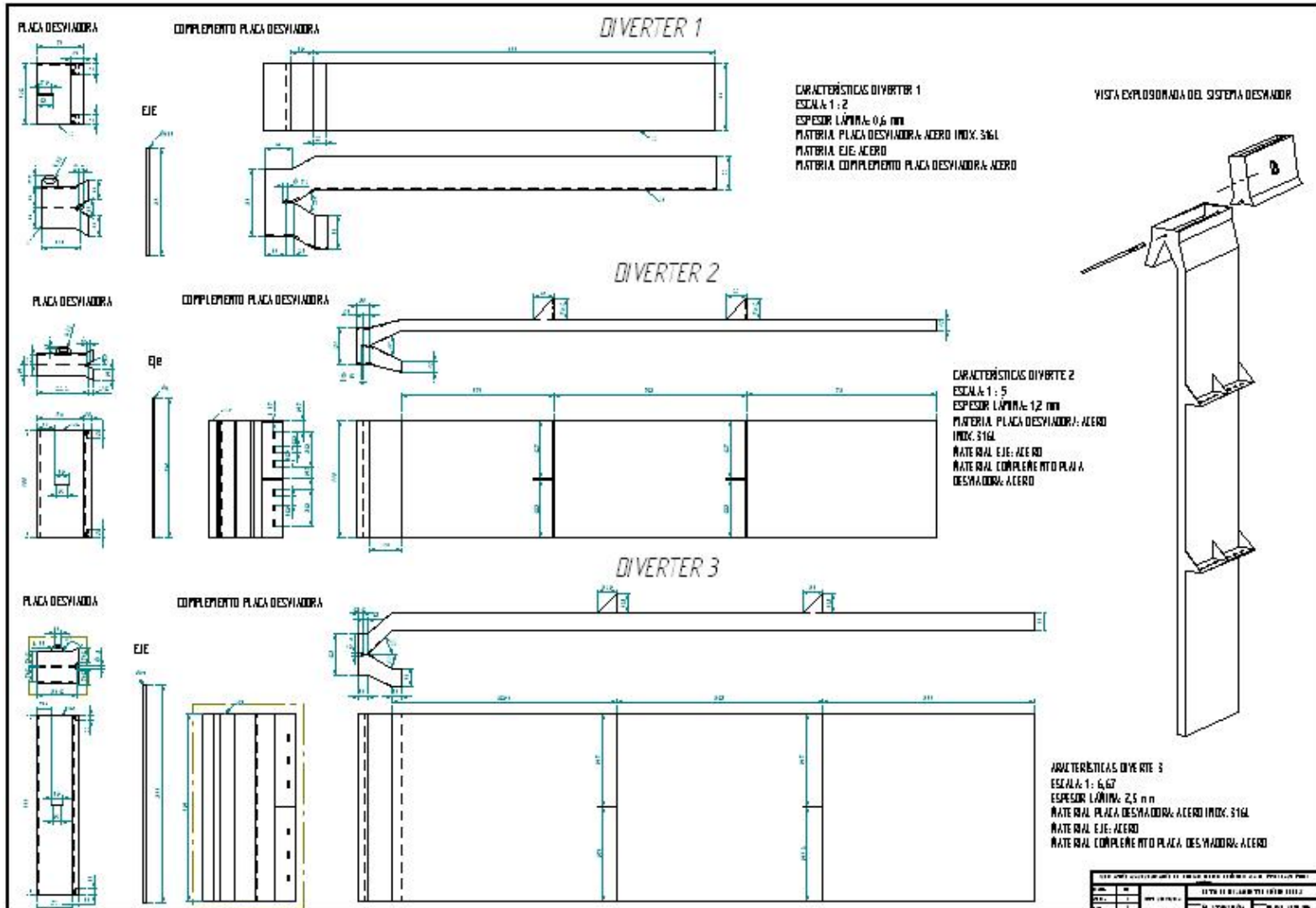


## **ANEXO 5**

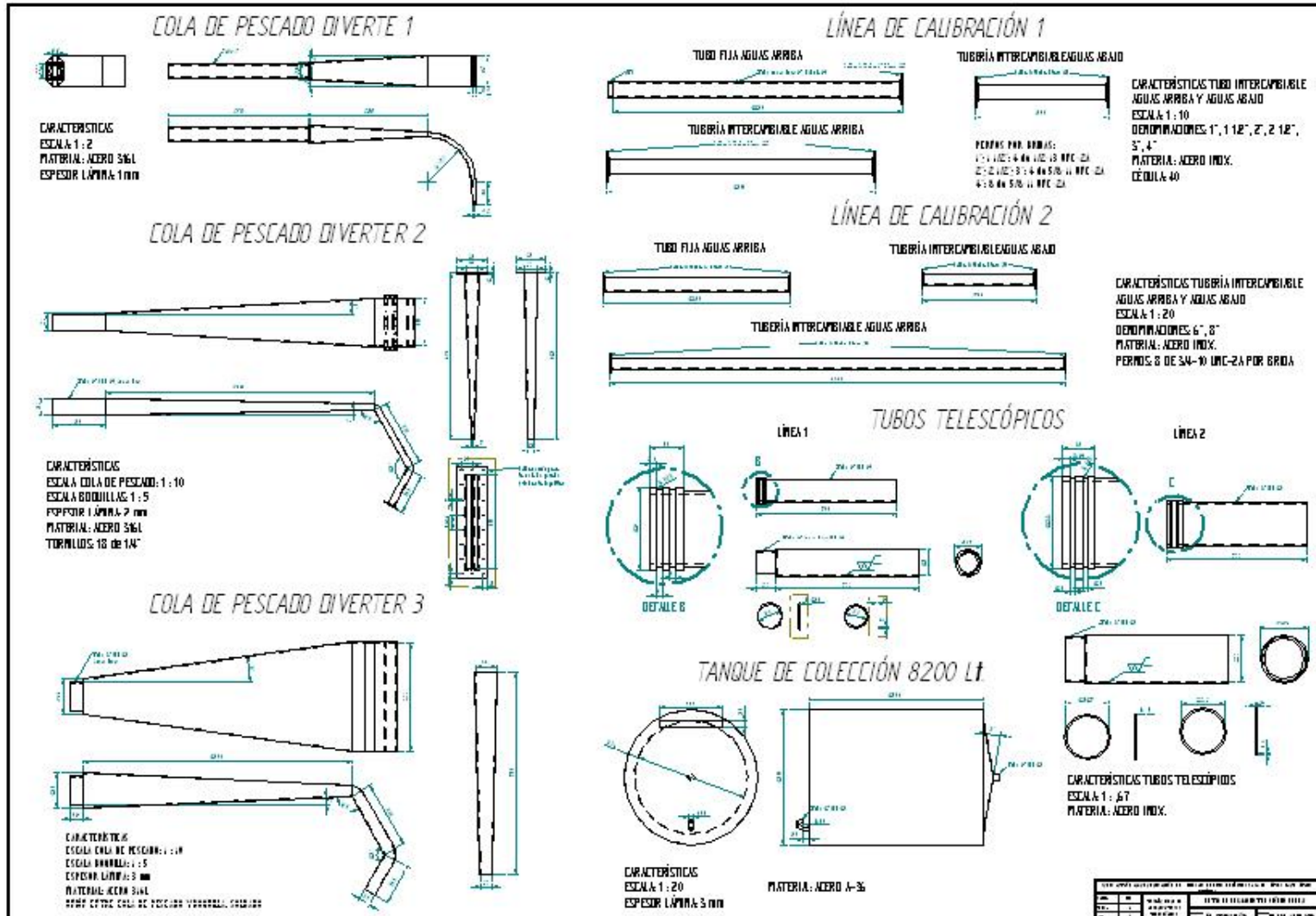
VISTA ISOMÉTRICA



# DIVERTER



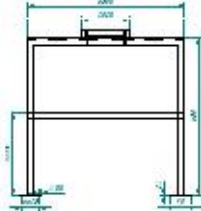
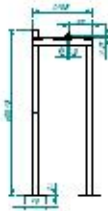
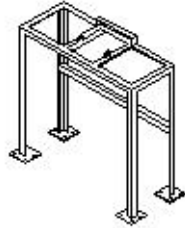
## COLA DE PESCADO Y LÍNEAS DE CALIBRACIÓN



## ESTRUCTURAS Y SOPORTES

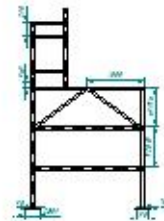
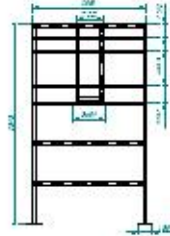
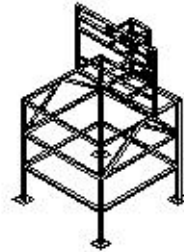
*ESTRUCTURA DIVERTER 1*

CARACTERÍSTICAS:  
ESCALA: 1 : 6,67  
MATERIAL: ACERO A-36  
PERFIL 1 1/2" X 1"



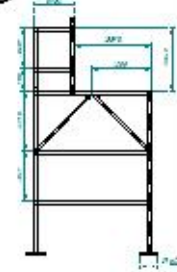
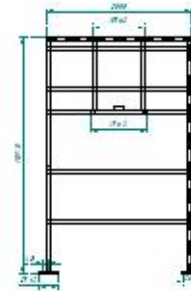
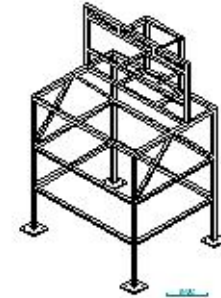
*ESTRUCTURA DIVERTER 2*

CARACTERÍSTICAS:  
ESCALA: 1 : 28,57  
PERFIL CUADRADO: 2" X 3/16"  
ZAPATAS:  
LÁMINA ACERO A-36  
ESPESOR: 10 mm  
DIÁMETRO AGUJEROS: 10mm

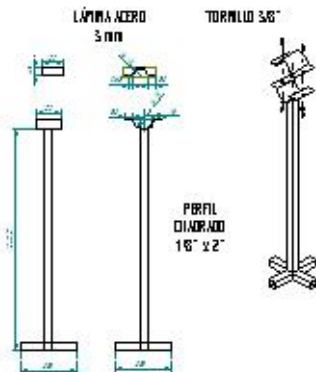


*ESTRUCTURA DIVERTER 3*

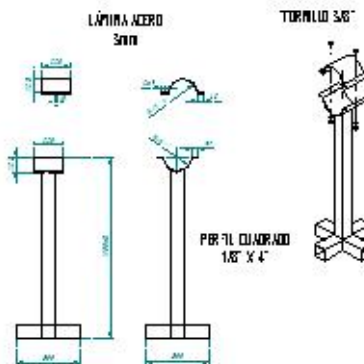
CARACTERÍSTICAS:  
ESCALA: 1 : 33,3  
MATERIAL: ACERO A-36  
PERFIL CUADRADO 3" X 1 1/4"  
ZAPATAS:  
LÁMINA ESPESOR 10 mm  
DIÁMETRO AGUJEROS: 15 mm



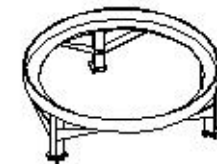
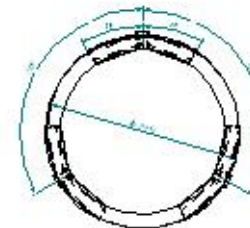
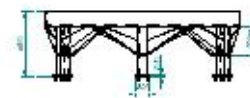
*SOPORTE LÍNEA 1*



*SOPORTE LÍNEA 2*



*SOPORTE TANQUE 8200 LITROS*



CARACTERÍSTICAS:  
ESCALA: 1 : 16,67  
MATERIAL: ACERO A-36  
PERFIL EN L: 1 1/2" X 6"  
PATAS: PERFIL CUADRADO 5/16" X 4"

PROYECTO	ESTRUCTURAS Y SOPORTES
FECHA	15/05/2023
PROYECTISTA	ING. JUAN CARLOS GARCIA
REVISOR	ING. JUAN CARLOS GARCIA
APROBADO	ING. JUAN CARLOS GARCIA