



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Civil

CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE FLUJO PARA CONDUCTOS CERRADOS

José Ramón López López

Asesorado por el Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza

Guatemala, septiembre de 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE FLUJO
PARA CONDUCTOS CERRADOS**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

JOSÉ RAMÓN LÓPEZ LÓPEZ

ASESORADO POR EL ING. LUIS MANUEL SANDOVAL MENDOZA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE LA JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Enrique Beber Aceituno
VOCAL II	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Juan Carlos Molina Jiménez
VOCAL V	Br. Mario Maldonado Muralles
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

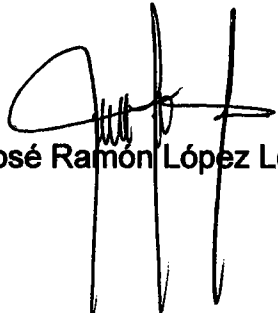
DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADORA	Inga. Carmen Marina Mérida Alva
EXAMINADOR	Ing. Jeovany Rudaman Miranda Castañón
EXAMINADOR	Ing. Alan Cosillo Pinto
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivónne Véliz Vargas

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE FLUJO PARA CONDUCTOS CERRADOS

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 3 de marzo de 2010.



José Ramón López López

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 04 de Abril de 2011

Ingeniero

Pedro Antonio Aguilar Polanco

Jefe del Departamento de Hidráulica

Facultad de Ingeniería

Después de revisar el trabajo de graduación del estudiante José Ramón López, quien se identifica con carné No. 2003-12952, titulado CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE FLUJO PARA CONDUCTOS CERRADOS, después de haber hecho las correcciones necesarias lo doy por aprobado y lo autorizo para continuar con el proceso correspondiente.

Sin otro particular, me despido atentamente.

"ID y Enseñad a Todos"

Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza

Colegiado No. 6496

LUIS M. SANDOVAL MENDOZA
INGENIERO CIVIL
Colegiado No. 6496



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



Guatemala,
8 de julio de 2011

Ingeniero
Hugo Leonel Montenegro Franco
Director Escuela Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos

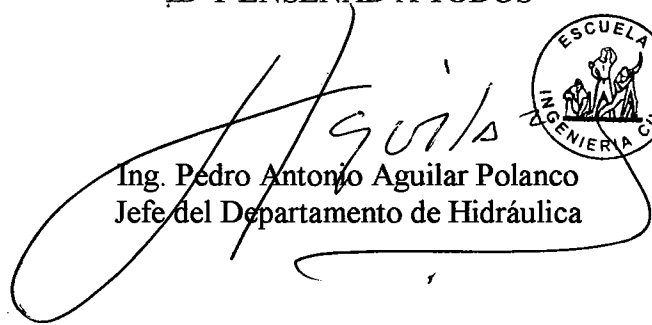
Estimado Ingeniero Montenegro.

Le informo que he revisado el trabajo de graduación **CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE FLUJO PARA CONDUCTOS CERRADOS**, desarrollado por el estudiante de Ingeniería Civil José Ramón López López, quien contó con la asesoría del Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza.

Considero este trabajo bien desarrollado y representa un aporte para la comunidad del área y habiendo cumplido con los objetivos del referido trabajo doy mi aprobación al mismo solicitando darle el trámite respectivo.

Atentamente,

ID Y ENSEÑAD A TODOS


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Jefe del Departamento de Hidráulica



FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRAULICA
USAC

/bbdeb.



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
www.ingenieria-usac.edu.gt



El director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza y del Jefe del Departamento de Hidráulica, Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco, al trabajo de graduación del estudiante José Ramón López López, titulado CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE FLUJO PARA CONDUCTOS CERRADOS, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.


Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco


UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
ESCUELA DE INGENIERIA CIVIL
DIRECTOR
FACULTAD DE INGENIERIA

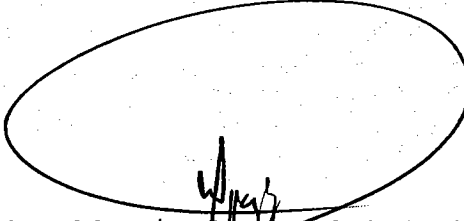
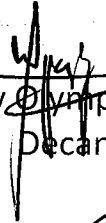
Guatemala, septiembre de 2011.

/bbdeb.



El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **CALIBRACIÓN DE INSTRUMENTOS DE MEDICIÓN DE FLUJO PARA CONDUCTOS CERRADOS**, presentado por el estudiante universitario **José Ramón López López**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 9 de septiembre de 2011

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

Mi madre

Norma Emilia López Barrios, por darme la vida, su amor, dedicación y paciencia. Infinitas gracias por tus sabios consejos, por acompañarme y desearme en todo momento lo mejor. Este triunfo también es tuyo.

Mi padre

Ramón López Díaz, por su amor y dedicación.

Mi hermana

María Cristina López, por la alegría y apoyo. En mi corazón estarás por siempre.

Mi familia

Por todo el apoyo y cariño que me han brindado. Que Dios los siga bendiciendo.

Mis amigos

José Joaquín Bojórquez Aragón, Mario José Mansilla García, Ivan de Jesús Figueroa Zarceño, Cristian Gerardo Contreras Aparicio y Mario Rolando Velásquez Chen por su amistad, apoyo y cariño.

AGRADECIMIENTOS A:

Yahveh

Todopoderoso, gracias por permitirme concretar este sueño, ser mi protector en todo momento. A tí Dios gracias.

La Universidad de San Carlos de Guatemala

Por darme la oportunidad de formarme en su casa de estudios.

La Facultad de Ingeniería

Por su excelente aporte académico.

Mis catedráticos

Por compartir sus valiosos conocimientos.

Todas las personas

Que me proporcionaron ayuda para la elaboración del presente trabajo de graduación.

Ing. Luis Manuel Sandoval Mendoza

Por su valiosa asesoría y el tiempo dedicado a la revisión del presente.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XI
RESUMEN.....	XV
OBJETIVOS.....	XVII
INTRODUCCIÓN.....	XIX
1. DEFINICIÓN DE FLUJO.....	1
1.1. Definición de Hidrometría.....	1
1.1.1. Generalidades.....	1
1.1.2. Concepto y definiciones	2
1.2. Importancia de la medición de flujo.....	2
1.3. Tipos de medidores de flujo o caudalímetros.....	3
1.3.1. Caudalímetro	3
1.3.1.1. Tipos de caudalímetro	4
1.3.1.1.1. Mecánicos visuales (de área variable) (rotámetro)	4
1.3.1.1.2. Mecánicos de molino	5
1.3.1.1.3. Electrónicos de molino.....	5
1.3.1.1.4. Electrónicos de turbina	5
1.3.1.1.5. Diferencial de presión	5
1.3.1.1.6. Magnéticos	8
1.3.1.1.7. Torbellino (Vórtex)	9

	1.3.1.1.8.	Desplazamiento	
		Positivo.....	10
	1.3.1.1.9.	Engranajes	10
	1.3.1.1.10.	Pistones.....	11
	1.3.1.1.11.	Ultrasónicos.....	12
1.4.		Exactitud requerida.....	13
1.5.		Rangos y calibración	13
	1.5.1.	Rango	13
	1.5.2.	Calibración.....	14
1.6.		Medidores de flujo de masa.....	14
	1.6.1.	Diferencial de temperatura	15
	1.6.2.	Medidores de Coriolis	16
2.		MEDIDORES DE FLUJO EN TUBERÍAS	19
2.1.		Venturímetro	20
2.2.		Boquilla de flujo	26
	2.2.1.	Dimensiones recomendadas para la placa de orificio	30
	2.2.2.	Pérdida de carga	34
2.3.		Rotámetro.....	35
2.4.		Singularidades en ensanchamiento y codo	37
	2.4.1.	Ensanchamiento.....	38
	2.4.2.	Codo	40
		2.4.2.1. Tipos	41
		2.4.2.2. Características	41
2.5.		Flujómetro de diafragma	43
	2.5.1.	Clasificación de los flujómetros de diafragma.....	44
2.6.		Flujómetro de turbina.....	45

3.	FACTORES QUE INFLUYEN EN LA SELECCIÓN DE UN MEDIDOR DE FLUJO.....	49
3.1.	Tipo de indicación	50
3.1.1.	Pérdida de presión.....	51
3.1.2.	Tipo de fluido	52
3.2.	Exactitud requerida	52
3.3.	Calibración	54
3.4.	Método de aforo de calibración volumétrico.....	55
4.	ENSAYOS DE LABORATORIO	57
4.1.	Calibración de un venturímetro	63
4.2.	Calibración en el ensanchamiento	68
4.3.	Calibración de una boquilla de flujo	72
4.4.	Calibración de un Rotámetro	76
4.5.	Calibración de un codo	78
4.6.	Comparación de los caudales tomados en los cinco medidores de flujo y determinación del porcentaje de error	83
4.7.	Porcentaje de error obtenido con el método de aforo volumétrico.....	84
	CONCLUSIONES	85
	RECOMENDACIONES.....	87
	BIBLIOGRAFÍA.....	89

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Rotámetro.	4
2.	Caudalímetro para agua (derecha) y caudalímetro para gas (izquierda) Rotámetro.	5
3.	Electrónico de molino.	6
4.	Diferencial de presión.	7
5.	Magnéticos.	8
6.	Generación de vórtices dentro de la tubería.	9
7.	Vórtex montando sobre una tubería.	9
8.	Interior de un equipo.	10
9.	Etapas de funcionamiento de un pistón.	11
10.	Ultrasonidos.	12
11.	Diferencial de temperatura.	15
12.	Caudalímetro básico por el principio de Coriolis.	16
13.	Vista interior de un medidor de Coriolis.	17
14.	Esquema de un medidor tipo Venturi.	20
15.	Tubo de Venturi.	22
16.	Un tubo de Venturi inclinado.	23
17.	Boquilla o tobera de flujo.	27
18.	Boquilla de flujo.	28
19.	Dimensiones recomendadas para la placa de orificio.	30
20.	Localización del punto de instalación para las placas de orificio con accesorios en un mismo plano.	31
21.	Posiciones de las tomas de presión.	33

22.	Esquema de un Rotámetro.	36
23.	Ensanchamiento en tubería.	38
24.	Válvula de diafragma.	43
25.	Sección transversal de un medidor de turbina para líquidos.	46
26.	Curva de comportamiento de un medidor de turbina para líquidos.	47
27.	Proceso para la selección de un medidor de flujo.	50
28.	Aforo volumétrico.	55
29.	Dispositivo experimental, mostrando la conducción horizontal, el Rotámetro (vertical) y el panel de tubos piezométricos.	57
30.	Diámetros de los elementos del conducto.	58
31.	Flujograma del dispositivo experimental.	61
32.	Obtención del coeficiente de descarga C_d en el tubo de Venturi.	66
33.	Obtención del coeficiente de descarga C_d del caudal real en relación con la pérdida de energía en el tubo de Venturi.	67
34.	Representación de los caudales obtenidos en el tubo de Venturi.	68
35.	Obtención del coeficiente de descarga C_d en el ensanchamiento.	70
36.	Obtención del coeficiente de descarga C_d del caudal real en relación con la pérdida de energía en el ensanchamiento.	71
37.	Representación de los caudales obtenidos en el ensanchamiento.	72
38.	Obtención del coeficiente de descarga C_d en la boquilla de flujo.	74
39.	Obtención del coeficiente de descarga C_d del caudal real en relación con la pérdida de energía la boquilla de flujo.	75
40.	Representación de los caudales obtenidos en la boquilla de flujo.	76
41.	Variación de la pérdida de carga con el caudal en el Rotámetro.	78
42.	Obtención del coeficiente de descarga C_d en el codo.	80
43.	Obtención del coeficiente de descarga C_d del caudal real en relación con la pérdida de energía en el codo.	81
44.	Representación de los caudales obtenidos en el codo.	82
45.	Comparación de las curvas de caudales para cada flujímetro.	83

TABLAS

I.	Dimensiones recomendadas para los elementos primarios.....	32
II.	Dimensiones extremas para los elementos primarios.....	32
III.	Posiciones de las formas de presión.....	33
IV.	Porcentaje de pérdida de carga.....	34
V.	Clases de exactitud según OIML R 117.....	53
VI.	Errores máximos permisibles de acuerdo con la clase de exactitud según OIML R 117.....	54
VII.	Datos obtenidos en el ensayo.....	62
VIII.	Datos obtenidos en la calibración de un venturímetro.....	65
IX.	Datos obtenidos en la calibración en el ensanchamiento.....	69
X.	Datos obtenidos en la calibración de una boquilla de flujo.....	73
XI.	Datos obtenidos en la calibración del Rotámetro.....	77
XII.	Datos obtenidos en la calibración de un codo.....	79
XIII.	Porcentaje de error obtenido con el método de aforo volumétrico.....	84

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
a	Aceleración, área
g	Aceleración de la gravedad = $9,81\text{m/s}^2$
h	Altura de carga, altura o profundidad, altura o carga de presión
H	Altura o carga total (energía por unidad de peso)
z	Altura topografía o cota, elevación
A	Área
C_d	Coefficiente de descarga
k	Coefficiente de descarga en el rotámetro
ρ	Densidad
d,D	Diámetro
x	Distancia
F	Fuerza, empuje
L	Longitud
π	Parámetro adimensional

H_L, h_L	Pérdida de carga (algunas veces se designa LH)
p	Presión, perímetro mojado
y	Profundidad, distancia
r	Radio
ε	Rugosidad superficial
T	Temperatura
Δ	Término correctivo del flujo
t	Tiempo necesario para aforar
t_p	Tiempo promedio para aforar
v	Volumen, velocidad del fluido

GLOSARIO

Aforar	Medir la cantidad de agua que lleva un fluido por unidad de tiempo.
Caudal	Cantidad de fluido que pasa en una unidad de tiempo.
Cavitación	La cavitación o aspiración en vacío es un efecto hidrodinámico que se produce cuando el agua o cualquier otro fluido en estado líquido pasa a gran velocidad por una arista afilada, produciendo una descompresión del fluido debido a la conservación de la constante de Bernoulli.
Ciclómetro	Nombre por el que se conoce al equipo que sirve para medir velocidades de rotación.
Coefficiente	Factor multiplicativo vinculado a ciertos elementos matemáticos.
Coriolis	Efecto que se observa en un sistema de referencia en rotación (y por tanto no inercial).
Diámetro	Línea recta que pasa por el centro del círculo y termina por ambos extremos en la circunferencia.
Diferencial de presión	Diferencia entre un determinado valor de presión y otro utilizado como referencia.

Efecto Doppler	Aparente cambio de frecuencia de una onda producido por el movimiento relativo entre la fuente, el emisor y/o el medio.
Energía cinética	Energía que posee el elemento fluido debido a su velocidad.
Fluido	Sustancia o medio continuo que se deforma continuamente en el tiempo ante la aplicación de una sollicitación o tensión tangencial, sin importar la longitud de ésta.
Flujo	Movimiento de una sustancia líquida o gaseosa,
Fluxómetro	Fluxómetro o fluxor (del inglés <i>flushometer</i>) es un mecanismo de descarga de agua para inodoros y urinarios.
Ingeniería	Aplicación de los conocimientos científicos a la invención, perfeccionamiento y utilización de la técnica industrial en todas sus ramas.
Interruptor de lengüeta	Interruptor encapsulado en un tubo de vidrio al vacío que se activa al encontrar un campo magnético.
Ley de Faraday	Establece que la corriente inducida en un circuito es directamente proporcional a la rapidez con que cambia el flujo magnético que lo atraviesa.
Manómetro	Instrumento para medir la presión de un fluido.

Menisco	Curvatura que presentan los líquidos en su superficie y pueden ser cóncavos o convexos.
Metrología	Comprende todos los aspectos, tanto teóricos como prácticos, que se refieren a las mediciones, cualesquiera que sean sus incertidumbres.
Oscilación	Una variación, perturbación o fluctuación en el tiempo de un medio o sistema.
Piezómetro	Instrumento que mide la presión de un fluido en un punto.
Presión	Magnitud física que mide la fuerza por unidad de superficie.
Sensor de efecto de campo magnético	También usado en electrónica, es un contador que permite leer la cantidad de vueltas por minuto que está dando un imán permanente y entregar pulsos.
Teorema de Bernoulli	Energía total de un sistema de fluidos con flujo uniforme permanece constante a lo largo de la trayectoria de flujo.
Tobera	Dispositivo que convierte la energía potencial de un fluido (en forma térmica y de presión) en energía cinética.

Válvula	Dispositivo mecánico con el cual se puede iniciar, detener o regular la circulación (paso) de líquidos o gases mediante una pieza movable que abre, cierra u obstruye en forma parcial uno o más orificios o conductos.
Viscosidad	Oposición de un fluido a las deformaciones tangenciales.
Volumen	Cantidad de espacio que ocupa un cuerpo.
Vórtices	Flujo turbulento en rotación espiral, con trayectorias de corriente cerradas.

RESUMEN

Se realizó una recopilación de documentos que presentan el contenido básico para la calibración de cinco medidores de flujo y con ello implementar una práctica de laboratorio correspondiente a la asignatura de Mecánica de Fluidos, de la Facultad de Ingeniería. Por lo cual el presente trabajo de graduación se orienta hacia el ejercicio profesional sobre las distintas magnitudes fluido-dinámicas relevantes de un flujo, lo cual es de mucho interés para prácticas experimentales que se ejecutan con los equipos disponibles en el laboratorio de Hidráulica.

En general, el estudiante conocerá el funcionamiento tanto cualitativo como cuantitativo de: tubo de Venturi, un ensanchamiento, placa de orificio, un codo y un rotámetro, los cuales están conectados en serie; esta práctica permite al alumno de Ingeniería un primer encuentro satisfactorio con flujos de características reales de distintos tipos.

En todos los casos se busca además una cuantificación de las variables involucradas, mediante el empleo de la adecuada instrumentación de medida y con ello determinar su coeficiente de descarga para cada medidor de flujo. Se pretende que el estudiante tenga información necesaria para diseñar un sistema eficiente, minimizando la cantidad de energía requerida en el uso de ecuaciones, adaptando una al caudal real que circula en el circuito.

OBJETIVOS

General

Elaborar un documento que contenga toda la información respecto de los instrumentos de medición de flujo: venturímetro, una placa de orificio, singularidades como un ensanchamiento y un codo, rotámetro, así como un instructivo para la calibración de cada uno de ellos.

Específicos

1. Proponer una práctica de medidores de flujo en el laboratorio de Mecánica de Fluidos.
2. Restaurar el equipo para colocar en serie los instrumentos para su calibración.
3. Proveer al estudiante un manual que indique los pasos que deben seguirse para la calibración de un instrumento de medición de flujo.

INTRODUCCIÓN

En Ingeniería Hidráulica es imprescindible la determinación del caudal en un sistema de conducción ya sea cerrado o abierto, para distintos propósitos, por ejemplo: diseño de una línea de conducción, distribución de sistema de riego o generación de energía eléctrica. Por lo que es imprescindible el conocimiento de los distintos instrumentos que existen para medir flujo volumétrico, los cuales funcionan con los principios de la Mecánica de Fluidos, como la ecuación de continuidad o el principio de Bernoulli.

Los proyectos de Ingeniería Hidráulica son de gran importancia para el avance tecnológico, progreso y la calidad de vida. Muchos de estos proyectos están formados por estructuras, conductos cerrados, máquinas hidráulicas y otros. Por tal motivo, el presente trabajo de graduación pretende estudiar los principales instrumentos para medición de flujo, desarrollando así un medio de información escrita que presente en forma analítica sus resultados y el comportamiento que presenta a través de distintos tipos de conductos, desde el punto de vista hidráulico. Al mismo tiempo como parte experimental, se realizó un sistema físico que produce un caudal en una tubería en la cual se instalarán algunos flujímetros con el propósito de analizar, calcular y observar el comportamiento de este.

Todo lo referido anteriormente tiene como fin esencial ayudar al estudiante de los cursos de Mecánica de Fluidos e Hidráulica, a conocer y familiarizarse con los distintos instrumentos de medición de flujo en tuberías y su funcionamiento.

Para tener una visión clara, el trabajo de graduación se ha estructurado en cuatro capítulos: el primero hace énfasis en conceptos y definiciones de medidores de flujo, su importancia y funcionamiento; el segundo contiene detalladamente la evaluación de cada flujímetro; los parámetros, las dimensiones recomendadas y las singularidades que habitualmente se presentan en la instalación de tuberías; el tercer capítulo está enfocado a la caracterización y los factores que se deben tomar en cuenta para la selección de un medidor de flujo; la exactitud requerida y calibración, los cuales estarán en función del tipo de fluido que se esté analizando; el cuarto capítulo se refiere a la calibración de los cinco medidores de flujo colocados en serie, utilizando como referencia el rotámetro, para su respectiva comparación, el porcentaje de error obtenido en cada medidor y en el aforo volumétrico.

1. MEDICIÓN DE FLUJO

La medición de flujo de fluidos es un proceso complejo debido a que otras magnitudes tienen una influencia determinante en el comportamiento de los medidores de flujo, en algunos casos es afectado también por instalaciones inadecuadas que producen distorsiones en el régimen de flujo, vórtice y vibración.

1.1. Definición de Hidrometría

1.1.1. Generalidades

La palabra hidrometría proviene de las voces griegas hydro (agua) y metría (medición). La palabra hidrometría significa “medición de cantidad de agua”, sea el agua que corre en un riachuelo o en un río, la que pasa por una tubería, la que se produce en un pozo, la que llega a o sale de una planta de tratamiento, la que se consume en una ciudad, industria o residencia, etc.

La Hidrometría se encarga de medir, registrar, calcular y analizar los volúmenes de agua que circulan en una sección transversal de un río, canal o tubería; pertenecientes a un pequeño o gran sistema de conducción en funcionamiento.

1.1.2. Conceptos y definiciones

En forma clásica, se define la Hidrometría como la parte de la Hidráulica que tiene por objeto medir el volumen de agua que pasa, por unidad de tiempo, dentro de una sección transversal del flujo.

La Hidrometría además de medir el agua, comprende también el planear, ejecutar y procesar la información que se registra de un sistema de riego, sistema de una cuenca hidrográfica, sistema urbano de distribución de agua, etc. En general, para el estudiante de Ingeniería, la Hidrometría tiene dos propósitos generales:

- a) Conocer el volumen de agua disponible en la fuente (Hidrometría a nivel de fuente natural).
- b) Conocer el grado de eficiencia de la distribución (Hidrometría de operación).

1.2. Importancia de la medición de flujo

Los medidores de flujo se emplean en operaciones tan diversas como: el control de procesos, balances de energía, distribución, emisión de contaminantes, metrología legal, indicación de condición y alarma, hasta lo que probablemente es la aplicación más importante, la transferencia de custodia de fluidos como el petróleo y sus derivados. La medición de flujo de fluidos es un proceso complejo debido a que otras magnitudes tienen una influencia determinante en el comportamiento de los medidores de flujo, por ejemplo:

instalaciones inadecuadas, distorsiones en el régimen de flujo, vórtices y vibración.

En aplicaciones industriales como el control de procesos donde la medición del flujo del fluido tiene un alto impacto sobre la calidad del producto final, en los balances energéticos de plantas para evaluar su eficiencia, en la cuantificación de la emisión de contaminantes y en actividades de metrología legal que demandan la garantía de mediciones de buena exactitud ó en los sistemas de indicación o alarma, se encuentran siempre medidores de flujo de líquidos.

1.3. Tipos de medidores de flujo o caudalímetros

1.3.1. Caudalímetro

Instrumento empleado para la medición del caudal volumétrico de un fluido o caudal másico. Estos equipos suelen colocarse en línea con la tubería que transporta el fluido. También suelen llamarse medidores de caudal, medidores de flujo o flujómetros.

Existen versiones mecánicas y eléctricas. Entre las mecánicas se encuentran los viejos contadores de agua instalados a la entrada de una vivienda para determinar cuántos metros cúbicos de agua se consumieron. Un ejemplo de caudalímetro eléctrico se puede encontrar en los calentadores de agua que lo utilizan para determinar el caudal que está circulando o en las lavadoras para llenar su tanque a diferentes niveles.

1.3.1.1. Tipos de caudalímetros

1.3.1.1.1. Mecánicos visuales (de área variable) (rotámetro)

Se trata de un cono transparente, invertido, con una esfera plástica en su base. El fluido al circular impulsa la esfera hacia arriba; a mayor caudal más sube la esfera. La gravedad hace bajar la esfera al detenerse el flujo. El cono tiene unas marcas que indican el caudal.

Generalmente es empleado para medir gases en lugares donde se requiere conocer el caudal con poca precisión. Un ejemplo se puede ver en los hospitales, unidos de la llave del suministro de oxígeno.

Una modificación de este modelo permite medir la capacidad de pulmonar de una persona que haya sufrido alguna lesión, recogiendo una exhalación a través de un adaptador para los labios.

Figura 1. **Rotámetro**

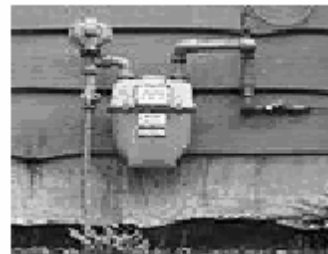


Fuente: <http://es.wikipedia.org/>

1.3.1.1.2. Mecánicos de molino

Consisten en un molino cuyas aspas están transversales a la circulación del fluido. El flujo hace girar el molino, cuyo eje mueve un contador que acumula lecturas. Un ejemplo de este uso son los contadores de agua de las viviendas o los antiguos contadores de gas natural.

Figura 2. **Caudalímetro para agua (derecha) y caudalímetro para gas (izquierda)**

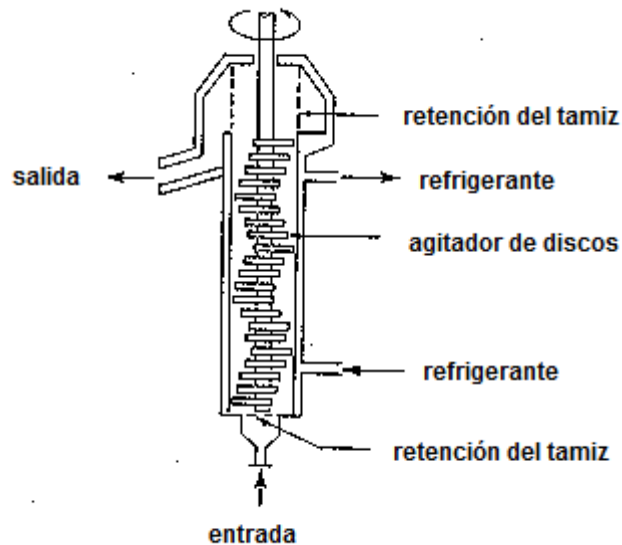


Fuente: <http://es.wikipedia.org/>

1.3.1.1.3. Electrónicos de molino

Sus partes mecánicas que consisten en un molino con aspas transversales a la circulación de flujo; el molino tiene en un extremo un imán permanente. Cuando este imán gira genera un campo magnético variable, que es leído por un sensor de efecto de campo magnético (*Hall Effect Switch*); después, el circuito electrónico lo convierte en pulsos que transmite a través de un cable.

Figura 3. **Electrónico de molino**



Fuente: <http://www.plusformacion.com>

En otra versión de este tipo de caudalímetro se instalan imanes en los extremos de las aspas. Al girar los imanes pasan cerca de un interruptor de lengüeta (*reed switch*) que cuenta los pulsos. La desventaja de este diseño está en la limitación de las revoluciones por minuto que puede alcanzar a leer un *reed switch*.

También existe otro tipo de caudalímetro de molino en versión transparente, donde solo se requiere confirmar que existe circulación, sin importar el caudal.

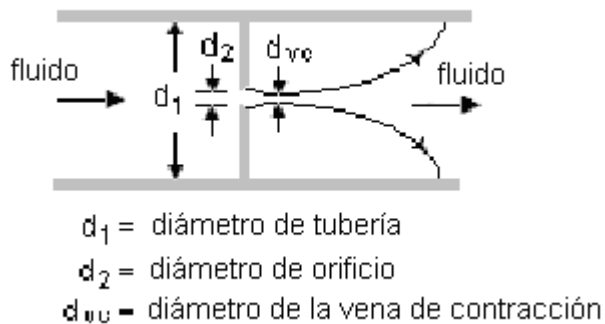
1.3.1.1.4. Electrónicos de turbina

Una turbina colocada de frente al flujo, encapsulada en las paredes de un tubo, rota proporcionalmente al caudal. La turbina, fabricada con un compuesto de resina y polvo de alnico, genera un campo magnético que es leído y codificado por un *Hall-Effect switch*.

1.3.1.1.5. Diferencial de presión

La tubería disminuye su diámetro levemente y después regresa a su diámetro original. El fluido obligado a circular por esta reducción disminuye su presión a la salida. La diferencia de presión de antes y después es medida de manera mecánica o electrónica. A mayor diferencia de presión mayor es el caudal.

Figura 4. Diferencial de presión



Fuente: <http://es.wikipedia.org/>

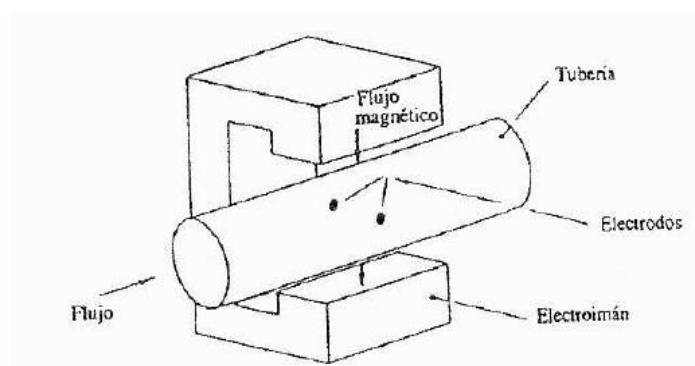
Existen otras variantes, pero todas basadas en la diferencia de la lectura de presión antes y después. Un ejemplo es el que se observa en los motores de combustión interna a la entrada del aire del motor. Parámetro que necesitan las computadoras de los automóviles para determinar qué cantidad de aire está entrando al motor para lograr una mezcla (aire-combustible) ideal.

1.3.1.1.6. Magnéticos

Están basados en la ley de Faraday, que enuncia que el voltaje inducido a través de un conductor que se desplaza transversal a un campo magnético es proporcional a la velocidad del conductor.

Se aplica un campo magnético a una tubería y se mide el voltaje de extremo a extremo de la tubería. Este sistema es muy poco intrusivo pero sólo funciona con líquidos que tengan algo de conductividad eléctrica. Es de muy bajo mantenimiento, ya que no tiene partes móviles.

Figura 5. Magnéticos

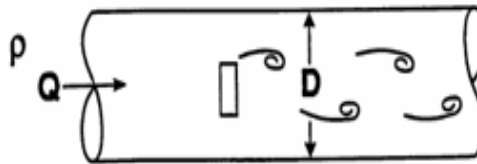


Fuente: <http://www.monografias.com/>

1.3.1.1.7. Torbellino (Vórtex)

Está basado en el principio de generación de vórtices. Un cuerpo que atraviese un fluido generará vórtices flujo abajo. Estos vórtices se forman alternándose de un lado al otro, causando diferencias de presión, estas son registradas por un cristal piezoeléctrico. La velocidad de flujo es proporcional a la frecuencia de formación de los vórtices. Son equipos de bajo mantenimiento y buena precisión.

Figura 6. **Generación de vórtices dentro de la tubería**



Fuente: <http://es.wikipedia.org/>

Figura 7. **Vórtex montado sobre una tubería**



Fuente: <http://es.wikipedia.org/>

1.3.1.1.8. Desplazamiento positivo

Separan el líquido en porciones que llenan un recipiente mientras se desplaza. Después cada porción es contada para medir el caudal. Existen muchas variantes de este sistema. De tornillo, de engranajes, pistones, etc.

1.3.1.1.9. Engranajes

Se refiere a dos engranajes encontrados que hacen un sello perfecto, el fluido debe circular entre los dos engranajes, forzándolos a girar. Este movimiento se puede medir de forma electrónica o mecánica.

Cada uno de los engranajes tiene un imán permanente que se usa para enviar información a la parte electrónica del equipo (se instala arriba mediante tornillos) y se detecta el paso del imán mediante un *Hall-Effect switch*.

Figura 8. Interior de un equipo



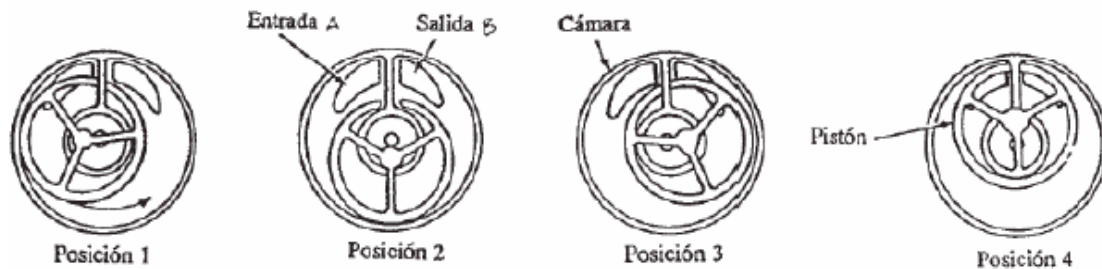
Fuente: <http://es.wikipedia.org/>

1.3.1.1.10. Pistones

El medidor de pistón rotatorio es el más común de los medidores de desplazamiento positivo y está ilustrado en la figura 9. Este usa un pistón cilíndrico, el cual es desplazado en una cámara también cilíndrica por el fluido. La rotación del pistón se transmite a un eje de salida. Este puede ser usado con una escala de indicación para dar una salida visual o ser convertido en una señal eléctrica de salida.

Un medidor de campo colocado fuera del caudalímetro mide estas oscilaciones y las convierte en pulsos.

Figura 9. **Etapas de funcionamiento de un pistón**



Fuente: <http://es.wikipedia.org/>

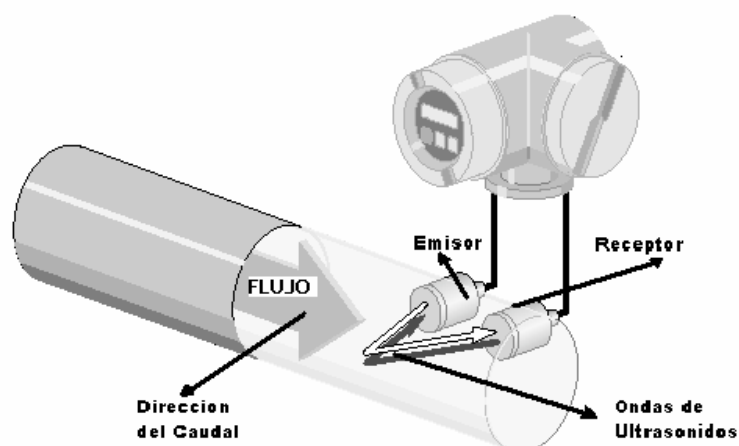
Como se mencionó, consiste en un pistón hueco montado excéntricamente dentro de un cilindro. El cilindro y el pistón tienen la misma longitud, pero el pistón tiene un diámetro más pequeño que el cilindro. El pistón, cuando está en funcionamiento, oscila alrededor de un puente divisor, que separa la entrada de la salida del líquido. Al comienzo de un ciclo, el líquido entra al medidor a través de la puerta de entrada A, en la posición 1, forzando al pistón a moverse alrededor del cilindro en la dirección mostrada en la figura 9,

hasta que el líquido delante del pistón es forzado a salir a través de la puerta de salida B, en la posición 4, quedando el dispositivo listo para comenzar otro ciclo.

1.3.1.1.11. Ultrasonicos

Son alimentados eléctricamente y es posible encontrar dos tipos según su principio de medición: de efecto Doppler y de tiempo de tránsito; este último consiste en medir la diferencia entre el tiempo que le toma a dos señales atravesar una misma distancia, pero en sentido contrario, utilizando como medio un fluido. Si el caudal del fluido es nulo, los tiempos serán iguales, pero cuando hay flujo los tiempos serán diferentes, ya que las velocidades de las señales serán afectadas por la del fluido cuyo caudal se desea determinar; esta diferencia de tiempo más el conocimiento sobre la geometría de la tubería y la velocidad del sonido en el medio, permiten evaluar la velocidad del fluido o el caudal.

Figura 10. Ultrasonico



Fuente: <http://www.monografias.com>

Los de tiempo de tránsito son más exactos que los de efecto Doppler, pero para obtener lecturas se requiere que los fluidos tengan un bajo porcentaje de impurezas; en caso contrario, los de efecto Doppler son de utilidad y entregan una muy buena señal, ya que su principio de funcionamiento se basa en el cambio de frecuencia de la señal reflejada sobre algún elemento que se mueve con el fluido.

La exactitud de estos sistemas de medición es muy dependiente del cumplimiento de los supuestos de flujo laminar.

1.4. Exactitud requerida

Cualquier dispositivo de medición de flujo instalado y operado adecuadamente puede proporcionar una exactitud dentro del 5 % del flujo real. La mayoría de los medidores en el mercado tienen una exactitud del 2% y algunos pueden tener una exactitud de más del 0.5%. El costo es con frecuencia uno de los factores importantes cuando se requiere de una gran exactitud.

1.5. Rangos y calibración

1.5.1. Rango

Los medidores disponibles en el mercado pueden medir flujos desde varios mililitros por segundo (ml/s), para experimentos precisos de laboratorio; hasta cientos de metros cúbicos por segundo (m^3/s), para sistemas de irrigación de agua, agua municipal o sistemas de drenaje. Para una instalación de

medición en particular, debe conocerse el orden de magnitud general de la velocidad de flujo así como el rango de las variaciones esperadas.

1.5.2. Calibración

Se requiere de calibración en algunos tipos de medidores. Algunos fabricantes proporcionan una calibración en forma de una gráfica o esquema del flujo real contra indicación de la lectura. Algunos están equipados para hacer la lectura en forma directa, con escalas calibradas en las unidades de flujo que se deseen. En el caso del tipo más básico de los medidores, tales como los de cabeza variable, se han determinado formas geométricas y dimensiones estándar, para las que se encuentran datos empíricos disponibles. Estos datos relacionan el flujo con una variable de fácil medición, tal como una diferencia de presión o un nivel de fluido.

1.6. Medidores de flujo de masa

Los medidores de flujo de masa difieren de los demás en que miden directamente el peso del flujo y no su volumen. El medidor de masa de flujo mide flujos gaseosos o líquidos, por ejemplo, expresándolos directamente en libras y, por lo tanto, no le afectan las variaciones de presión, temperatura ni densidad del fluido. La unidad completa incluye cuatro componentes básicos: el elemento sensible a la velocidad del flujo, el mecanismo del giroscopio integrador, el registrador ciclométrico y el accionador de contactos.

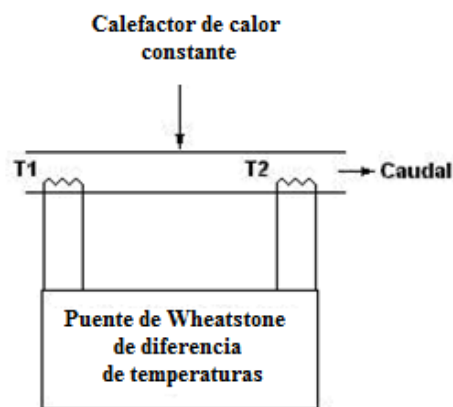
1.6.1. Diferencial de temperatura

Los medidores de diferencial de temperatura, también llamados medidores de caudal Thomas, se basan comúnmente en dos principios físicos:

- a) La elevación de temperatura del fluido en su paso por un cuerpo caliente.
- b) La pérdida de calor experimentada por un cuerpo caliente inmerso en el fluido.

El funcionamiento de estos equipos consta de una fuente eléctrica de alimentación de precisión que proporciona un calor constante al punto medio del tubo por el cual circula el caudal. En puntos equidistantes de la fuente de calor se encuentran sondas de resistencia para medir la temperatura.

Figura 11. Diferencial de temperatura



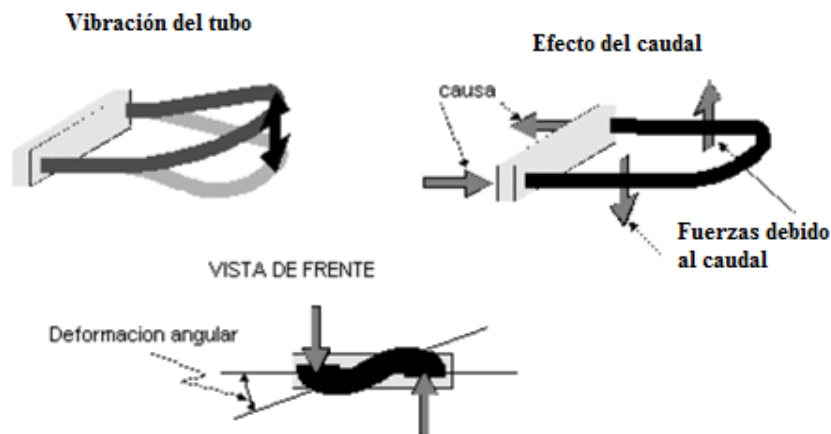
Fuente: <http://www.monografias.com>

1.6.2. Medidor de Coriolis

La medición de caudal por el efecto Coriolis, también conocido como medición directa o dinámica, da una señal directamente proporcional al caudal másico y casi independiente de las propiedades del producto como conductividad, presión, viscosidad o temperatura. La fuerza Coriolis aparece siempre y cuando se trata de una superposición de movimientos rectos con movimientos giratorios. Para el uso industrial de su principio se sustituye el movimiento giratorio por una oscilación mecánica. Dos tubos de medición por donde pasa el producto, oscilan en su frecuencia de resonancia.

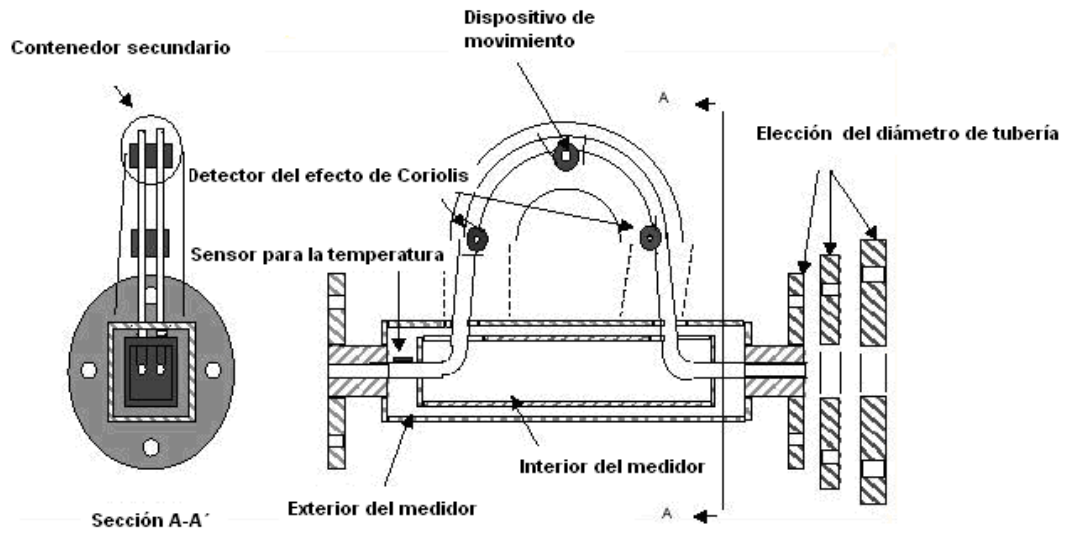
El caudal másico provoca un cambio en la fase de la oscilación entre la entrada y la salida del equipo. Este desfase es proporcional al caudal másico y crea después de una amplificación correspondiente la señal de salida. Las frecuencias de resonancia de los tubos de medición dependen de la masa oscilante en los tubos y por lo tanto de la densidad del producto.

Figura 12. Caudalímetro básico por el principio de Coriolis



Fuente: <http://www.monografias.com>

Figura 13. Vista interior de un medidor de Coriolis



Fuente: <http://www.monografias.com>

2. MEDIDORES DE FLUJO EN TUBERÍAS

Un punto fundamental en el estudio de flujos por el interior de tuberías es el conocimiento del caudal y la velocidad del fluido que circula a través de éstas. Los diferentes métodos para la medida de velocidades medias en el flujo de fluidos pueden clasificarse en tres grupos:

- a) Los basados en la diferencia de presión provocada por estrechamientos de la conducción con secciones de flujo constantes: diafragmas, boquillas y venturímetros.
- b) Los basados en secciones de flujo variables provocadas por las diferencias de presión constantes que determina un flotador; rotámetros.
- c) Los indirectos, basados en la medida de caudales en la determinada sección de flujo: contadores mecánicos, medidores térmicos, medidores ultrasónicos, medidores magnéticos, etc.

En la mayor parte de las industrias es trascendental trasegar fluidos de un punto a otro. Este es el campo de estudio de la Dinámica de Fluidos. Por lo tanto este estudio constituye un pilar fundamental de los conocimientos en la Ingeniería. Este estudio no sería posible sin la ayuda de los medidores de flujo, que se encargan de medir la velocidad del fluido. Entre los distintos tipos de medidores se encuentran los medidores de orificio, las toberas, los venturímetros, los rotámetros, los anemómetros, etc.

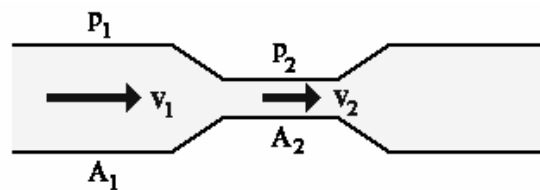
La mayor parte de estos equipos basan su funcionalidad en la primera ley de la Termodinámica, que enuncia la conservación de la energía total de los sistemas. En este caso, el fluido presenta diversas formas de energía, como la energía mecánica, que se subdivide a su vez en energía cinética y energía potencial, así como la energía interna del fluido, que es expresada como la presión del mismo; no es común considerar los cambios térmicos del mismo, no obstante, en caso de haber un cambio en la temperatura del mismo, también debe incluirse la misma en el balance general de energía.

Por otra parte, están los medidores de alta tecnología, que basan su funcionamiento en otros fenómenos físicos, como la refracción de ondas electromagnéticas, el efecto Doppler, la conductividad eléctrica y la fuerza de sustentación hidrodinámica.

2.1. Venturímetro

Es un tipo de boquilla especial, seguida de un cono que se ensancha gradualmente, accesorio que evita en gran parte la pérdida de energía cinética debido al rozamiento. Es por principio un medidor de área constante y de caída de presión variable.

Figura 14. Esquema de un medidor tipo Venturi



Fuente: <http://tarwi.lamolina.edu.pe>

El tubo de Venturi es un dispositivo que origina una pérdida de presión al pasar por él un fluido. En esencia, este consiste en una tubería corta recta, o garganta, entre dos tramos cónicos. La presión varía en la proximidad de la sección estrecha; así, al colocar un manómetro o instrumento registrador en la garganta, se puede medir la caída de presión y calcular el caudal instantáneo, o bien, uniéndola a un depósito carburante, se puede introducir este combustible en la corriente principal.

Las dimensiones del tubo de Venturi para medición de caudales, tal como las estableció Clemens Herschel, son por lo general las que indica la figura 14. La entrada es una tubería corta recta del mismo diámetro que la tubería a la cual va unida.

La presión que precede al cono de entrada se transmite a través de múltiples aberturas a una abertura anular llamada anillo piezométrico. De modo análogo, la presión en la garganta se transmite a otro anillo piezométrico. Una sola línea de presión sale de cada anillo y se conecta con un manómetro o registrador. En algunos diseños los anillos piezométricos se sustituyen por sencillas uniones de presión que conducen a la tubería de entrada y a la garganta.

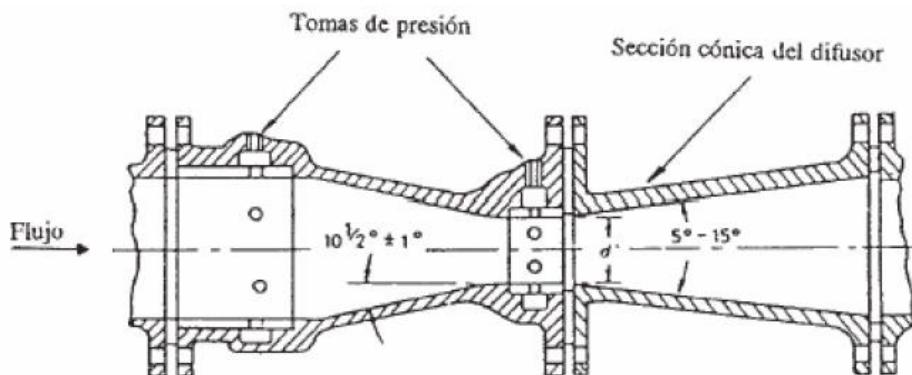
La principal ventaja del venturímetro estriba en que sólo pierde un 10 a 20% de la diferencia de presión entre la entrada y la garganta. Esto se consigue por el cono divergente que desacelera la corriente.

Es importante conocer la relación que existe entre los distintos diámetros que tiene el tubo, ya que dependiendo de los mismos es que se va a obtener la presión deseada a la entrada y a la salida del mismo, para que pueda cumplir la función para la cual está construido.

Esta relación de diámetros y distancias es la base para realizar los cálculos para la construcción de un tubo de Venturi y con los conocimientos del caudal que se desee pasar por él.

Deduciendo, se puede decir que un tubo de Venturi típico consta, como ya se dijo anteriormente, de una admisión cilíndrica, un cono convergente, una garganta y un cono divergente. La entrada convergente tiene un ángulo incluido de alrededor de 21° , y el cono divergente de 7° a 8° .

Figura 15. **Tubo de Venturi**

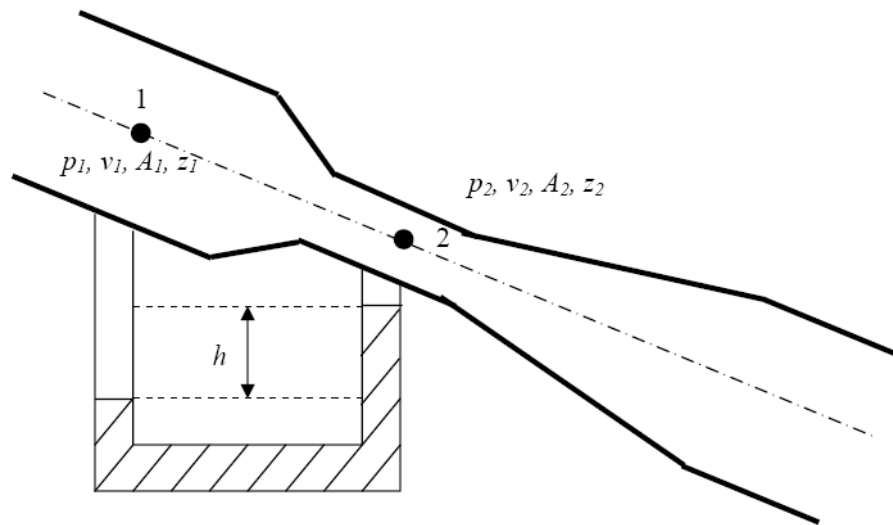


Fuente: <http://www.monografias.com>

Un tubo de Venturi, como el mostrado en la figura 15, consiste en un tubo corto con un estrechamiento de su sección transversal, el cual produce un aumento de la velocidad del fluido y por consiguiente, puesto que la conservación de la carga expresada por el teorema de Bernoulli debe satisfacerse, una disminución de la altura piezométrica. El estrechamiento va seguido por una región gradualmente divergente donde la energía cinética es transformada de nuevo en presión, con una inevitable pequeña pérdida por fricción viscosa. La caída de presión puede relacionarse con el caudal de fluido

que circula por el conducto, a partir de la ecuación de continuidad (caudal constante en cualquier sección de la conducción) y de la ecuación de Bernoulli (conservación de la energía mecánica).

Figura 16. **Tubo de Venturi inclinado**



Fuente: Departamento de Energía, Universidad de Oviedo, Práctica de Mecánica de Fluidos.
p. 16.

Aplicando el teorema de Bernoulli entre los puntos 1, en la entrada, y 2, en la garganta del tubo Venturi de la figura 16, se obtiene:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \quad (1)$$

Si el Venturi se encuentra situado en posición totalmente horizontal, las alturas de posición de los puntos 1 y 2 son iguales, es decir $z_1=z_2$, y estos términos se cancelan en la ecuación (1), pero si el tubo Venturi está inclinado, como se muestra en la figura 16, las alturas de posición son diferentes, $z_1 \neq z_2$.

Por otra parte, v_1 y v_2 pueden considerarse como las velocidades medias en la sección correspondiente del tubo de Venturi, y como el flujo se desarrolla en régimen permanente y el fluido es incompresible, la ecuación de continuidad establece que:

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2 \Rightarrow v_1 = \frac{A_2}{A_1} v_2 \quad (2)$$

Sustituyendo la expresión (2) en la ecuación (1), se obtiene:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2g \left[\left(\frac{p_1}{\rho g} + z_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\rho g} + z_2 \right) \right]}{\left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]}} \quad (3)$$

Y, por tanto, el caudal se calcula como:

$$Q = A_2 v_2 = A_2 \sqrt{\frac{2g \left[\left(\frac{p_1}{\rho g} + z_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\rho g} + z_2 \right) \right]}{\left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]}} \quad (4)$$

En consecuencia con un tubo de Venturi el problema de medir un caudal se reduce a la medida de las presiones p_1 y p_2 , pues el resto de variables presentes en la ecuación (4) son dimensiones geométricas fijas para cada caso. En concreto, es suficiente la medida de la presión diferencial $p_1 - p_2$, por ejemplo mediante un manómetro piezométrico en U, con un líquido no miscible con el fluido que circule por la conducción.

Si este es un gas, en el manómetro se puede usar agua; si circula agua, en el manómetro se puede usar mercurio. Estrictamente, el resultado de la

ecuación (4) es válido, como la ecuación de Bernoulli, para flujos ideales en los que los efectos de la fricción son despreciables. En los tubos de Venturi reales, la fricción, aunque pequeña, está presente, de modo que la caída de presión $p_1 - p_2$ medida en el manómetro diferencial es debida al aumento de energía cinética en la garganta, pero también a una pequeña pérdida de carga. Por tanto los caudales obtenidos con la ecuación (4) tienden a ser ligeramente mayores que los caudales reales, y por ello se introduce un factor de corrección, denominado coeficiente de descarga o de derrame, C_d (ecuación 5). En cada caso habrá de calibrarse el Venturi para obtener el valor adecuado de este coeficiente. Para un tubo Venturi convencional C_d suele adoptar valores en el rango 0,90 a 0,96.

$$Q = C_d A_2 \sqrt{\frac{2g \left[\left(\frac{p_1}{\rho g} + z_1 \right) - \left(\frac{p_2}{\rho g} + z_2 \right) \right]}{\left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]}} \quad (5)$$

Los tubos de Venturi resultan ser medios simples y precisos para medir caudales en conductos. Frente a los otros medidores de la categoría de estrechamiento en conductos (orificios y toberas), los Venturi presentan la ventaja adicional de inducir una pérdida de carga comparativamente más pequeña, gracias a que las transiciones en el área de la sección de paso se hacen gradualmente. Ello es especialmente destacable en lo que se refiere al tramo difusor o divergente, situado en la zona posterior a la garganta del Venturi. Se trata de un tramo cónico con un ángulo de apertura muy suave ($\sim 7^\circ$), con lo que se busca la expansión progresiva de la corriente de fluido con la consiguiente disminución de energía cinética y aumento de presión hasta prácticamente recuperar los valores anteriores al Venturi (los del punto 1, en la figura 16). Si en cambio esa transición fuera más brusca (con un ángulo de

apertura elevado), en la zona posterior de la garganta, quedaría en realidad un chorro libre, con lo que el exceso de energía cinética se disiparía por turbulencia y apenas aumentaría la presión por encima del valor del punto 2, figura 16. Esto último es lo que de hecho sucede con los medidores de tobera y de orificio (ver siguiente apartado).

Una relación de áreas A_2/A_1 pequeña, contribuye a aumentar la precisión en el manómetro, pero también va acompañada de una mayor pérdida por fricción (menor C_d) y además puede dar lugar a una presión demasiado baja en la garganta. Si circula un líquido es posible que llegue a producirse liberación del aire disuelto en el líquido e incluso vaporización del líquido en este punto. Este fenómeno se conoce como cavitación y se produce si la presión alcanza el valor de la presión de vapor del fluido a la temperatura de trabajo. Si se generan burbujas, bien de aire liberado o bien de vapor, el flujo a través del Venturi se modifica y las medidas de caudal pierden validez.

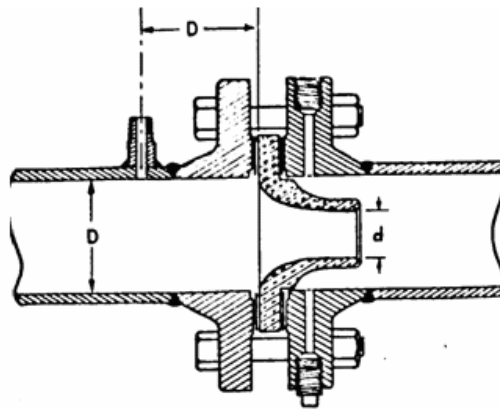
La finalidad del cono divergente es reducir la pérdida global de presión en el medidor; su eliminación no tendrá efecto sobre el coeficiente de descarga. La presión se detecta a través de una serie de agujeros en la admisión y la garganta; estos agujeros conducen a una cámara angular, y las dos cámaras están conectadas a un sensor de diferencial de presión.

2.2. Boquilla de flujo

Es una contracción gradual de la corriente de flujo seguida de una sección cilíndrica recta y corta. Debido a la contracción pareja y gradual, existe una pérdida muy pequeña. A grandes valores, el número de Reynolds C es superior a 0.99.

La tobera de flujo es un instrumento que permite medir el diferencial de presiones cuando la relación de β , es demasiado alta para la placa orificio, esto es, cuando la velocidad del flujo es mucho mayor y las pérdidas empiezan a hacerse notorias. Luego, al instalar un medidor de este tipo se logran mediciones mucho más exactas. Además este tipo de medidor es útil para fluidos con muchas partículas en suspensión o sedimentos, su forma hidrodinámica evita que sedimentos transportados por el fluido queden adheridos a la tobera.

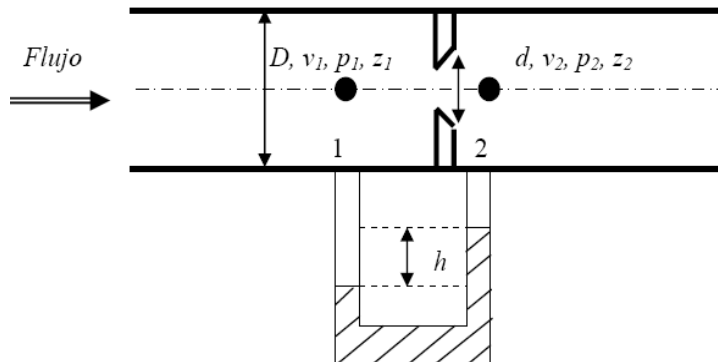
Figura 17. **Boquilla o tobera de flujo**



Fuente: <http://www.monografias.com>

Una boquilla de flujo es un disco con un agujero circular concéntrico con la tubería y de sección más estrecha, como la que se muestra en la figura 17.

Figura 18. **Boquilla de flujo**



Fuente: Departamento de Energía, Universidad de Oviedo, Práctica de Mecánica de Fluidos.
p. 18.

Cuando el fluido circula por el conducto se produce un incremento de energía cinética entre un punto 1 cualquiera, situado aguas arriba del orificio y un punto 2 situado en la garganta del orificio, lo que conlleva una reducción de presión entre esos puntos. Aguas abajo del orificio se forma un chorro, es decir, el flujo principal queda restringido a una sección equivalente a la de la garganta, con lo que se conservan las condiciones de velocidad y presión del punto 2 hasta una cierta distancia.

Al igual que en el caso del tubo de Venturi se plantea el principio de conservación de energía mecánica (ecuación de Bernoulli) entre ambas posiciones 1 y 2, junto a la condición de continuidad (caudal constante). Ello lleva a la obtención de las mismas ecuaciones (1-5), ya indicadas en el apartado anterior. En concreto la ecuación (5) permite nuevamente obtener el caudal circulante a partir de los datos geométricos (diámetros de tubería y garganta, e inclinación respecto de la horizontal) y de la diferencia de presión observada entre la pareja de puntos 1 y 2, por lo que basta emplear un manómetro diferencial. En contraste con el tubo Venturi, los cambios en la sección de paso para la placa orificio son muy bruscos. Esto implica mayores

pérdidas de energía mecánica por esfuerzos viscosos (pérdidas de carga). Estas son especialmente identificadas en la zona de aguas abajo del orificio, pues el exceso de energía cinética habido en el chorro se termina disipando en turbulencia; pero estas pérdidas de carga no afectan a la medida.

Aunque comparativamente bastante menores, sí afectan a la medida las pérdidas habidas en el tramo de la contracción de la sección de paso (entre los puntos 1 y 2). También afecta en cierta medida el llamado efecto de vena contracta, por el cual la sección efectiva de paso es realmente algo más pequeña que la de la garganta. En general, tanto el efecto de las pérdidas de carga como el de la vena contracta es el de aumentar la diferencia de presión de forma proporcional al cuadrado del caudal, por lo que no se altera el tipo de dependencia entre caudal y caída de presión indicada por la ecuación (5). Así pues, esta sigue siendo válida si se introduce el coeficiente de derrame C_d adecuado. En las placas de orificio habituales los coeficientes C_d suelen adoptar valores en el rango 0,40 a 0,70.

A pesar de las pérdidas de carga que inducen las placas orificio en los circuitos, su uso está muy extendido por resultar fiables, baratas y simples de instalar.

En cada uno de los elementos del conducto horizontal se encuentran situadas dos tomas para tubos piezométricos que permiten una lectura diferencial de la presión entre dos puntos, uno aguas arriba y otro aguas abajo, de cada uno de los elementos.

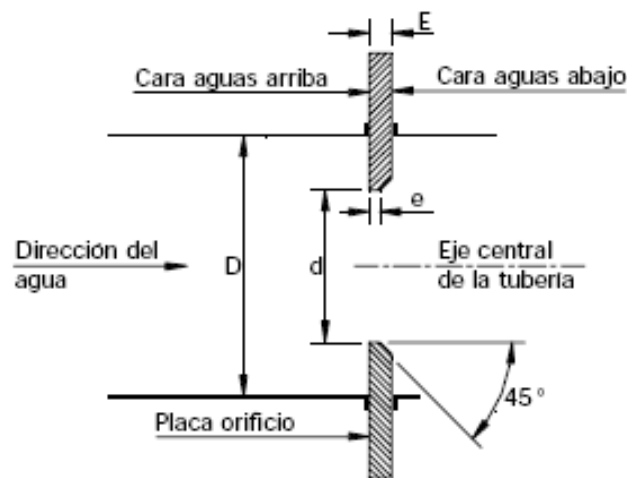
La lectura se realiza sobre una escala graduada en milímetros situada tras los piezómetros. Todos los piezómetros están conectados entre sí por su parte superior. Es importante que no se produzcan burbujas de aire en los tubos

piezométricos, puesto que se falsearía la lectura de presión en los mismos. Si aparecen burbujas de aire, es necesario purgar el circuito, mediante una pequeña válvula situada en la parte superior de los mismos. El caudal que circula por la instalación se regula mediante mayor o menor apertura de una llave de paso situada detrás del dispositivo.

2.2.1. Dimensiones recomendadas para la placa de orificio

En la figura 19 se observa la sección transversal de una placa de orificio y sus características geométricas.

Figura 19. Dimensiones generales de la placa de orificio



D= diámetro de la tubería
d= diámetro del orificio

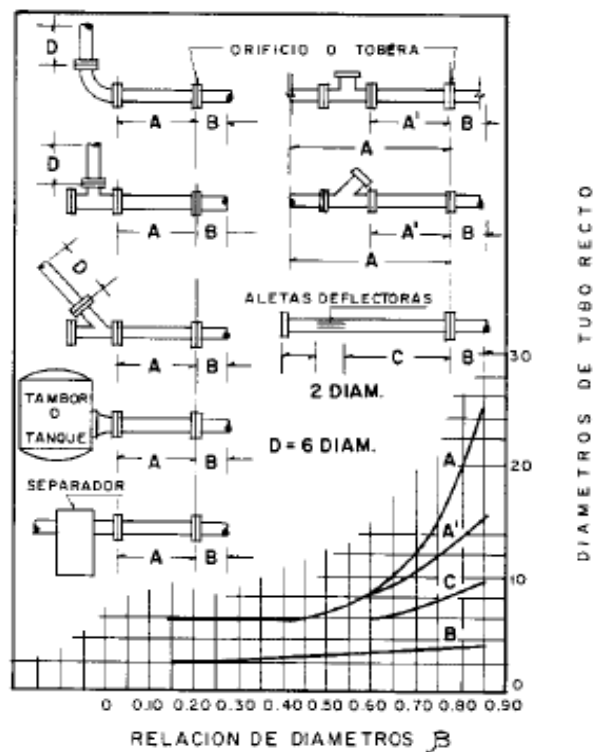
E= espesor de la placa
e= espesor del orificio

Fuente: Norma ISO 5167-1

La Norma ISO 5167-1 establece el espesor que debe tener la placa y la proporción que debe tener el orificio en relación con el diámetro de la tubería. Para poder emplear la placa orificio, el diámetro mínimo de la tubería debe de ser de 2 pulg. y el máximo de 50 pulg. Lo anterior no representa problema, ya que los diámetros más comunes son de 6, 8, 10 y 12 pulg.

Conociendo la *relación de diámetros* β (d/D), es posible saber qué longitud de tramo recto de tubería aguas arriba (A) y aguas abajo (B) se requiere. En la figura 20, se reproducen diferentes condiciones de instalación y a partir de la *relación de diámetros*, se muestra la longitud necesaria del tramo recto para que se establezca un flujo uniforme.

Figura 20. **Localización del punto de instalación para placas de orificio con accesorios en un mismo plano**



Fuente: Norma ISO 5167-1

La tabla I, muestra los valores mínimo y máximo de los espesores e y E , en función del diámetro de la tubería que se utilice. También, el valor mínimo y máximo del diámetro del orificio y de los valores de la relación de diámetros β (d/D).

Tabla I. **Dimensiones recomendadas para los elementos primarios**

Dimensión	Dimensión mínimo	Dimensión máximo
E	0,005D	0,02D
E	0,005D	0,05D
D	½ pulg.	38 pulg.
d/D	0,20	0,75

Fuente: Norma ISO 5167-1

Al aplicar el criterio expuesto en la tabla I para diferentes diámetros de tubería, se obtiene la tabla II.

Tabla II. **Dimensiones extremas para los elementos primarios**

Diámetro		e (mm)		E (mm)	
pulg.	mm	mínimo	máximo	mínimo	máximo
24	609,60	3,05	12,19	3,05	30,48
20	508,00	2,54	10,16	2,54	25,40
18	457,20	2,29	9,14	2,29	22,86
16	406,40	2,03	8,13	2,03	20,32
14	355,60	1,78	7,11	1,78	17,78
12	304,80	1,52	6,10	1,52	15,24
10	254,00	1,27	5,08	1,27	12,70
8	203,20	1,02	4,06	1,02	10,16
4	152,40	0,76	3,05	0,76	7,62
2	101,60	0,51	2,03	0,51	5,08

Fuente: Norma ISO 5167-1

En caso de que el espesor E sea mayor a e , se debe colocar un bisel a 45° en la esquina aguas arriba, como se muestra en la figura 19.

Existen tres posiciones de instalación, la tabla siguiente muestra las distancias requeridas aguas arriba ($L1$) y aguas abajo ($L2$) para cada tipo de instalación.

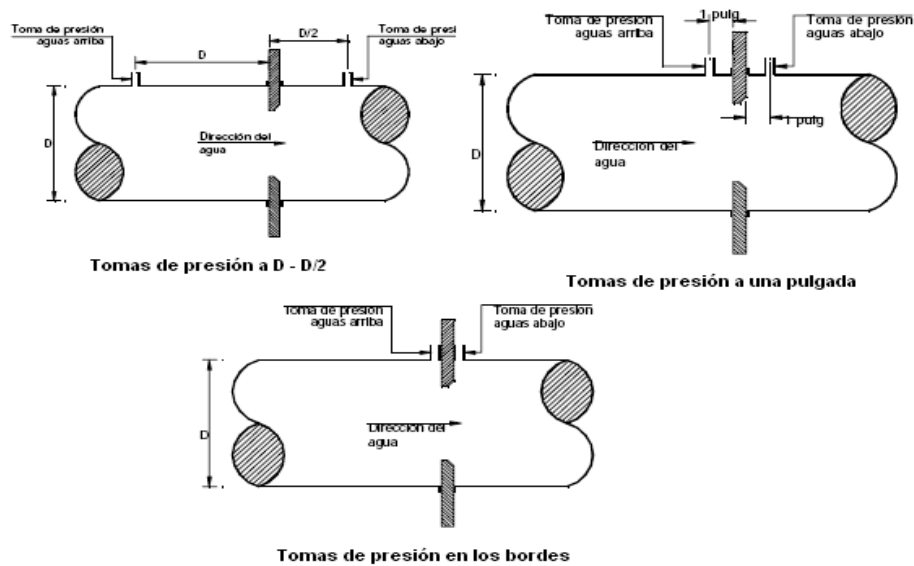
Tabla III. **Posiciones de las tomas de presión**

Tipo de instalación	L1	L2
D – D/2	D	D/2
A una pulg.	1 pulg.	
En los bordes	Cero	

Fuente: Norma ISO 5167-1

En la figura 21, se observan secciones transversales de los tres tipos de instalaciones:

Figura 21. **Posiciones de las tomas de presión**



Fuente: Norma ISO 5167-1

2.2.2. Pérdida de carga

Es la diferencia de presiones estáticas entre la presión medida en la pared de la tubería aguas arriba de la placa orificio, donde la influencia de la placa es despreciable (aproximadamente un diámetro), y la presión aguas abajo del elemento primario, donde el flujo se recupera del impacto con la placa (aproximadamente seis diámetros); h_L depende de β , C_d y h y se determina con la siguiente ecuación:

$$h_L = \frac{\sqrt{(1-\beta^4)} - C_d\beta^2}{\sqrt{(1-\beta^4)} + C_d\beta^2} h \quad (6)$$

En forma aproximada, se puede formar la tabla siguiente que relaciona el porcentaje de *pérdida de carga* h_L en relación con *la presión diferencial* h para diferentes valores de β .

Tabla IV. **Porcentaje de pérdida de carga**

β	% de h
0,20	96
0,30	92
0,40	85
0,50	76
0,60	67
0,70	55
0,75	48

Fuente: Norma ISO 5167-1

2.3. Rotámetro

El rotámetro es un medidor de área variable, que consta de un tubo transparente que se amplía y un medidor de “flotador” (más pesado que el líquido), el cual se desplaza hacia arriba por el flujo ascendente de un fluido en la tubería. El tubo se encuentra graduado para leer directamente el caudal. La ranura en el flotador hace que rote y, por consiguiente, que mantenga su posición central en el tubo. Entre mayor sea el caudal, mayor es la altura que asume el flotador.

Un rotámetro tiene la ventaja de ser un instrumento de medición directa, es decir, que se puede leer inmediatamente el flujo, una vez calibrado el instrumento.

En la actualidad los rotámetros se han vuelto los instrumentos de mayor uso en la Ingeniería Química, debido a su versatilidad y fácil instalación.

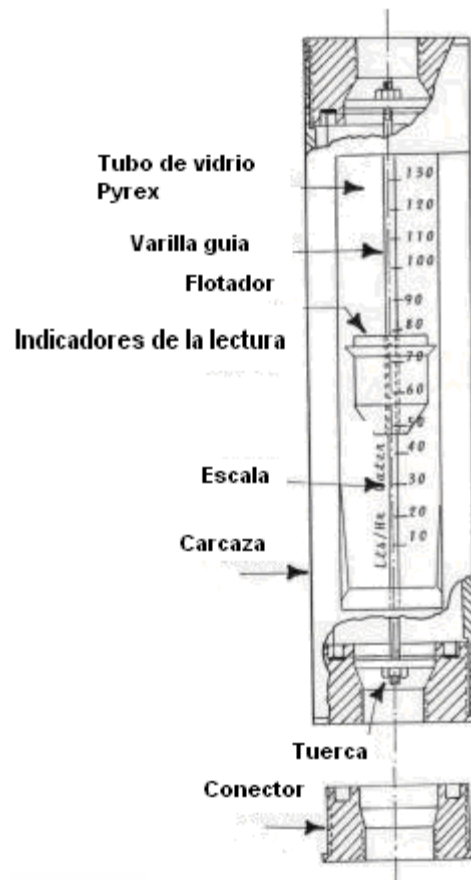
La base de este equipo de medición es la sustentación hidrodinámica, puesto que el fluido entra en la parte inferior y eleva un flotador a una altura en la cual encuentra el equilibrio entre su peso y la sustentación que ofrece el fluido. Debido a esto, la altura a la cual llega dicho flote es proporcional a la velocidad de flujo del fluido. Como se observa en la figura 22, el rotámetro posee una escala, sobre la cual se pueden leer valores que se correlacionan de manera rápida para obtener el flujo instantáneo a través de la tubería.

Los rotámetros han mostrado su versatilidad al trabajar de manera aceptable con líquidos y gases a altas y bajas presiones con resultados satisfactorios. En la actualidad se han ajustado a los rotámetros, válvulas y

censores hidroneumáticos o bien fotoeléctricos, de modo que se puedan registrar las medidas de un rotámetro por medio de una computadora.

Otra gran ventaja de los rotámetros es que no requieren de espacios de tubería para que se reajuste el perfil de velocidad. Es decir, que a diferencia de los medidores mencionados anteriormente, este se puede colocar inmediatamente después de un accesorio sin dificultad.

Figura 22. **Esquema de un Rotámetro**



Fuente: <http://tarwi.lamolina.edu.pe>

La pérdida de presión se mantiene constante sobre el intervalo completo del flujo. Entonces para cada flujo, el flotador alcanza una altura determinada. El tubo cónico lleva grabada una escala lineal en unidades del flujo o indica el porcentaje del flujo máximo. Los rotámetros no necesitan tramos rectos de tubería antes y después del punto donde se instalan.

Una vez determinado el caudal que circula por la instalación mediante el aforo volumétrico, es posible hacer una calibración del rotámetro. Para ello, es necesario obtener la constante de proporcionalidad entre el caudal medido y la medida marcada por la escala del rotámetro:

$$Q = k * H_{\text{rotámetro}} + b \quad (7)$$

El proceso debe repetirse para varias medidas del caudal a efecto de obtener un valor medio de las constantes de proporcionalidad k y b , que se ajusten lo más posible a la realidad.

2.4. Singularidades en ensanchamiento y codo

Además de las pérdidas de carga por rozamiento, se produce otro tipo de pérdidas que se originan en puntos singulares de las tuberías (cambios de dirección, codos, juntas, etc.), y que se deben a fenómenos de turbulencia.

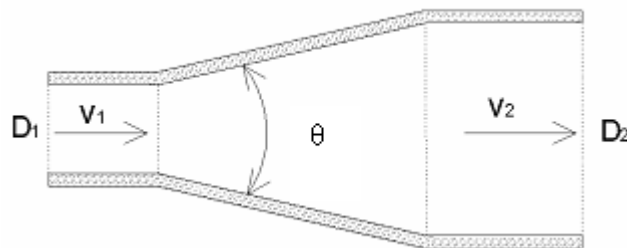
Se conocen como pérdidas de carga accidentales, localizadas o singulares (h_L , h_s), que sumadas a las pérdidas de carga continuas (h_C) dan las pérdidas de carga totales (h_T).

Normalmente, las pérdidas de carga continuas son más importantes que las singulares, pudiendo éstas despreciarse cuando supongan menos del 5% de las totales, y en la práctica, cuando la longitud entre singularidades sea mayor de mil veces el diámetro interior de la tubería. Salvo casos excepcionales, las pérdidas de carga localizadas sólo se pueden determinar de forma experimental, y puesto que son debidas a una disipación de energía motivada por las turbulencias, pueden expresarse en función de la altura cinética corregida mediante un coeficiente empírico K .

2.4.1. Ensanchamiento

Son los difusores (ver figura 23) singulares debido a los torbellinos que se forman por las diferencias de presión (al aumentar la sección disminuye la velocidad, y por lo tanto el término cinético, por lo que la presión debe aumentar).

Figura 23. Ensanchamiento en tubería



Fuente: <http://ocwus.us.es/>

En la clásica deducción de la expresión relativa a la pérdida de carga debida al ensanchamiento brusco, partiéndose del teorema de Bernoulli y

considerándose el impulso de las fuerzan que actúan en las secciones y la variación de la cantidad de movimiento. En cualquier ensanchamiento brusco de sección hay una pérdida de carga local medida por la altura cinética, correspondiente a la pérdida de velocidad, esta expresión lleva a los resultados ligeramente experimentales, razón por la cual Saint-Venant propuso un término correctivo complementario, con base en los datos experimentales de Borda. Posteriormente, Hanok, Archer y otros investigadores, propusieron correcciones más lógicas y exactas que, no obstante, no siempre son consideradas en la práctica.

Por continuidad

$$v_1 A_1 = v_2 A_2 \quad (8)$$

Considerando estas secciones y aplicando el teorema de Bernoulli:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + k \frac{v_{1-2}^2}{2g} \quad (9)$$

Como se encuentra a un mismo nivel la diferencia de alturas y despreciando la pérdida de carga del tramo D₁ a D₂:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} \quad (10)$$

Despejando de la ecuación (8) la v_2 , y sustituyendo en ecuación (10):

$$\frac{v_1^2}{2g} - \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2 - p_1}{\gamma} \quad (11)$$

Simplificando y despejando la v_1

$$v_1 = \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1 - \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2}} \quad (12)$$

Por lo tanto el caudal teórico se calcula como:

$$Q = A_1 \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1 - \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2}} \quad (13)$$

Y el caudal real con su coeficiente de descarga se calcula como:

$$Q = C_d A_1 \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1 - \left(\frac{A_1}{A_2}\right)^2}} \quad (14)$$

2.4.2. Codo

Son accesorios de forma curva que se utilizan para cambiar la dirección del flujo de las líneas tantos grados como lo especifiquen los planos o dibujos de tuberías.

2.4.2.1. Tipos

Los codos estándar son aquellos que vienen listos para la pre-fabricación de piezas de tuberías y que son fundidos en una sola pieza con características específicas estos son:

- a) Codos estándar de 45°
- b) Codos estándar de 90°
- c) Codos estándar de 180°

Salvo casos excepcionales, las pérdidas de carga localizadas sólo se pueden determinar de forma experimental, y puesto que son debidas a una disipación de energía motivada por las turbulencias, pueden expresarse en función de la altura cinética corregida mediante un coeficiente empírico (K).

2.4.2.2. Características

Diámetro: es el tamaño o medida del orificio del codo entre sus paredes los cuales existen desde ¼" hasta 120". También existen codos de reducción.

Ángulo: es la abertura existente entre ambos extremos del codo y sus grados dependen del giro o desplazamiento que requiera la línea.

Radio: es la dimensión que va desde el vértice hacia uno de sus arcos. Según sus radios los codos pueden ser: radio corto, largo, de retorno y extra largo.

Espesores: es una normativa o codificación del fabricante, determinada por el grosor de la pared del codo.

Aleación: es el tipo de material o mezcla de materiales con el cual se elabora el codo, entre los más importantes se encuentran: acero al carbono, acero a % de cromo, acero inoxidable, galvanizado, etc.

Junta: es el procedimiento que se emplea para pegar un codo con un tubo, u otro accesorio y puede ser: soldable a tope, roscable, embutible y soldable.

Dimensión: es la medida del centro al extremo o cara del codo y la misma puede calcularse mediante fórmulas existentes.

Considerando estas secciones y aplicando el teorema de Bernoulli:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + k \frac{v_{1-2}^2}{2g} \quad (15)$$

Suponiendo que z_1 y z_2 son aproximadamente cero, y $v_1 = v_2$, se obtiene:

$$k \frac{v^2}{2g} = \frac{p_1 - p_2}{\gamma} \quad (16)$$

Simplificando:

$$k \frac{v^2}{2g} = \Delta h \quad (17)$$

Despejando la velocidad:

$$v = \sqrt{\frac{2g\Delta h}{k}} \quad (18)$$

Suponiendo que $C_d = \sqrt{\frac{1}{k}}$ y sustituyendo en la ecuación (18), el caudal con su coeficiente de descarga se calcula como:

$$Q = C_d A \sqrt{2g\Delta h} \quad (19)$$

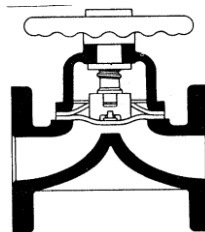
Y el caudal teórico se calcula como:

$$Q = A \sqrt{2g\Delta h} \quad (20)$$

2.5. Flujómetro de diafragma

Esta válvula ofrece ventajas, imposibles para otros tipos de válvulas. Dan un paso suave, laminar y sin bolsas de fluido, sirviendo para controlar el caudal; producen aislamiento aun existiendo sólidos en suspensión en la tubería. En ciertas posiciones estas válvulas son autopurgables. El total aislamiento de las partes internas, de la corriente, impide la contaminación y corrosión del mecanismo de operación. Su mantenimiento es extremadamente sencillo.

Figura 24. **Válvula de diafragma**



Fuente: Tubos flexibles, S.A. de CV

La flexibilidad de montaje, la amplia elección de materiales para cuerpos, recubrimientos de cuerpos y diafragmas, hacen que estas válvulas sean adaptables a diversas aplicaciones. Suelen usarse para vencer problemas de corrosión, abrasión y contaminación de fluidos con sólidos disueltos. Son particularmente adecuadas para servicios de fluidos corrosivos, materiales viscosos, lodos, aguas, gases y aire comprimido. En estas válvulas el flexible y elástico diafragma está unido al vástago que lo comprime, por un tornillo embebido dentro del diafragma. El vástago compresor sube y baja accionado por el casquillo roscado, alojado en el volante.

El mecanismo de accionamiento no está sometido a la acción corrosiva del fluido, ya que el diafragma aísla los elementos internos de la válvula del fluido, solamente es el diafragma el que sufre desgaste. Este tipo de válvulas no suele llevar prensa, estopa, ni nada que significa contacto metal-metal.

2.5.1. Clasificación de los flujómetros de diafragma

- a) Tipo para uso convencional
- b) Tipo de paso recto
- c) Tipo de paso total

Cuando el flujómetro del tipo de paso recto está abierto, su diafragma está levantado, el flujo es total y laminar en cualquier dirección. Cuando está cerrada, el diafragma sella para obtener un cierre positivo, aun con materiales arenosos o fibrosos en la tubería. El de paso total suele usarse en industria de bebidas, ya que permite su limpieza con el "cepillo en forma de bola", ya sea con vapor o sosa cáustica, sin abrir ni desmontar la válvula de la tubería.

Cuando la corrosión es severa, estas válvulas se suelen construir de acero inoxidable o en plástico o revestimiento de vidrio, goma, plomo, titanio, etc. La vida de los diafragmas depende no solo de la naturaleza del material manejado, sino también de la temperatura, presión y frecuencia de accionamiento.

El caudal provoca una pérdida de presión entre la entrada y salida, que puede ser leído con los empalmes de medición. La pérdida de presión Δp es una medida para el volumen de salida:

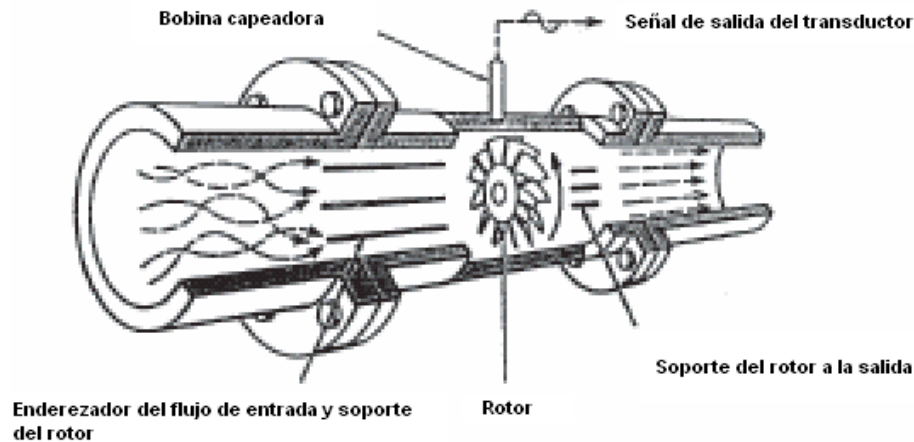
$$V = \alpha \varepsilon A_d \sqrt{\frac{2 \Delta p}{\rho}} = k \sqrt{\Delta p} \quad (21)$$

Utilizando $k = 291$ para el diafragma.

2.6. Flujómetro de turbina

El fluido provoca que el rotor de la turbina gire a una velocidad que depende de la velocidad de flujo. Conforme cada una de las aspas de rotor pasa a través de una bobina magnética, se genera un pulso de voltaje que puede alimentarse de un medidor de frecuencia, un contador electrónico u otro dispositivo similar, cuyas lecturas puedan convertirse en velocidad de flujo. Velocidades de flujo desde 0,02 L/min hasta algunos miles de L/min, se pueden medir con fluxómetros de turbina de varios tamaños.

Figura 25. **Sección transversal de un medidor de turbina para líquidos**



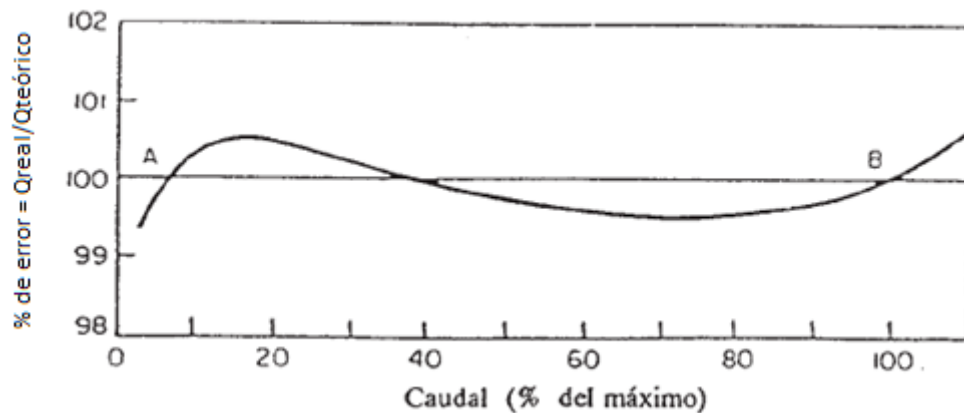
Fuente: <http://www.monografias.com>

Los medidores de turbina para gas o líquido difieren fundamentalmente en el diseño del rotor. Una salida mediante impulsos eléctricos se produce cuando se detecta el paso de cada paleta alrededor de uno o más sensores situados en el campo del medidor. El punto más débil en un medidor de turbina para líquidos son los cojinetes, ya que tienen que soportar el peso del rotor.

Los medidores de turbina son muy afectados por las partículas del fluido. Este deterioro debido al uso es un particular problema que conlleva una permanente pérdida de presión del sistema de medida. Los medidores de turbina tienen un coste similar y unas ventas muy parecidas a los medidores de desplazamiento positivo y compiten en muchas aplicaciones, particularmente en las refinerías. Los medidores de turbina son más pequeños y ligeros y preferidos para fluidos de baja viscosidad. Los medidores de desplazamiento positivo son mayores, sin embargo, preferibles para grandes viscosidades y pequeños flujos.

Para predecir la característica de comportamiento de un medidor de turbina es necesario que sea calibrado, de modo que la relación entre el número de impulsos emitidos y el volumen de fluido que ha pasado, pueda determinarse experimentalmente. Esto da como resultado una curva de calibración, como la mostrada en la figura 26.

Figura 26. **Curva de comportamiento de un medidor de turbina para líquidos**



Fuente: <http://www.monografias.com>

En la figura 26, se observa que en los puntos A y B el porcentaje de error es pequeño en un rango de $\pm 1\%$ y el volumen del líquido que pasa a través del medidor es aproximadamente proporcional al número de impulsos recibidos, dejando de ser preciso para caudales inferiores al punto A y superiores al B.

$$Q = k \cdot n \quad (22)$$

Donde n es el número de pulsos por unidad de tiempo y k es una constante del medidor (dependiente del diseño y tamaño del medidor, del diámetro de la tubería y del número de paletas).

3. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA SELECCIÓN DE UN MEDIDOR DE FLUJO

Al estudiar el efecto, funcionamiento y las aplicaciones tecnológicas de algunos medidores de flujo, (de los cuales su invención data desde el siglo XIX) como el caso del tubo Venturi, donde su creador luego de muchos cálculos y pruebas logró diseñar un tubo para medir el gasto de un fluido, es decir, la cantidad de flujo por unidad de tiempo, puede decirse que, principalmente, su función se basó en esto y luego con posteriores investigaciones para aprovechar las condiciones que presentaba el mismo, se llegaron a encontrar nuevas aplicaciones como la de crear vacío a través de la caída de presión. Luego a través de los años se diseñaron equipos como los rotámetros y los fluxómetros, que en la actualidad cuentan con la mayor tecnología para ser más precisos en la medición del flujo.

Para la selección del tipo de medidor; se debe tener presente otros factores como: los comerciales, económicos, para el tipo de necesidad que se tiene etc. El estudiante o Ingeniero que conozca los fundamentos básicos y aplicaciones que se presentan, debe estar en capacidad para escoger el tipo de medidor que se adapte a las necesidades que el usuario requiere.

El tipo de medidor de flujo usado frecuentemente, depende de la naturaleza del fluido y de las condiciones del proceso bajo las cuales el fluido es medido. Cada tipo de medidor de flujo tiene beneficios y limitaciones que dependen particularmente de dicho medidor y de la aplicación.

Los medidores de flujo se pueden clasificar según reporten unidades de volumen por unidad de tiempo ó unidades de masa por unidad de tiempo en:

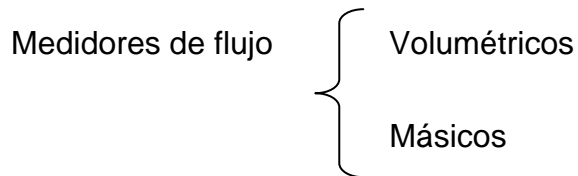
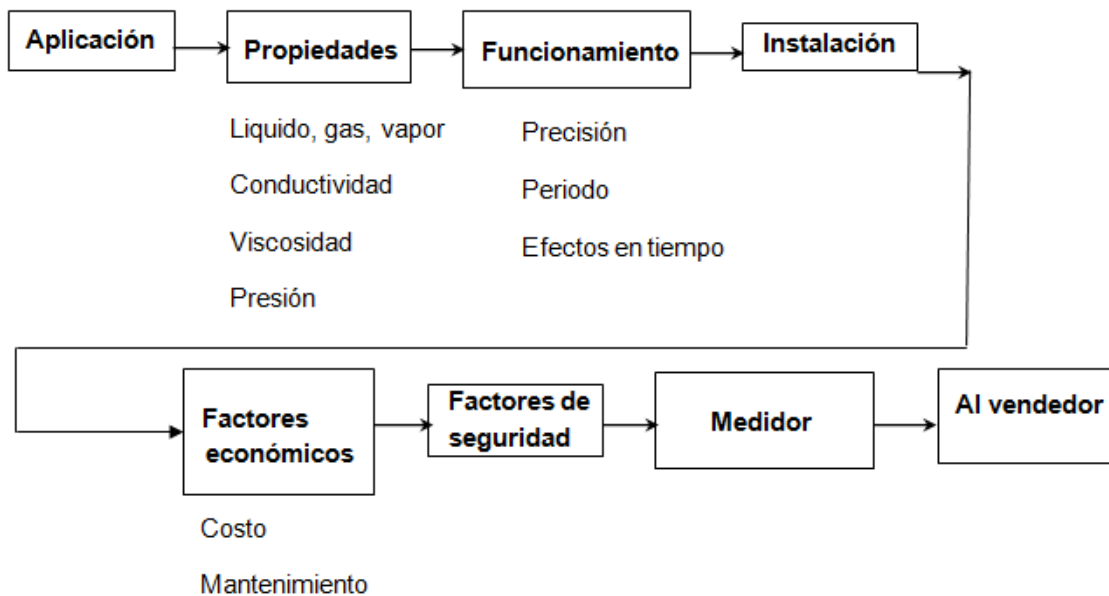


Figura 27. **Proceso para la selección de un medidor de flujo**



Fuente: elaboración propia.

3.1. Tipo de indicación

El incremento en la demanda de servicios de calibración de medidores de caudal, tanto a nivel nacional como internacional, pone de manifiesto la necesidad de disponer de sistemas de referencia adecuados para resolver las

necesidades de calibración de los sectores industrial, de servicios y de investigación, entre otros.

Los métodos primarios para medir caudal de fluidos por definición deben ser capaces de realizar una medición sin necesidad de ser referidos a cualquier otro dispositivo de medición de caudal. Los métodos secundarios, en contraparte, sí requieren de dicha referencia (llámese calibración). La exactitud en cualquier medición depende de la exactitud del patrón primario y de la forma en la cual esta exactitud es diseminada a través de los patrones de transferencia. Es de esperar que en cada eslabón de la cadena de trazabilidad se pierda cierto nivel de exactitud. Por lo tanto, siempre será recomendable el menor número de transferencias (eslabones en la cadena de trazabilidad).

Es entonces recomendable que se disponga de patrones primarios de alta exactitud y de patrones secundarios con los cuales la pérdida de exactitud en el proceso de calibración no sea significativa. En la comunidad internacional de metrología de flujo de fluidos se ha realizado una gran cantidad de trabajo al respecto.

3.1.1. Pérdida de presión

Debido a que los detalles de construcción de los distintos medidores son muy diferentes, éstos proporcionan diversas cantidades de pérdida de energía o pérdida de presión conforme el fluido corre a través de ellos. Excepto algunos tipos, los medidores de fluido llevan a cabo la medición estableciendo una restricción o un dispositivo mecánico en la corriente de flujo, causando así la pérdida de energía.

3.1.2. Tipo de fluido

El funcionamiento de algunos medidores de fluido se encuentra afectado por las propiedades y condiciones del fluido. Una consideración básica es si el fluido es un líquido o un gas. Otros factores que pueden ser importantes son la viscosidad, la temperatura, la corrosión, la conductividad eléctrica, la claridad óptica, las propiedades de lubricación y homogeneidad.

3.2. Exactitud requerida

La importancia de la exactitud en la medición de caudal de fluidos puede valorarse debido a que las mediciones son de vital importancia para industrias, como la del petróleo, eléctrica (generación), petroquímica, etc. Mediciones incorrectas pueden afectar sin duda la equidad de la transacción de alguna de las partes interesadas. Para llevar a cabo mediciones adecuadas es necesario conocer las propiedades físicas del fluido y el entendimiento de los factores que influyen en ellas.

La tabla V muestra las clases de exactitud tomando en consideración la aplicación del sistema de medición y las divide en cinco clases.

Tabla V. **Clases de exactitud según OIML R 117**

CLASE	CAMPO DE APLICACIÓN
0,3	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas de medición instalados en tuberías.
0,5	<ul style="list-style-type: none"> • Bombas de despacho de gasolina • Sistemas de medición para leche • Sistema de medición instalados en auto-tanques • Sistemas de medición para buque tanques
1,0	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas de medición para gases licuados (diferentes a los gases licuados de petróleo, LPG), sujetos a presión y a temperaturas mayores que -10 °C. • Sistemas de medición de LPG para carga de vehículos. • Sistemas de medición clasificados como clase 0,3 ó 0,5 bajo las siguientes condiciones: con temperaturas menores que -10 °C ó mayores que 50 °C. • Con fluidos cuya viscosidad dinámica sea mayor que 1 000 mPa. • Con flujo menor que 20 L/h.
1,5	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas de medición para dióxido de carbono licuado. • Sistemas de medición para gases licuados (diferentes a los gases licuados de petróleo, LPG), sujetos a presión y a temperaturas menores que - 10 °C.
2,5	<ul style="list-style-type: none"> • Sistemas de medición para líquidos criogénicos.

Fuente: OIML (Organización Internacional de Metrología Legal). La recomendación OIML R 117. "Measuring systems other than water"

En la tabla VI, la línea A muestra los errores máximos permisibles, aplicables a sistemas de medición completos, para todos los líquidos; todas las temperaturas y las presiones de los líquidos y los flujos en los que se utilizará el

sistema, sin llevar a cabo ningún ajuste durante las pruebas (referirse a OIML R 117).

La tabla VI, la línea B muestra los errores máximos permisibles aplicables en una aprobación de modelo y/o verificación inicial del medidor de flujo (referirse a OIML R 117).

Tabla VI. **Errores máximos permisibles de acuerdo a la clase de exactitud según OIML R 117**

CLASES SEGÚN LA EXACTITUD					
	0,3	0,5	1,0	1,5	2,5
A	± 0,3 %	± 0,5 %	± 1,0%	± 1,5 %	± 2,5 %
B	± 0,2 %	± 0,3 %	± 0,6 %	± 1,0 %	± 1,5 %

Fuente: OIML (Organización Internacional de Metrología Legal). La recomendación OIML R 117. "*Measuring systems other than water*"

3.3. Calibración

Tanto el área de la sección como la velocidad del agua pueden variar con los cambios de altura en el nivel del agua, al hacer esto en una sección adecuada, esta relación es generalmente fija, circunstancia que se puede aprovechar para que, una vez conocida dicha relación entre nivel del agua, sección transversal y velocidad, puedan obtenerse y registrarse los caudales mediante una escala de alturas, que indica la variación del caudal. Cuando una sección está calibrada significa que se conoce la variación de la altura del nivel

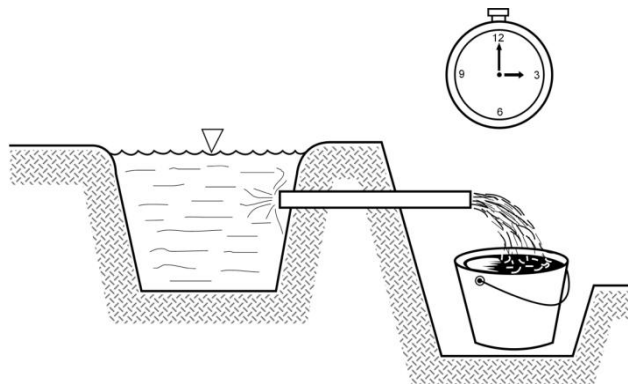
del agua y el caudal, para el caso de medidores y vertederos existen las fórmulas en función a la altura y en los casos de los ríos y canales

3.4. Método de aforo de calibración volumétrica

La forma más sencilla de calcular los caudales pequeños es la medición directa del tiempo que se tarda en llenar un recipiente de volumen conocido. La corriente se desvía hacia un canal o cañería que descarga en un recipiente adecuado y el tiempo que demora su llenado se mide por medio de un cronómetro.

Para los caudales de más de 4 l/s, es adecuado un recipiente de 10 litros de capacidad. Para caudales mayores, un recipiente de 200 litros puede servir para corrientes de hasta 50 l/s. El tiempo que se tarda en llenarlo se medirá con precisión, especialmente cuando sea de sólo unos pocos segundos. La variación entre diversas mediciones efectuadas sucesivamente dará una indicación de la precisión de los resultados.

Figura 28. Aforo volumétrico

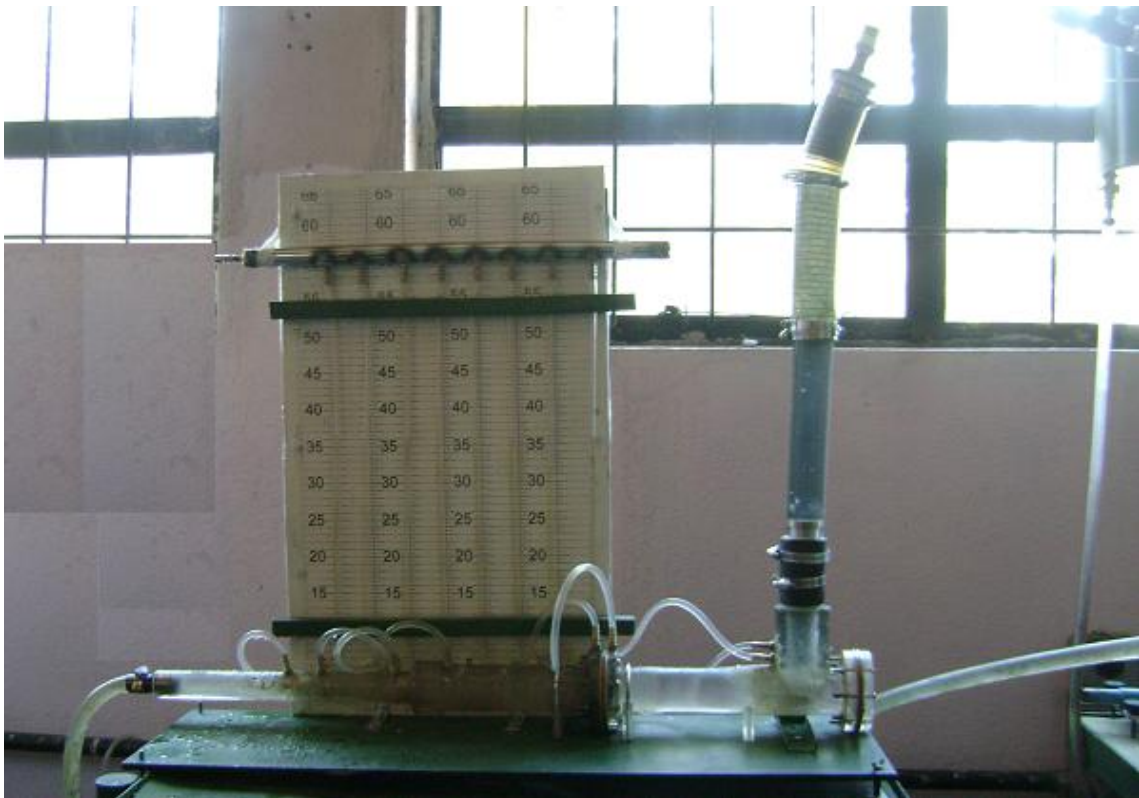


Fuente: <http://www.monografias.com>

Si la corriente se puede desviar hacia una tubería, de manera que descargue sometida a presión atmosférica, el caudal se puede calcular a partir de mediciones del chorro. Si la tubería se puede colocar de manera que la descarga se efectúe verticalmente hacia arriba, la altura que alcanza el chorro por encima del extremo de la tubería se puede medir y el caudal se calcula a partir de una fórmula adecuada. Es posible efectuar estimaciones del caudal a partir de mediciones de la trayectoria desde tuberías horizontales o en pendiente y desde tuberías parcialmente llenas, pero los resultados son en este caso menos confiables.

4. ENSAYOS DE LABORATORIO

Figura 29. **Dispositivo experimental, mostrando la conducción horizontal, el Rotámetro (vertical) y el panel de tubos piezométricos**



Fuente: elaboración propia.

El experimento se llevó a cabo en una instalación del laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería. El dispositivo experimental, que se muestra en la figura 29, es una conducción impulsada por medio de una bomba centrífuga, de medio caballo de fuerza, con alimentación desde un grifo de la

red de agua del edificio y descarga a un tanque. Esta conducción posee un primer tramo horizontal en su zona inferior, en el que, de izquierda a derecha (es decir, en el sentido de la corriente) se encuentran sucesivamente un tubo de Venturi, un ensanchamiento, una placa orificio y un codo. Las correspondientes dimensiones se muestran en la figura 30. Tras el codo se tiene un conducto vertical con un rotámetro para medir el caudal de agua circulante de forma independiente.

Figura 30. **Diámetros de los elementos del conducto**

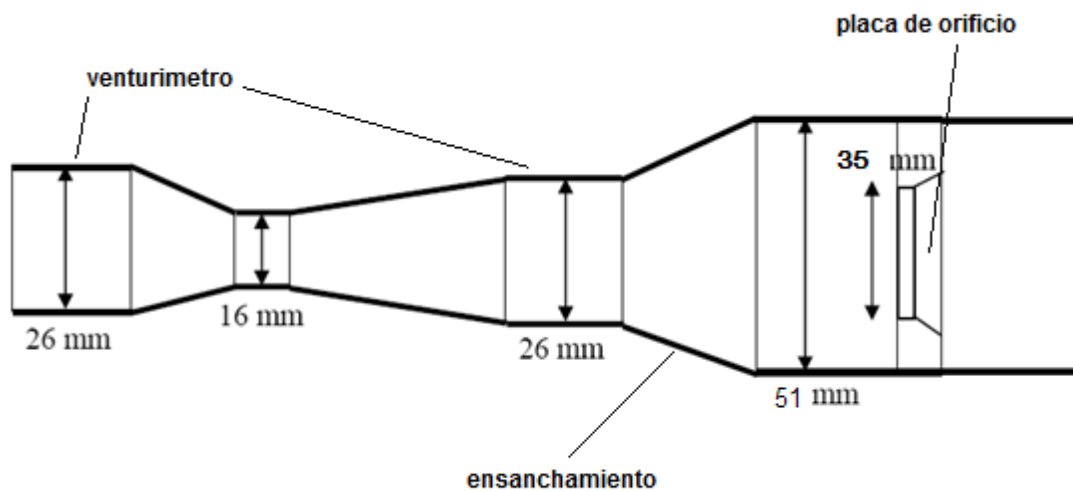


Figura no a escala

Fuente: elaboración propia.

Realización del ensayo:

- a) Una vez arrancada la bomba que suministra el flujo a los medidores de flujo, abrir la válvula reguladora para obtener un valor de caudal Q .

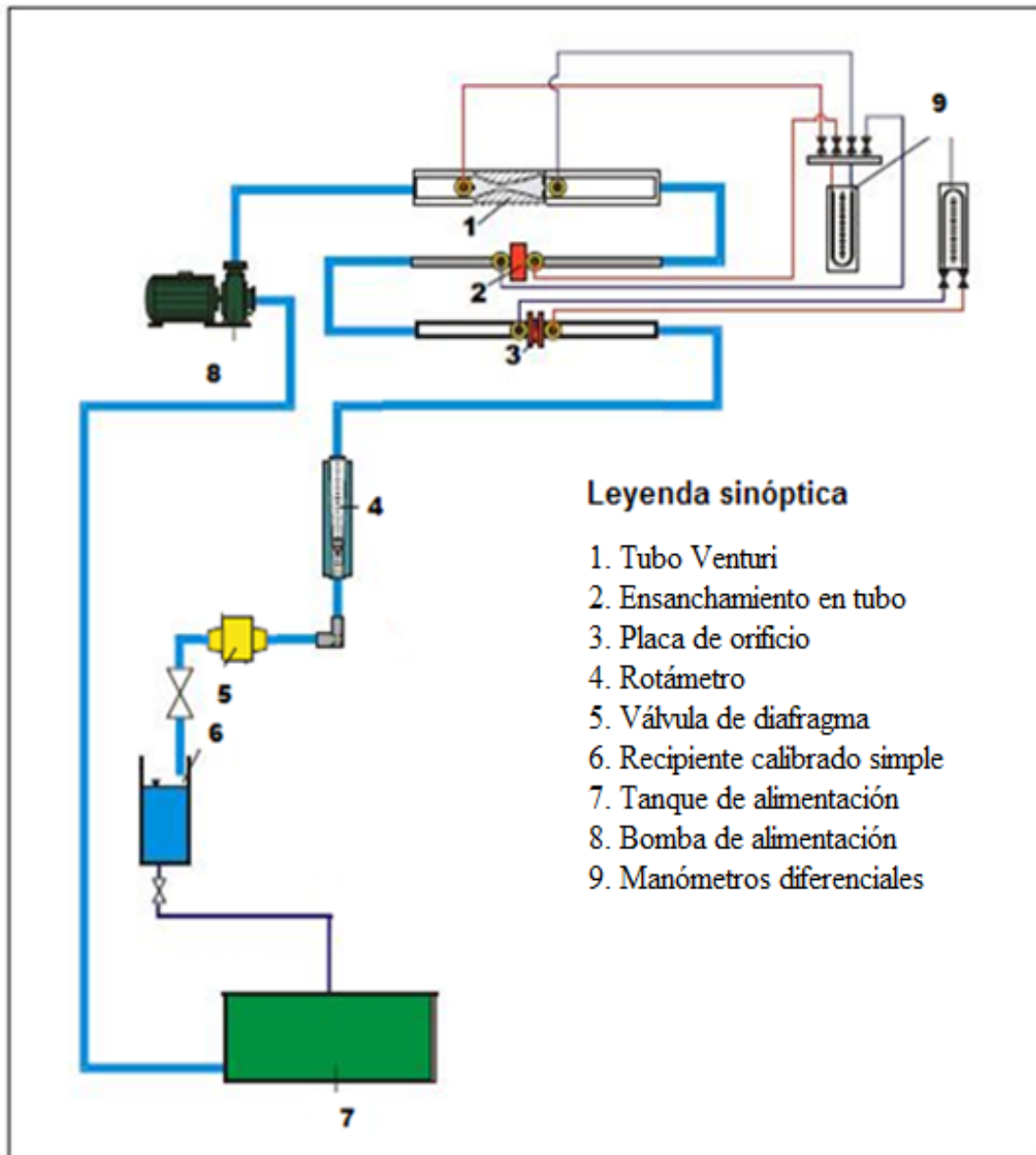
- b) Se toma como referencia el rotámetro, en el cual se anotarán lecturas cada dos centímetros que ascienda el flotador, iniciando en dos centímetros.
- c) Tomar las lecturas de los piezómetros conectados a cada medidor de flujo.
- d) Proceder a leer los piezómetros y anotar las diferencias de presión obtenida en cada medidor de flujo. Inmediatamente se medirá el caudal que está circulando para esa diferencia de presión, con el método de aforo volumétrico, vertiendo el agua en un recipiente de volumen de ocho litros, tomando así el tiempo de llenado que este lleva, por medio de un cronómetro. Repetir el último paso tres veces para obtener una estimación del tiempo promedio.
- e) Para las demás mediciones se repetirá el procedimiento descrito anteriormente, de manera que se abra por completo la válvula de diafragma.
- f) Obtención de resultados para la calibración de los medidores de flujo.
- g) Determinar la diferencia de presión (en columna de agua) de los piezómetros que están antes y después de cada medidor de flujo $\Delta h = h_f - h_o$; esta diferencia de alturas equivale a la caída de presión en cada medidor de flujo.
- h) Evaluar cada delta h en la ecuación de caudal teórico para cada medidor de flujo.

- i) Con el caudal teórico, proponer una ecuación de modelado y una empírica que mejor se ajuste al caudal real, para cada medidor de flujo.

- j) Plotear en papel milimetrado los valores Q real y Q teórico, para las distintas tomas y utilizando como herramienta el software Excel, se procederá a encontrar el coeficiente de descarga para cada medidor de flujo.

- k) Presentar conclusiones y comentarios.

Figura 31. **Flujograma del dispositivo experimental**



Fuente: elaboración propia.

Tabla VII. Datos obtenidos en el ensayo

Rotámetro H(cm)	Venturímetro		Ensamblamiento		Placa de orificio		Codo		T1	T2	T3	tiempo promedio
	h1 (cm)	h2(cm)	h3 (cm)	h4 (cm)	h5 (cm)	h6 (cm)	h7 (cm)	h8 (cm)				
2	50,6	49,8	50,1	50	50,2	50	49,8	49,6	1'46"36	1'46"17	1'46"78	1'46"44
4	46,7	45,2	46,1	46,2	46,2	45,8	45,7	45,4	1"15"18	1"15"21	1"15"18	1"15"19
6	41,7	39,4	41,2	41,4	41,5	41	40,9	40,5	57"07	57"00	56"96	57"01
8	36,6	33,2	35,7	36	36,2	35,6	35,7	35	46"18	46"26	46"20	46"21
10	31,6	26,8	30,8	31,2	31,5	30,8	30,6	29,6	39"09	38"70	38"58	38"79
12	25,4	19	24,2	24,7	24,9	24,1	24,2	22,9	33"17	33"24	33"28	33"23
14	45,4	36,9	44	44,6	45,4	44,2	44,4	42,8	30"36	30"12	30"28	30"25
16	43,2	31,9	41,2	41,9	42,6	41,2	41,7	39,5	25"96	25"89	25"90	25"92
18	40,6	27,7	38,6	39,6	40,6	38,8	39,3	36,8	23"21	23"04	23"26	23"17
20	37,1	20,9	34,7	35,8	36,8	34,7	35,4	32,2	21"02	21"06	21"06	21"05
22	34	14,8	31,2	33	33,9	31,4	32,4	28,2	19"04	19"12	19"28	19"15

Fuente: elaboración propia.

Calibración de un venturímetro

- a) Los datos del laboratorio serán: lecturas piezométricas, volumen del recipiente (8 litros), diámetro de entrada y salida del medidor de flujo ($\phi_e = 0,026$ m y $\phi_s = 0,016$ m).
- b) Proceder a fijar el caudal con la válvula de diafragma y tomando como referencia el rotámetro iniciando en dos, anotando la diferencia Δh que es necesaria para evaluar el caudal teórico en el medidor de flujo. Simultáneamente, para cada lectura debe aforarse el caudal real Q_r , empleando el método volumétrico, estos datos permitirán conocer el caudal teórico y real que circula por el sistema, para cada diferencial de alturas piezométricas.
- c) Emplear las ecuaciones (4) y (15) para la calibración del medidor de flujo.
- d) Con los datos y cálculos anteriores construir la curva de caudales del venturímetro, ploteando en el eje vertical el caudal real y en el eje horizontal el caudal teórico; ambos en m^3/s , se observará que se define una línea recta, se procederá a ajustarla con el método de mínimos cuadrados y se obtendrá la pendiente, cuyo valor representa el coeficiente de descarga. Recordando que la ecuación de una recta es: $y = mx + b$, la cual es similar a la relación entre el caudal real y teórico; $Q_r = C_d Q_t + b$, donde la naturaleza del fenómeno corresponde a un valor de Q_r para cada valor de Q_t y por lo tanto para cada valor de Δh .
- e) Para la determinación de la ecuación empírica de la descarga (caudal) del venturímetro, la ecuación modelo es: $Q_{real} = k(\Delta h)^n$ donde k y n son constantes que deben determinarse mediante métodos de regresión, esta

ecuación al linealizarla con las leyes de logaritmos da como resultado: $\log(Q_{\text{real}}) = n \cdot \log(\Delta h) + \log(k)$. La cual puede interpretarse como una recta donde la pendiente es el exponente n y la constante b es el logaritmo de k .

f) Para la determinación del porcentaje de error obtenido en las mediciones:

$$\% \text{ de error} = \frac{Q_{\text{real}} - Q_{\text{teórico}}}{Q_{\text{real}}}$$

se podrá hacer una comparación de la ecuación modelada y la empírica.

g) Construir una tabla con los datos obtenidos.

h) Presentar conclusiones o comentarios, brevemente.

Tabla VIII. Datos obtenidos en la calibración de un venturímetro

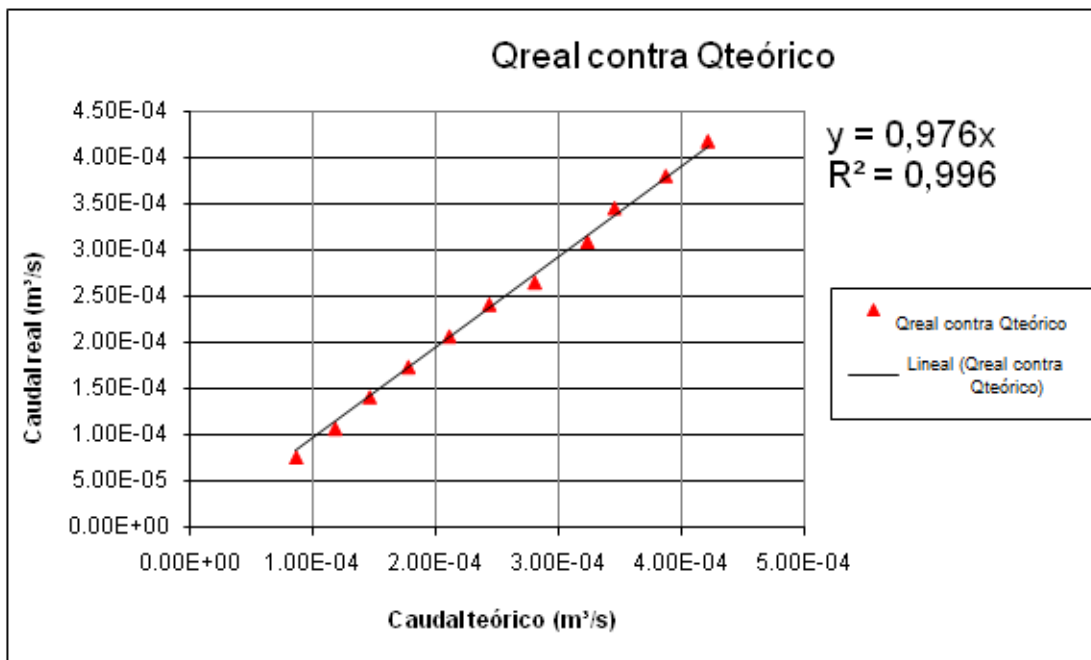
No	h_1 (m)	h_2 (m)	Δh (m)	T_p (seg)	V (m ³)	ϕ_1 (m)	ϕ_2 (m)	A_1 (m ²)	A_2 (m ²)	$Q_{\text{cal}} = \frac{V}{t}$ (m ³ /s)	$Q_{\text{teor}} = A_2 \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1 - \beta^4}}$ (m ³ /s)	$\frac{\% \text{error}}{Q_{\text{teor}}}$ $\frac{Q_{\text{real}} - Q_{\text{teor}}}{Q_{\text{real}}} * 100$	$Q_{\text{mod elado}}$ $Q_{\text{real}} = 0,001 * \Delta h^{1,52}$ (m ³ /s)	$\frac{\% \text{error}}{Q_{\text{real}}}$ $\frac{Q_{\text{real}} - Q_{\text{teorica}}}{Q_{\text{real}}} * 100$
1	0.506	0.498	0.008	106,44	0.008	0.026	0.016	5,31E-04	2,01E-04	6,40E-05	8,61E-05	11,76	7,66E-05	1,97
2	0.467	0.452	0.015	75,19	0.008	0.026	0.016	5,31E-04	2,01E-04	1,04E-04	1,22E-04	8,11	1,07E-04	0,64
3	0.417	0.394	0.023	57,01	0.008	0.026	0.016	5,31E-04	2,01E-04	1,39E-04	1,49E-04	1,5	1,34E-04	4,21
4	0.366	0.332	0.034	46,21	0.008	0.026	0.016	5,31E-04	2,01E-04	1,69E-04	1,77E-04	0,03	1,66E-04	4,41
5	0.316	0.268	0.048	38,79	0.008	0.026	0.016	5,31E-04	2,01E-04	2,02E-04	2,13E-04	0,23	1,99E-04	3,61
6	0.254	0.19	0.064	33,23	0.008	0.026	0.016	5,31E-04	2,01E-04	2,32E-04	2,49E-04	1,31	2,32E-04	3,77
7	0.454	0.369	0.085	30,25	0.008	0.026	0.016	5,31E-04	2,01E-04	2,52E-04	2,65E-04	3,54	2,69E-04	1,88
8	0.432	0.319	0.113	25,92	0.008	0.026	0.016	5,31E-04	2,01E-04	3,01E-04	3,18E-04	2,29	3,14E-04	1,57
9	0.406	0.277	0.129	23,17	0.008	0.026	0.016	5,31E-04	2,01E-04	3,31E-04	3,57E-04	2,3	3,36E-04	2,58
10	0.371	0.209	0.162	21,05	0.008	0.026	0.016	5,31E-04	2,01E-04	3,72E-04	3,86E-04	0,54	3,80E-04	0,09
11	0.34	0.148	0.192	19,15	0.008	0.026	0.016	5,31E-04	2,01E-04	4,06E-04	4,23E-04	1,49	4,16E-04	0,51

Fuente: elaboración propia.

Para la obtención del coeficiente de descarga C_d se ploteará en un plano cartesiano el caudal real contra el caudal teórico, situando en el eje de las abscisas el caudal teórico en el eje de las ordenadas el caudal real; se procederá a realizar un análisis de regresión²¹, utilizando como herramienta el software Excel; teniendo un valor de 0,944 como se muestra en la figura 32.

Se determinará el caudal real que pasa en el tubo de Venturi utilizando la ecuación (5) y el porcentaje de error que se presenta en la medición del flujo.

Figura 32. **Obtención del coeficiente de descarga C_d en el tubo de Venturi**



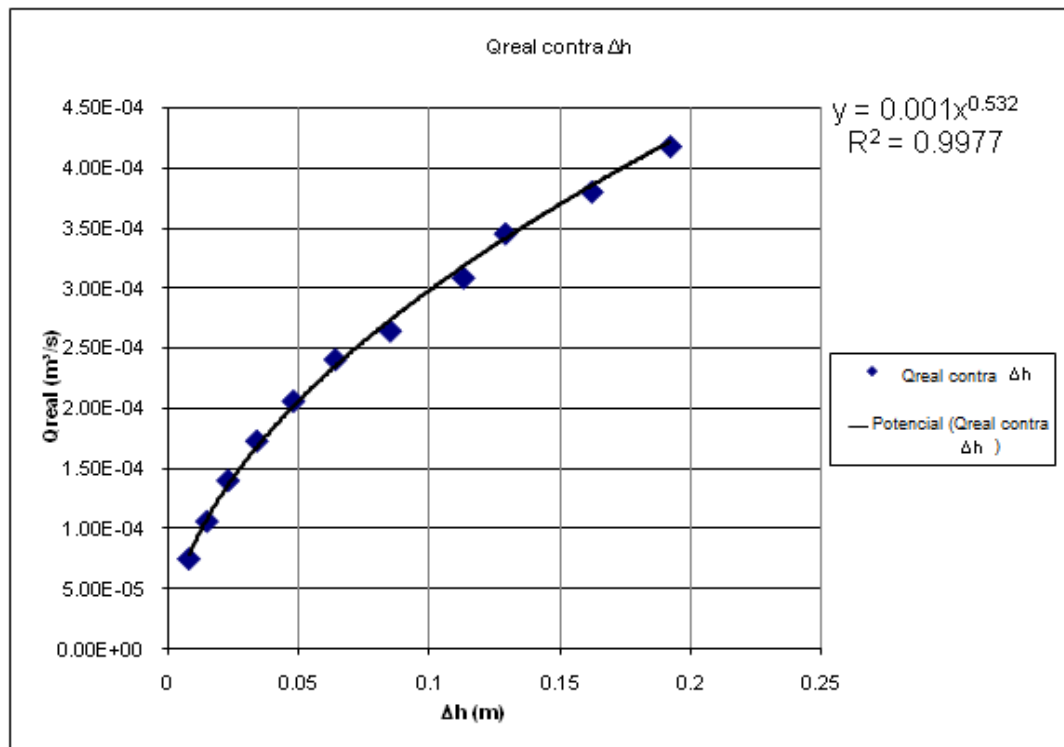
Fuente: elaboración propia.

Para calcular el coeficiente de descarga en el aforo volumétrico, se procederá a colocar en el eje de las abscisas la pérdida de energía Δh y en el eje de las ordenadas el caudal real, como se muestra en la figura 33. El cual da

²¹ GONZÁLES TOBAR, Carmen Angeluz. *Estadística*. 2a ed. Editora Educativa, 2003. p. 169.

como resultado un análisis de regresión, utilizando como herramienta Excel se obtienen los coeficientes 0,001 y 0,532 para la ecuación empírica y el porcentaje de error que se presenta en la medición del flujo.

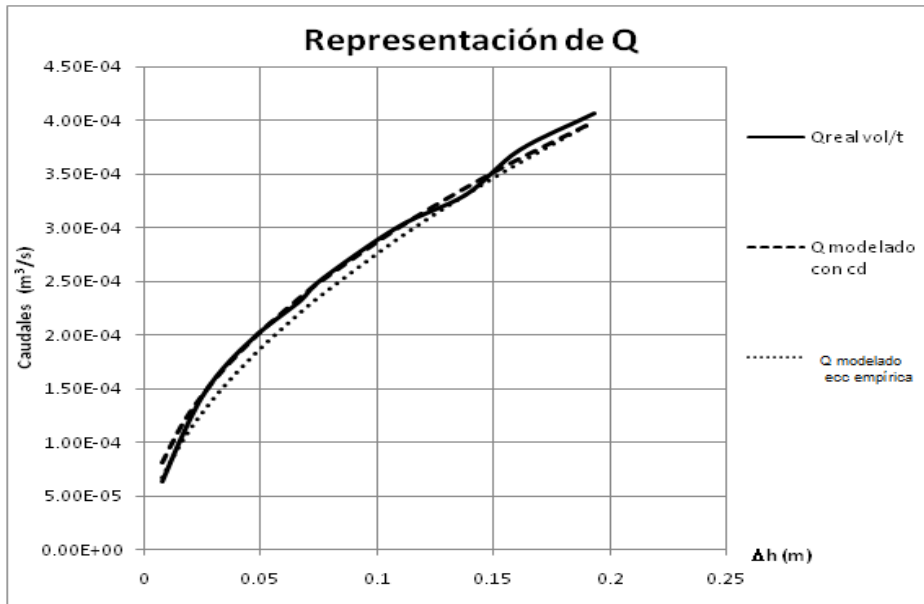
Figura 33. **Obtención del coeficiente de descarga C_d del caudal real en relación con la pérdida de energía en el tubo de Venturi**



Fuente: elaboración propia.

Obtenidas las gráficas del caudal modelado con el coeficiente de descarga C_d y el caudal modelado para la ecuación empírica, proceder a modelarlo en un solo gráfico.

Figura 34. **Representación de los caudales obtenidos en el tubo de Venturi**



Fuente: elaboración propia.

Una vez obtenidos los resultados, puede observarse que el caudal modelado se ajusta al caudal real, para diferencias de presiones menores a 0,15; por lo que utilizando la ecuación empírica, el margen de error es muy significativo cuando se requiera una mayor precisión en la medición de fluidos.

4.1. Calibración en el ensanchamiento

- a) Los datos del laboratorio serán: lecturas piezométricas, volumen del recipiente (8 litros), diámetro de entrada y salida del medidor de flujo ($\phi_e = 0,051$ m y $\phi_s = 0,026$ m).
- b) Emplear las ecuaciones (13) y (14) para la calibración del medidor de flujo.

- c) Con los datos y cálculos anteriores, proceder con los pasos descritos para la calibración del venturímetro.

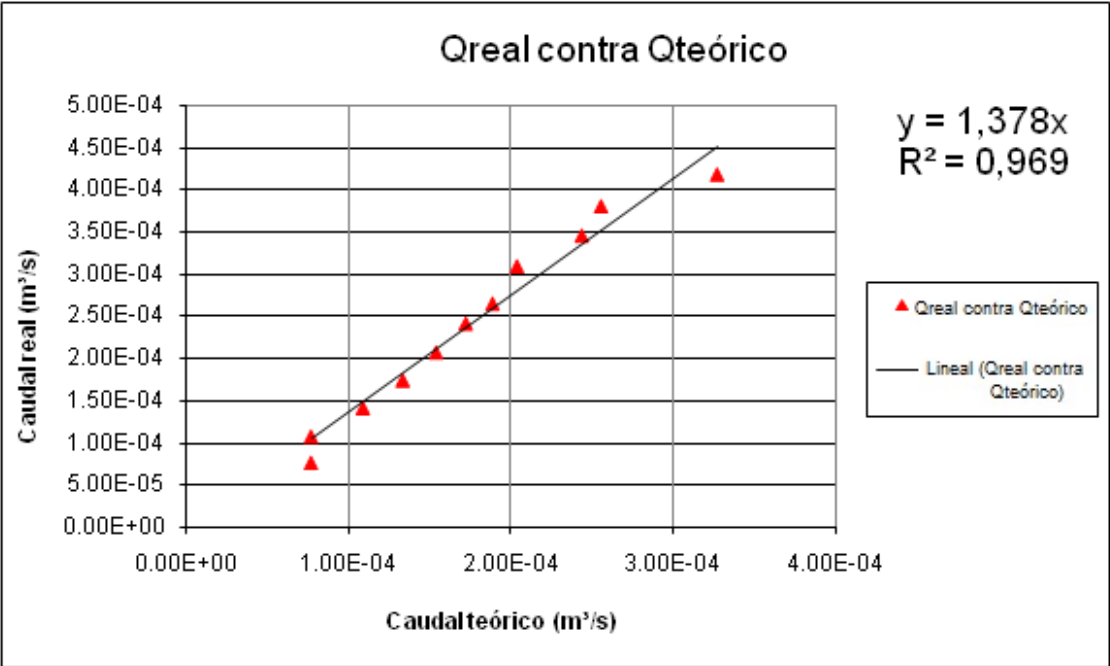
Tabla IX. Datos obtenidos en la calibración en el ensanchamiento

No	h_1 (m)	h_2 (m)	Δh (m)	T_p (seg)	V (m ³)	ϕ_1 (m)	ϕ_2 (m)	A_1 (m ²)	A_2 (m ²)	$Q_{real} = \frac{V}{t}$ (m ³ /s)	$Q_{teorico} = A_2 V_2$ (m ³ /s)	$Q_{modelado} = C_d Q_{teorico}$ (m ³ /s)	%error $\frac{Q_{real} - Q_{modelado}}{Q_{real}} * 100$ %	$Q_{modelado}$ $(Q_{real} = 0.0047 \Delta h^{1.58})$ (m ³ /s)	%error $\frac{Q_{real} - Q_{teorico}}{Q_{real}} * 100$ %
1	0.501	0.500	0.001	106.4	0.008	0.051	0.026	2.04E-03	5.31E-04	7.52E-05	7.70E-05	1.06E-04	41.2	9.23E-05	22.86
2	0.461	0.462	0.001	75.2	0.008	0.051	0.026	2.04E-03	5.31E-04	1.06E-04	7.70E-05	1.06E-04	0.25	9.23E-05	13.21
3	0.412	0.414	0.002	57	0.008	0.051	0.026	2.04E-03	5.31E-04	1.40E-04	1.09E-04	1.50E-04	6.95	1.37E-04	2.39
4	0.357	0.360	0.003	46.2	0.008	0.051	0.026	2.04E-03	5.31E-04	1.73E-04	1.33E-04	1.84E-04	6.18	1.73E-04	0.35
5	0.308	0.312	0.004	38.8	0.008	0.051	0.026	2.04E-03	5.31E-04	2.06E-04	1.54E-04	2.12E-04	2.92	2.03E-04	1.48
6	0.242	0.247	0.005	33.2	0.008	0.051	0.026	2.04E-03	5.31E-04	2.41E-04	1.72E-04	2.37E-04	1.43	2.31E-04	4.17
7	0.440	0.446	0.006	30.3	0.008	0.051	0.026	2.04E-03	5.31E-04	2.64E-04	1.89E-04	2.60E-04	1.7	2.56E-04	3.23
8	0.412	0.419	0.007	25.9	0.008	0.051	0.026	2.04E-03	5.31E-04	3.09E-04	2.04E-04	2.81E-04	9.03	2.79E-04	9.49
9	0.386	0.396	0.010	23.2	0.008	0.051	0.026	2.04E-03	5.31E-04	3.45E-04	2.44E-04	3.36E-04	2.8	3.42E-04	0.89
10	0.347	0.358	0.011	21.1	0.008	0.051	0.026	2.04E-03	5.31E-04	3.80E-04	2.55E-04	3.52E-04	7.39	3.61E-04	4.94
11	0.312	0.330	0.018	19.2	0.008	0.051	0.026	2.04E-03	5.31E-04	4.18E-04	3.27E-04	4.50E-04	7.78	4.70E-04	14.45

Fuente: elaboración propia.

Proceder a realizar un análisis de regresión utilizando como herramienta el software Excel; teniendo un valor de 1,378 para el coeficiente de descarga C_d como se muestra en la figura 35.

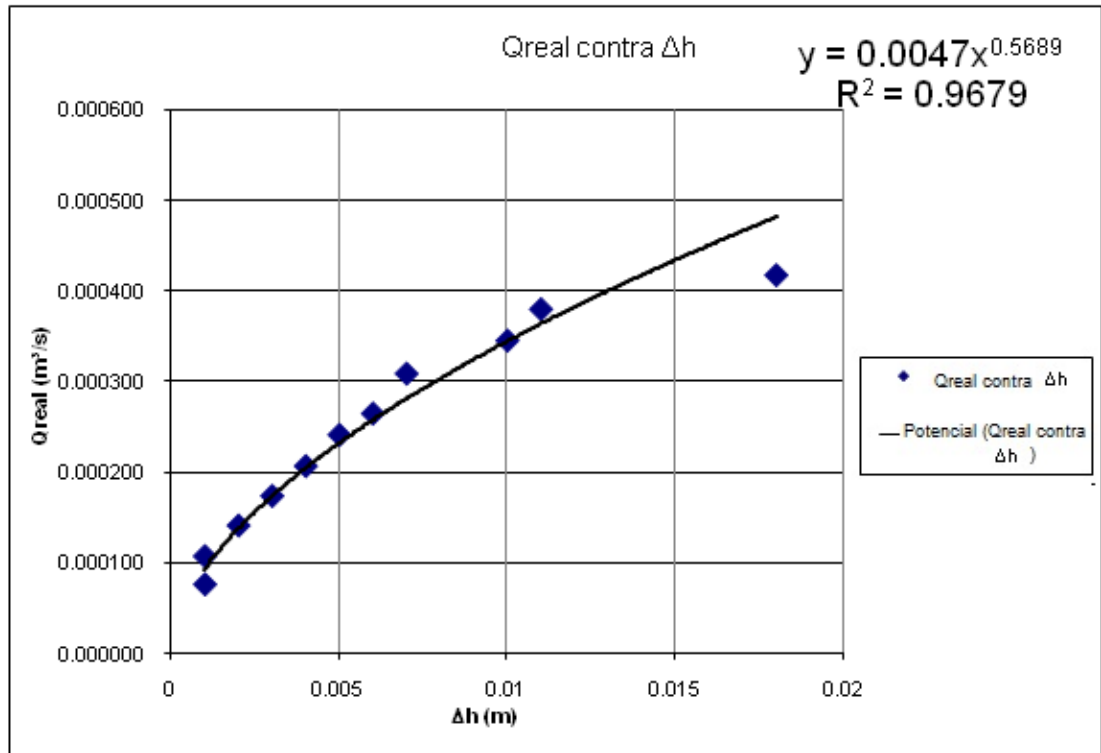
Figura 35. **Obtención del coeficiente de descarga C_d en el ensanchamiento**



Fuente: elaboración propia.

La figura 36 representa los coeficientes de descarga C_d en el medidor, siendo sus valores de 0,0047 y 0,5689.

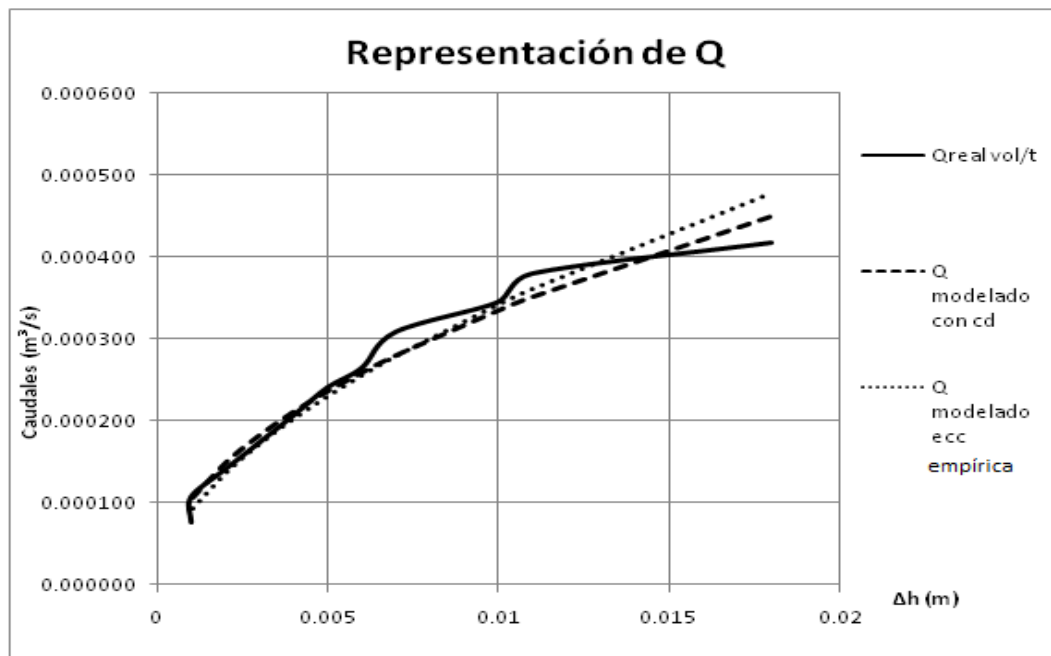
Figura 36. **Obtención del coeficiente de descarga C_d del caudal real en relación con la pérdida de energía en el ensanchamiento**



Fuente: elaboración propia.

Modelar en un solo gráfico, la ecuación teórica y la empírica (ver figura 37), para la representación de los caudales obtenidos.

Figura 37. Representación de los caudales obtenidos en el ensanchamiento



Fuente: elaboración propia.

Se visualiza que el porcentaje de error de la ecuación modelada y la empírica presentan cierta similitud, por lo que para un intervalo de diferencia de presión no se ajusta al caudal real que circula en el sistema.

4.2. Calibración de una boquilla de flujo

- Los datos del laboratorio serán: lecturas piezométricas, volumen del recipiente (8 litros), diámetro de entrada y salida del medidor de flujo ($\phi_e = 0,051$ m y $\phi_s = 0,035$ m).
- Emplear las ecuaciones (4) y (5) para la calibración del medidor de flujo.

- c) Por el principio de conservación de la energía junto con la condición de continuidad proceder a efectuar los cálculos descritos en el venturímetro.

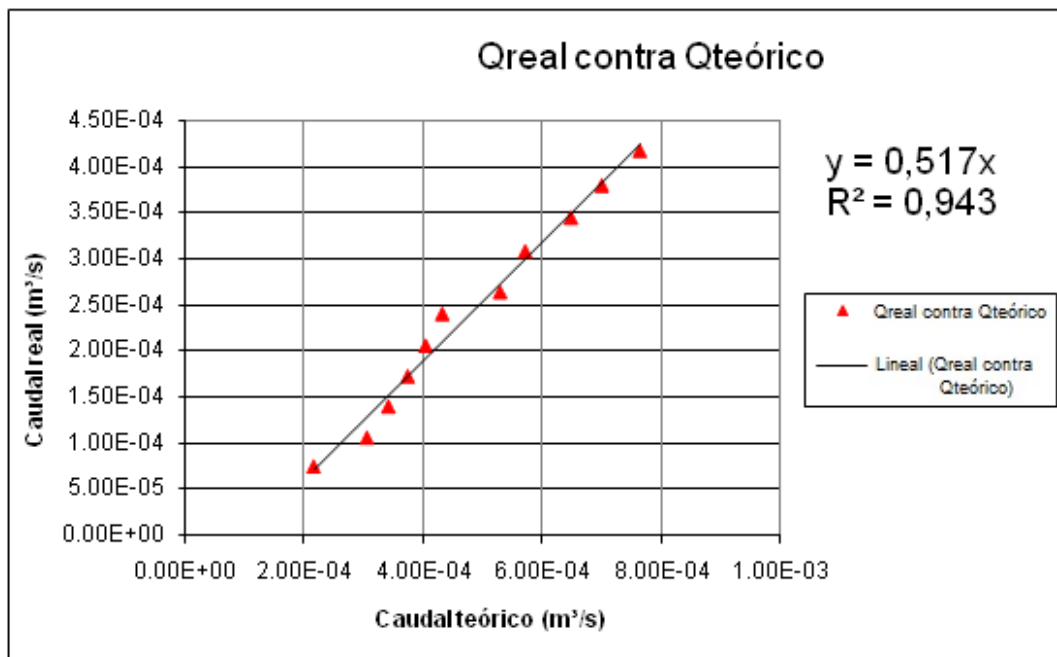
Tabla X. Datos obtenidos en la calibración de una boquilla de flujo

No	h_1	h_2	Δh	T_p	V	ϕ_1	ϕ_2	A_1	A_2	$Q_{real} = \frac{V}{t}$	$Q_{teórico} = A_2 v_2$	$Q_{real} = C_d Q_{teórico}$	% error $\frac{Q_{real} - Q_{teórico}}{Q_{real}} \times 100$	$Q_{modelado}$	% error $\frac{Q_{real} - Q_{modelado}}{Q_{real}} \times 100$
1	0.502	0.500	0.002	106,4	0,008	0,051	0,035	2,04E-03	9,62E-04	7,52E-05	2,16E-04	1,12E-04	48,84	6,57E-05	12,54
2	0.462	0.458	0.004	75,2	0,008	0,051	0,035	2,04E-03	9,62E-04	1,06E-04	3,06E-04	1,58E-04	48,69	1,07E-04	0,16
3	0.415	0.410	0.005	57	0,008	0,051	0,035	2,04E-03	9,62E-04	1,40E-04	3,42E-04	1,77E-04	26,05	1,24E-04	11,28
4	0.362	0.356	0.006	46,2	0,008	0,051	0,035	2,04E-03	9,62E-04	1,73E-04	3,74E-04	1,94E-04	11,92	1,41E-04	18,34
5	0.315	0.308	0.007	38,8	0,008	0,051	0,035	2,04E-03	9,62E-04	2,06E-04	4,04E-04	2,09E-04	1,48	1,57E-04	23,68
6	0.249	0.241	0.008	33,2	0,008	0,051	0,035	2,04E-03	9,62E-04	2,41E-04	4,32E-04	2,24E-04	7,06	1,73E-04	28,24
7	0.454	0.442	0.012	30,3	0,008	0,051	0,035	2,04E-03	9,62E-04	2,64E-04	5,29E-04	2,74E-04	3,61	2,29E-04	13,34
8	0.426	0.412	0.014	25,9	0,008	0,051	0,035	2,04E-03	9,62E-04	3,09E-04	5,72E-04	2,96E-04	4,10	2,55E-04	17,33
9	0.406	0.388	0.018	23,2	0,008	0,051	0,035	2,04E-03	9,62E-04	3,45E-04	6,48E-04	3,36E-04	2,80	3,04E-04	11,95
10	0.368	0.347	0.021	21,1	0,008	0,051	0,035	2,04E-03	9,62E-04	3,80E-04	7,00E-04	3,62E-04	4,62	3,38E-04	10,93
11	0.339	0.314	0.025	19,2	0,008	0,051	0,035	2,04E-03	9,62E-04	4,18E-04	7,64E-04	3,96E-04	5,32	3,82E-04	8,50

Fuente: elaboración propia.

Para obtener el coeficiente de descarga C_d en la placa de orificio se procederá a aplicar lo descrito en el tubo de Venturi; teniendo un valor de 0,517 como se muestra en la figura 38.

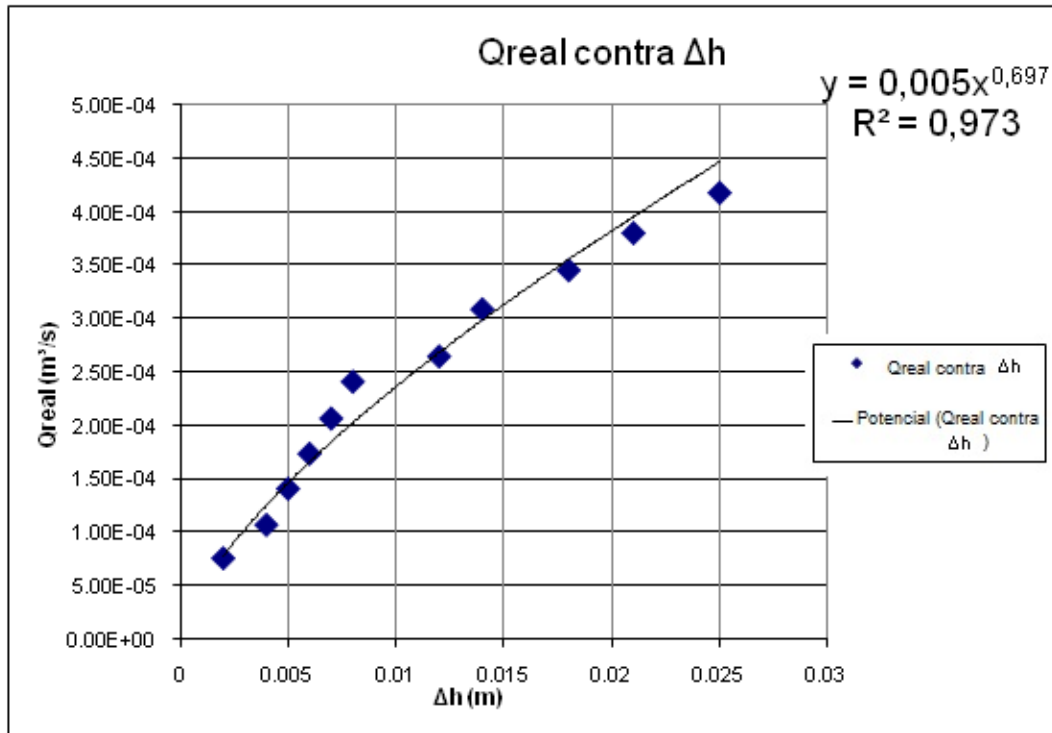
Figura 38. **Obtención del coeficiente de descarga C_d en la boquilla de flujo**



Fuente: elaboración propia.

De igual forma se obtienen los coeficientes 0,005 y 0,697 para la ecuación empírica (ver figura 39).

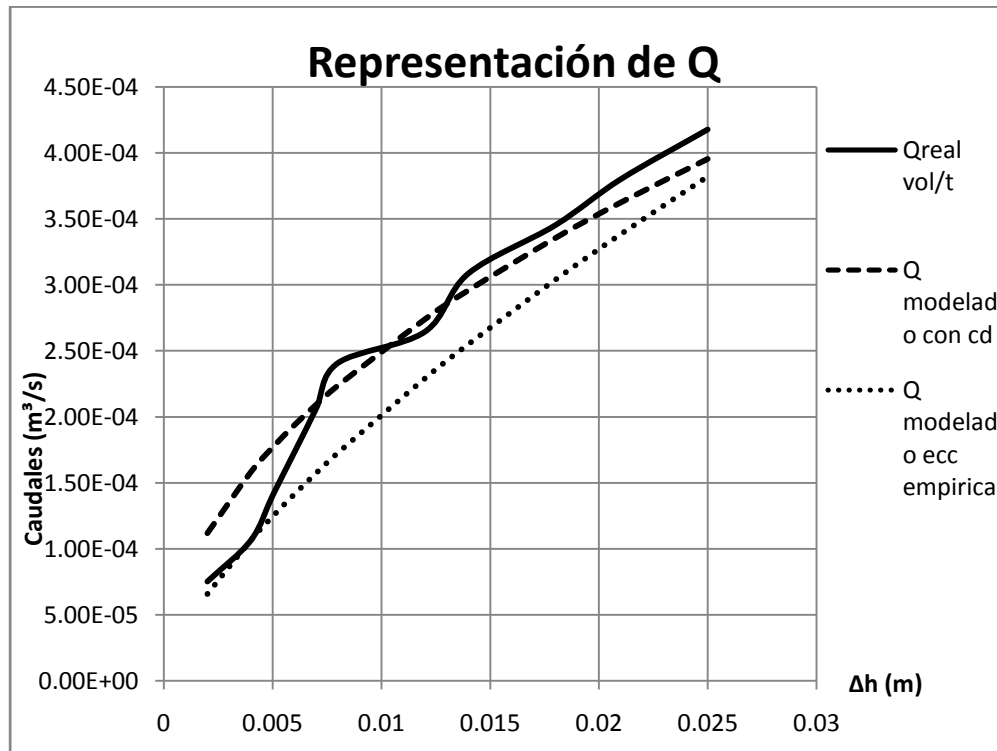
Figura 39. **Obtención del coeficiente de descarga C_d del caudal real en relación con la pérdida de energía en la boquilla de flujo**



Fuente: elaboración propia.

Realizado lo descrito anteriormente, se procede a modelar en un solo gráfico para la representación de los caudales obtenidos en la medición.

Figura 40. **Representación de los caudales obtenidos en la boquilla de flujo**



Fuente: elaboración propia.

El porcentaje de error obtenido en el medidor de flujo es muy significativo; por lo que, la ecuación que se ajusta de manera representativa es la modelada; pero para diferencias de presión menores a 0,005 m es conveniente la utilización de la ecuación empírica.

4.3. Calibración de un Rotámetro

- Los datos del laboratorio serán: volumen del recipiente (8 litros), escala del medidor de flujo en pares iniciando en 2 cm.
- Emplear la ecuación (7) para la calibración del medidor de flujo.

- c) Con los datos y cálculos anteriores, proceder con los pasos descritos para la calibración del venturímetro.

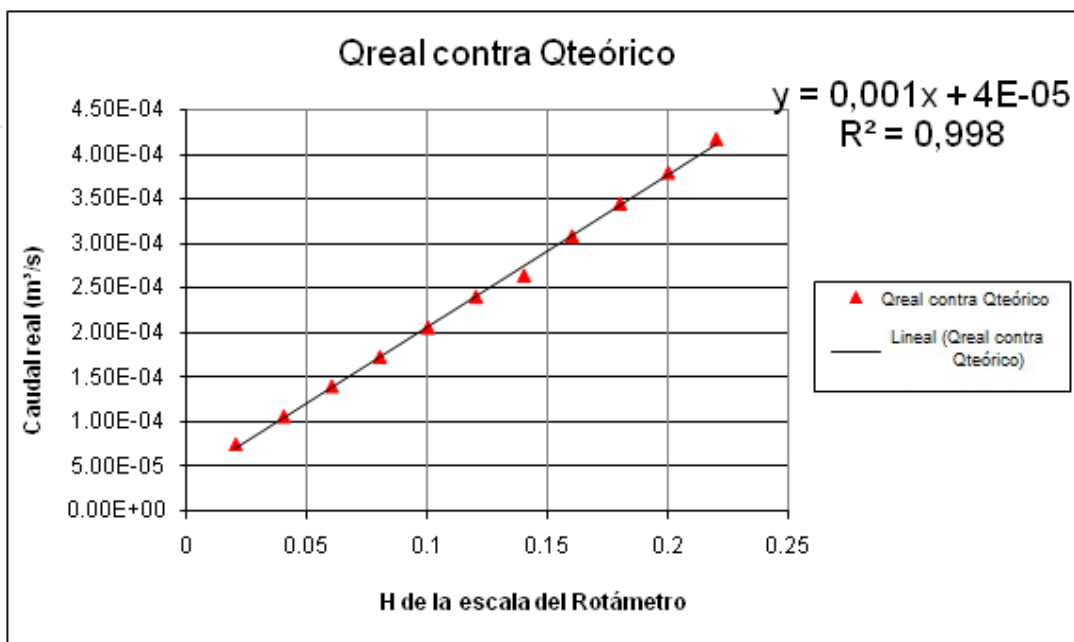
Tabla XI. Datos obtenidos en la calibración del Rotámetro

No	H _{rotámetro}		T _P	V		Q=V/t		$Q = k * H_{rotámetro} + 4 * 10^{-5}$	%error
	(m)	(m)		(m ³)	(m ³ /s)	(m ³ /s)	(m ³ /s)		
1	0,02	0,02	125,0	0,008	0,008	7,52E-05	6,00E-05	20,17	
2	0,04	0,04	76,9	0,008	0,008	1,06E-04	8,00E-05	24,81	
3	0,06	0,06	57,5	0,008	0,008	1,40E-04	1,00E-04	28,74	
4	0,08	0,08	47,3	0,008	0,008	1,73E-04	1,20E-04	30,69	
5	0,10	0,10	39,7	0,008	0,008	2,06E-04	1,40E-04	32,12	
6	0,12	0,12	34,5	0,008	0,008	2,41E-04	1,60E-04	33,54	
7	0,14	0,14	31,8	0,008	0,008	2,64E-04	1,80E-04	31,94	
8	0,16	0,16	26,6	0,008	0,008	3,09E-04	2,00E-04	35,2	
9	0,18	0,18	24,2	0,008	0,008	3,45E-04	2,20E-04	36,28	
10	0,20	0,20	21,5	0,008	0,008	3,80E-04	2,40E-04	36,85	
11	0,22	0,22	19,7	0,008	0,008	4,18E-04	2,60E-04	37,76	

Fuente: elaboración propia.

Para obtener el coeficiente de descarga C_d en el medidor, proceder en lo descrito en el tubo de Venturi; dando como resultado de $0,001$ y $4 \cdot 10^{-5}$ como se muestra en la figura 41.

Figura 41. **Variación de la pérdida de carga con el caudal en el Rotámetro**



Fuente: elaboración propia.

4.4. Calibración de un codo

- Los datos del laboratorio serán: lecturas piezométricas, volumen del recipiente (8 litros), diámetro de entrada y salida del medidor de flujo ($\phi_e = 0,051\text{m}$).
- Emplear las ecuaciones (19) y (20) para la calibración del medidor de flujo.
- Con los datos y cálculos anteriores, proceder con los pasos descritos para la calibración del venturímetro.

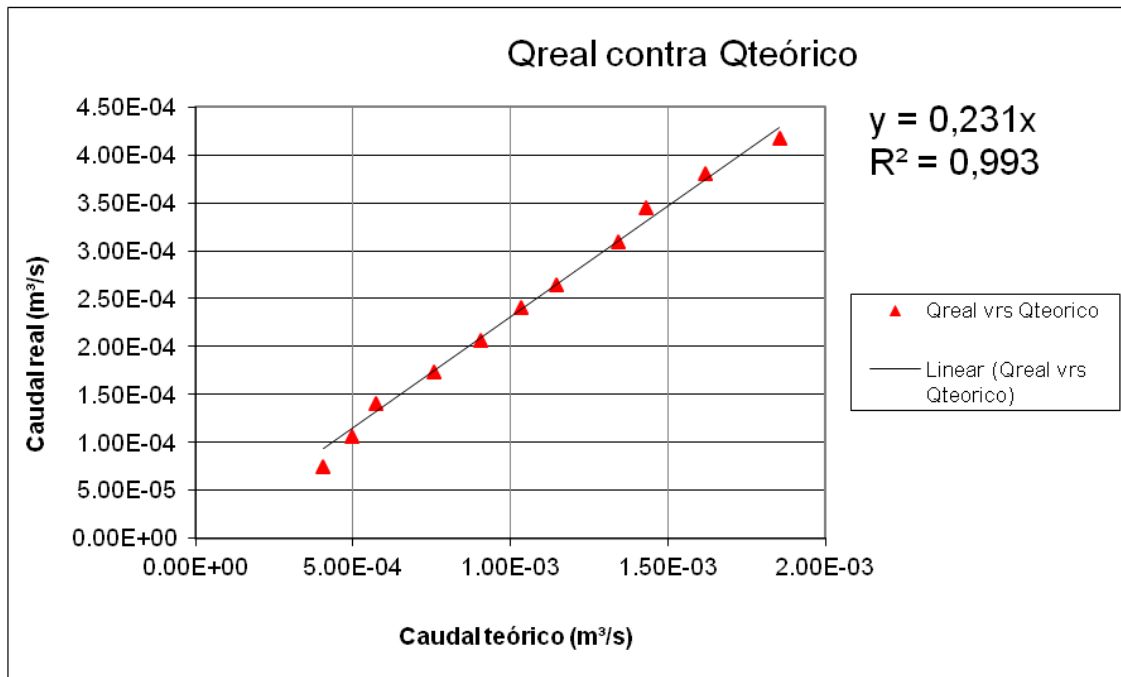
Tabla XII. Datos obtenidos en la calibración de un codo

No	h_1 (m)	h_2 (m)	Δh (m)	T_p (seg)	V (m ³)	ϕ (m)	A_1 (m)	$Q_{real} = \frac{V}{t}$ (m ³ /s)	$Q_{teórico} = A_1 \sqrt{2g\Delta h}$ (m ³ /s)	$\frac{Q_{modelado}}{Q_{real}} = C_d \cdot \frac{Q_{teórico}}{Q_{real}}$ (m ³ /s)	$\frac{\%error}{Q_{real}} = \frac{Q_{real} - Q_{teórico}}{Q_{real}} \cdot 100$ (%)	$Q_{modelado}$ $Q_{real} = 0,002 \cdot \Delta h^{3/2}$ (m ³ /s)	$\frac{\%error}{Q_{real}} = \frac{Q_{real} - Q_{teórico}}{Q_{real}} \cdot 100$ (%)
1	0,498	0,496	0,002	106,4	0,008	0,051	2,04E-03	7,52E-05	2,16E-04	9,35E-05	24,37	6,89E-05	8,34
2	0,457	0,454	0,003	75,2	0,008	0,051	2,04E-03	1,06E-04	3,06E-04	1,14E-04	7,60	8,58E-05	19,33
3	0,409	0,405	0,004	57,0	0,008	0,051	2,04E-03	1,40E-04	3,42E-04	1,32E-04	5,79	1,00E-04	28,52
4	0,357	0,350	0,007	46,2	0,008	0,051	2,04E-03	1,73E-04	3,74E-04	1,75E-04	1,02	1,36E-04	21,53
5	0,306	0,296	0,01	38,8	0,008	0,051	2,04E-03	2,06E-04	4,04E-04	2,09E-04	1,35	1,65E-04	20,08
6	0,242	0,229	0,013	33,2	0,008	0,051	2,04E-03	2,41E-04	4,32E-04	2,38E-04	1,01	1,90E-04	21,07
7	0,444	0,428	0,016	30,3	0,008	0,051	2,04E-03	2,64E-04	5,29E-04	2,64E-04	0,03	2,13E-04	19,59
8	0,417	0,395	0,022	25,9	0,008	0,051	2,04E-03	3,09E-04	5,72E-04	3,10E-04	0,45	2,53E-04	18,12
9	0,393	0,368	0,025	23,2	0,008	0,051	2,04E-03	3,45E-04	6,48E-04	3,30E-04	4,28	2,71E-04	21,56
10	0,354	0,322	0,032	21,1	0,008	0,051	2,04E-03	3,80E-04	7,00E-04	3,74E-04	1,62	3,10E-04	18,53
11	0,324	0,282	0,042	19,2	0,008	0,051	2,04E-03	4,18E-04	7,64E-04	4,28E-04	2,54	3,59E-04	14,12

Fuente: elaboración propia.

El coeficiente de descarga C_d en el medidor, se obtiene un valor de 0,231 como se muestra en la figura 42.

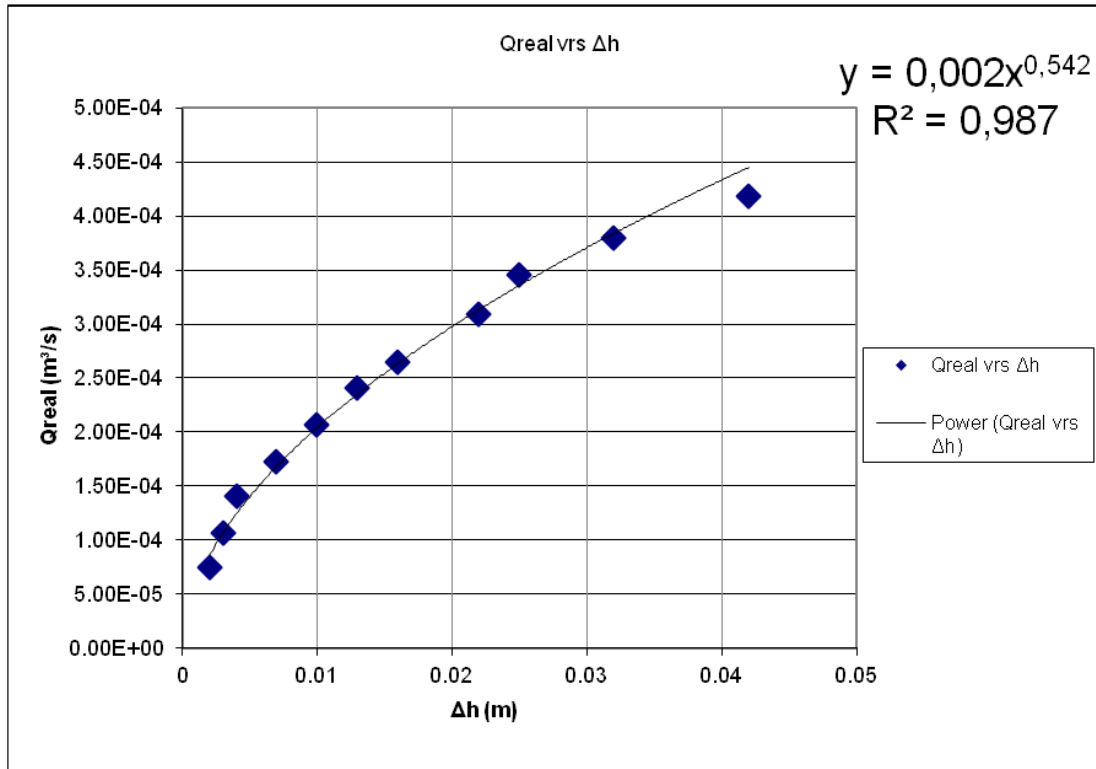
Figura 42. **Obtención del coeficiente de descarga C_d en el codo**



Fuente: elaboración propia.

Los coeficientes para la ecuación empírica, en relación con la pérdida de energía en el medidor de flujo, son de 0,002 y 0,542 (ver figura 43).

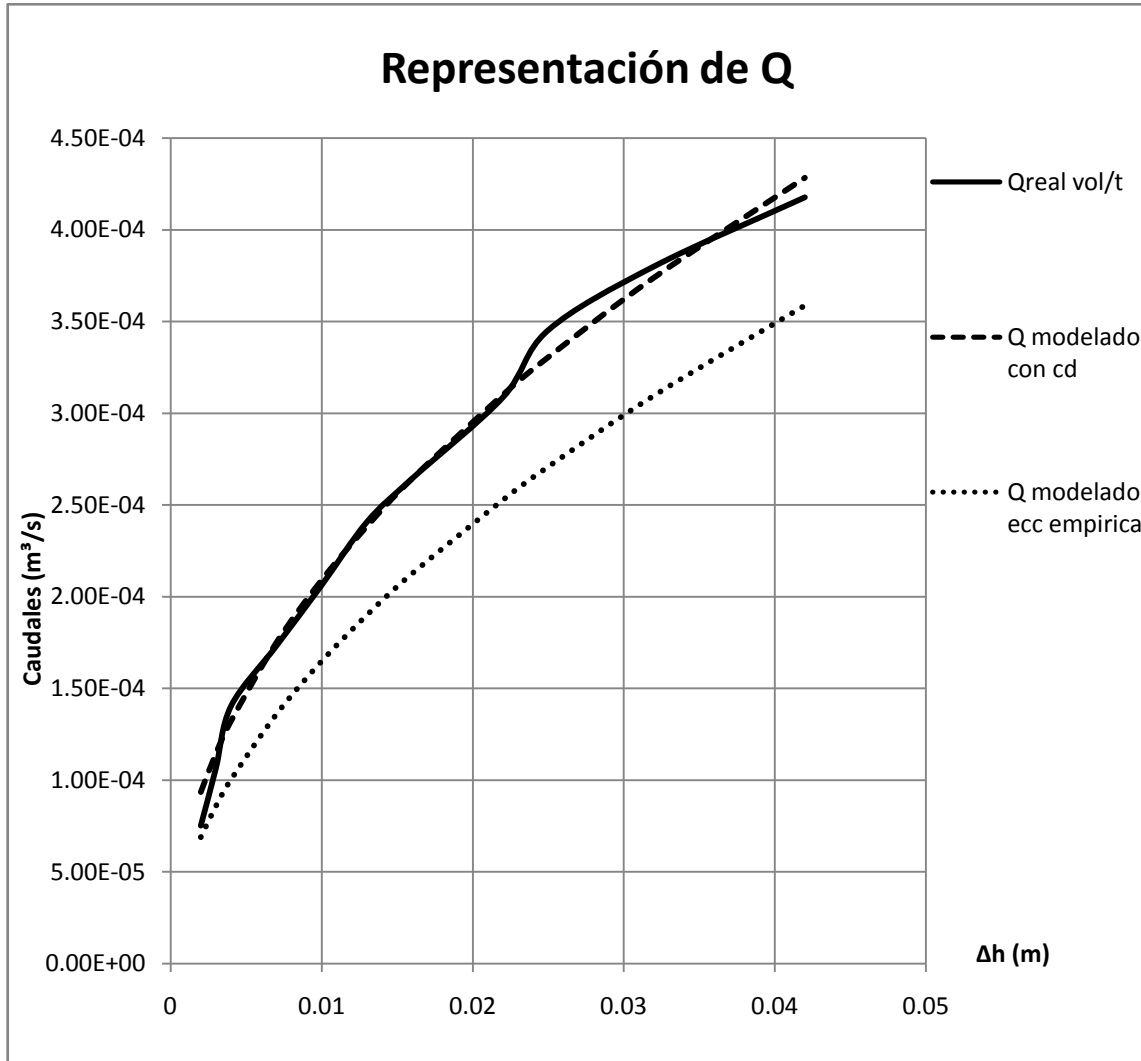
Figura 43. **Obtención del coeficiente de descarga C_d del caudal real en relación con la pérdida de energía en el codo**



Fuente: elaboración propia.

Proceder a modelar en un solo gráfico el coeficiente de descarga del codo en relación con su pérdida de energía.

Figura 44. Representación de los caudales obtenidos en el codo

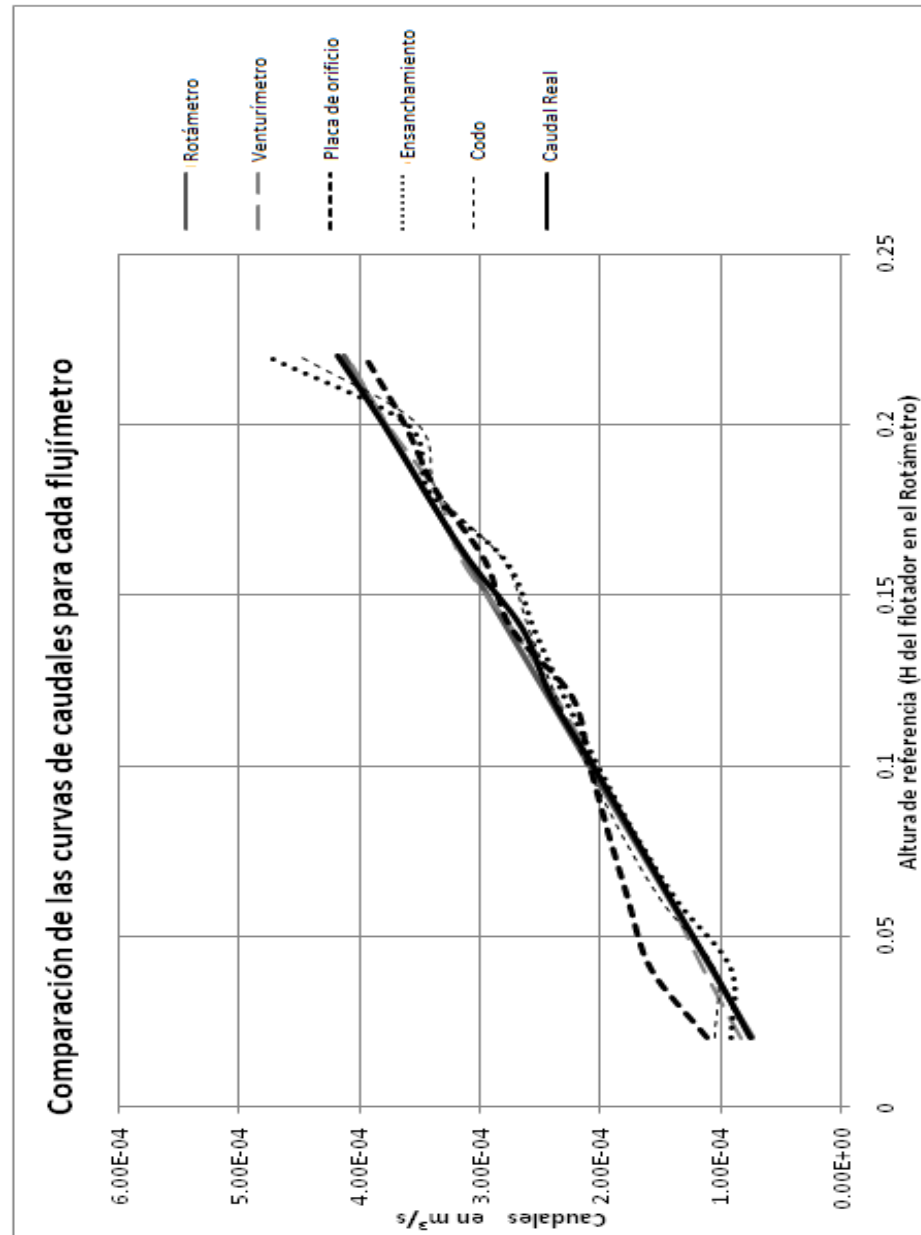


Fuente: elaboración propia.

Observar que la ecuación con su coeficiente de descarga C_d se ajusta de una mejor forma al caudal real que circula en el sistema. Por lo que utilizando la ecuación empírica, representa un margen de error muy grande para su calibración.

4.5. Comparación de los caudales tomados en los cinco medidores de flujo y determinación del porcentaje de error

Figura 45. Comparación de las curvas de caudales para cada flujímetro



Fuente: elaboración propia.

En la figura 45 se observa que en las singularidades (codos y ensanchamientos) en tuberías, se tiene un error muy significativo para la medición de flujos; pero en cambio, se pueden utilizar estos medidores cuando se requiera una aproximación del caudal que se circula en el sistema. Para caudales muy pequeños la placa de orificio oscila considerablemente en relación con el caudal real, por lo que el tubo de Venturi y el Rotámetro, se ajustan para cualquier valor de caudal.

Posteriormente (ver tabla XIII) se observa, que el porcentaje de error obtenido en los tiempos de llenado en el aforo volumétrico es menor al dos por ciento, por lo que es aceptable para la calibración de medidores de flujo.

4.6. Porcentaje de error obtenido con el método de aforo volumétrico

Tabla XIII. Porcentaje de error obtenido con el método de aforo volumétrico

t_1 (s)	t_2 (s)	t_3 (s)	Q_1 (cm ³ /s)	Q_2 (cm ³ /s)	Q_3 (cm ³ /s)	$t_{max.}$ (s)	$t_{min.}$ (s)	% de error ($t_{max.} - t_{min.}$)/ $t_{max.} * 100$
106,46	106,17	106,78	75,1	75,4	74,9	106,78	106,78	0,57
75,18	75,21	75,18	106,4	106,4	106,4	75,21	75,18	0,04
57,07	57,00	56,96	140,2	140,4	140,4	57,07	56,96	0,19
46,18	46,26	46,20	173,2	172,9	173,2	46,26	46,18	0,17
39,09	38,70	38,58	204,7	206,7	207,4	39,09	38,58	1,30
33,17	33,24	33,28	241,2	240,7	240,4	33,28	33,17	0,33
30,36	30,12	30,28	263,5	265,6	264,2	30,36	30,12	0,79
25,96	25,89	25,90	308,2	309,0	308,9	25,96	25,89	0,27
23,21	23,04	23,26	344,7	347,2	343,9	23,26	23,04	0,95
21,02	21,06	21,06	380,6	379,9	379,9	21,06	21,02	0,19
19,04	19,12	19,28	420,2	418,4	414,9	19,28	19,04	1,24

Fuente: elaboración propia.

CONCLUSIONES

1. En el caso de la boquilla de flujo o placa de orificio, el coeficiente de descarga (C_d), obtenido en la calibración, es de 0,517 lo cual concuerda con las especificaciones que el valor debe estar en un intervalo de 0,40 a 0,70, por lo que no se utilizaría la ecuación empírica para la calibración de flujos.
2. En el ensayo del tubo de Venturi, la ecuación con el coeficiente de descarga (C_d) es la que más se aproxima a los caudales observados, por lo que se aconseja que esta última sea utilizada para estimar el caudal. Sin embargo, la ecuación empírica tiene buena aproximación, cuando los caudales aumentan gradualmente.
3. En el caso del ensanchamiento, los caudales generados por el coeficiente de descarga (C_d) y ecuación empírica difieren mucho con los caudales observados en el ensayo, por lo que no es aconsejable un ensanchamiento brusco como medidor de flujo; según las ecuaciones obtenidas no tienen buena correlación con los caudales reales.
4. Para el ensayo del codo se observa que los caudales obtenidos en las ecuaciones del mismo difieren de manera significativa con los caudales, por lo que se demuestra que los codos y otras singularidades solo se pueden utilizar si no se necesita mucha precisión para la medición de flujos.

5. En cuestiones de evaluación y supervisión, el conocimiento que se tenga sobre principios hidráulicos llevará a conocer el funcionamiento de los distintos medidores de flujo, de manera que se pueda intervenir en el diseño de un sistema de conducción para conductos cerrados, tomando en cuenta que el caudal es el dato más importante.
6. Los resultados obtenidos en el Rotámetro muestran que es un buen medidor para la calibración de flujos en comparación con los otros dispositivos, debido a que su forma es cónica, el flotador no oscila y queda en reposo para cierto valor de caudal.
7. El error en la toma de tiempo para los aforos realizados en el ensayo es aceptable, ya que fue menor al 2%.
8. Con lo obtenido en el ensayo se determinó que en las singularidades (ensanchamientos y codos), la pérdida de presión es mayor; sin embargo, cuando se requiera poca pérdida de energía, el tubo de Venturi a diferencia de la boquilla de flujo, la pérdida de presión total es 80 % menor y el perfil de entrada redondeado es menos sensible que el acabado afilado del medidor.

RECOMENDACIONES

1. Es importante el mantenimiento del circuito y de los medidores de flujo, por lo que se debe efectuar periódicamente una revisión de las uniones para evitar posteriores fugas, vaciar el tanque de agua cuando no se utilice para evitar la corrosión en el interior de la bomba y el crecimiento de microorganismos dentro de la tubería de acrílico y de los piezómetros.
2. Cuando se realice el aforo volumétrico debe evitarse hacer la recarga al depósito cerca de la entrada de succión de la bomba; ya que se generan vórtices, afectando la medición registrada inicialmente en los piezómetros.
3. Orientar a los estudiantes del curso de Mecánica de Fluidos, dando a conocer este material, el cual puede incluirse en las prácticas de Laboratorio del Curso.
4. El tubo de Venturi es particularmente recomendable para líquidos con sólidos en suspensión, ya que no difieren en la lectura, pero su costo es elevado en comparación a los otros medidores de flujo.
5. En el caso de usar singularidades (ensanchamiento y codos) para medir caudales en una tubería, se debe tomar en cuenta que estos son de baja precisión, por lo que el caudal obtenido por el ensanchamiento o codo, solo debe usarse como referencia.

BIBLIOGRAFÍA

1. DE AZEVEDO, J. M.; Acosta A. Guillermo. *Manual de hidráulica*. ACOSTA A., Guillermo (trad.) 6a ed. México: Harla, 1975. 578 p.
2. LÓPEZ, C. Ricardo A. *Diseño de acueductos y alcantarillados*. 2a ed. Colombia: Alfaomega, 2000. 402 p.
3. MATAIX, Claudio. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. 2a ed. México: Alfaomega, 2005. 662 p.
4. MOTT, Robert L. *Mecánica de fluidos aplicada*. 4a ed. México: Prentice Hall Hispanoamericana. 1999. 515 p.
5. SIMON, Andrew L. *Hidráulica básica*. 3a ed. México: Limusa, 1992. 234 p.
6. STREETER, L. Victor; WYLIE E. Benjamin. *Mecánica de los fluidos*. GARCÍA, Andrés (trad.) 3a ed. México: McGraw-Hill, 1996. 612 p.