



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

"PRUEBAS DE MEDIDORES DE GASTO
REALIZADAS EN EL LABORATORIO
DE HIDRÁULICA DE LA FACULTAD
DE INGENIERÍA"

TESIS PROFESIONAL
que para obtener el título de
INGENIERO CIVIL

presenta

Claudia Lucía Hernández Martínez

Director de Tesis

M. en I. Arturo Nava Mastache



Ciudad Universitaria, D.F., febrero de 1996.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

42
2 25



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERIA
DIRECCION
60-1-197/93

Señorita
CLAUDIA LUCIA HERNANDEZ MARTINEZ
Presente.

En atención a su solicitud me es grato hacer de su conocimiento el tema que propuso el profesor **M.I. ARTURO NAVA MASTACHE**, que aprobó esta Dirección, para que lo desarrolle usted como tesis de su examen profesional de **INGENIERO CIVIL**.

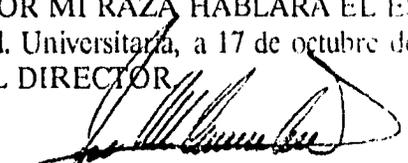
"PRUEBAS DE MEDIDORES DE GASTO REALIZADAS EN EL LABORATORIO DE HIDRAULICA DE LA FACULTAD DE INGENIERIA"

- I. INTRODUCCION
- II. ANTECEDENTES
- III. TIPOS DE MEDIDORES
- IV. PRUEBAS DE LABORATORIO
- V. ANALISIS DE RESULTADOS
- VI. CONCLUSIONES

Ruego a usted cumplir con la disposición de la Dirección General de la Administración Escolar en el sentido de que se imprima en lugar visible de cada ejemplar de la tesis el título de ésta.

Asimismo le recuerdo que la Ley de Profesiones estipula que deberá prestar servicio social durante un tiempo mínimo de seis meses como requisito para sustentar Examen Profesional.

Atentamente
"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"
Cd. Universitaria, a 17 de octubre de 1994.
EL DIRECTOR


ING. JOSE MANUEL COVARRUBIAS SOLIS

JMCS/RCR*nl

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



" PRUEBAS DE MEDIDORES DE
GASTO REALIZADAS EN EL
LABORATORIO DE HIDRÁULICA
DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA".



Dedicatorias

*A mis padres
Gema y Agustín
por su gran cariño, apoyo, comprensión
y valiosos consejos.*

*A mis hermanos
Gema, Edith y Gerardo
por su afecto, entusiasmo y ejemplo.*

*A mis abuelos
Lolita y Leonardo
por los inolvidables momentos que compartí con ellos.*

*A mis amigos
por su apoyo incondicional, su afecto y sus consejos*

Agradecimientos

*A mi Universidad
por todo lo que aprendí y seguiré aprendiendo en ella.*

*A mi director de tesis
Ing. Arturo Nava Mastache por el apoyo recibido
para la realización de este trabajo.*

*A Oscar Estrada
por su colaboración en la revisión y organización
del documento.*

*A Iatis López
por el apoyo otorgado en la documentación y
orientación del trabajo.*

*Al Ing. Francisco Flores
por las ideas aportadas para la realización de esta tesis
y por sus valiosas enseñanzas.*

*A Eduardo y Ana Lilia
por su colaboración en el desarrollo de este trabajo.*

CONTENIDO

CONTENIDO

	PAG
LISTA DE FIGURAS.	V
LISTA DE TABLAS.	IX
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.	1
CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES.	5
2.1. Flujo en tuberías.	6
2.1.1. Radio hidráulico.	6
2.1.2. Presión.	7
2.1.3. Dispositivos para la medición de la presión.	8
2.1.3.1. Tubo piezométrico.	9
2.1.3.2. Manómetro en "U" de líquido para presiones relativas.	10
2.1.3.3. Manómetro diferencial.	10
2.1.4. Ecuación de la Energía.	11
2.1.4.1. Energía potencial.	12
2.1.4.2. Energía de presión.	12
2.1.4.3. Energía cinética.	14
2.1.5. Clasificación de flujos.	16
2.1.5.1. Flujo permanente y no permanente.	16
2.1.5.2. Flujo uniforme y no uniforme.	16
2.1.5.3. Flujo laminar.	17
2.1.5.4. Flujo turbulento.	18
2.1.6. Número de Reynolds.	20

2.2. Dispositivo de aforo. Vertedor triangular de pared delgada.	22
2.2.1. Generalidades.	22
2.2.2. Ecuación de gasto.	22
2.2.3. Características del vertedor utilizado.	25
2.3. Conceptos básicos.	27
2.3.1. Efecto Doppler.	27
2.3.2. Transductores.	28
CAPÍTULO 3. TIPOS DE MEDIDORES.	30
3.1. Dispositivos más comunes en la medición de gasto en tuberías a presión.	31
3.1.1. Medidor Venturi.	31
3.1.2. Diafragma.	35
3.1.3. Tobera.	38
3.1.4. Tubo de Pitot.	40
3.1.5. Tubo de Prandtl.	42
3.1.6. Medidor de turbina.	44
3.1.7. Medidor de propela.	47
3.1.8. Medidor electromagnético.	49
3.1.9. Medidor ultrasónico.	51
3.2. Criterios para la selección de los equipos de prueba.	54
3.3. Descripción de los equipos seleccionados.	58
3.3.1. Medidor portátil de inserción de tipo electromagnético marca "Marsh-McBirney, Inc. (FLO-TOTE)".	58
3.3.2. Medidor portátil de tipo ultrasónico por tiempo en tránsito marca "CONTROLOTRON" modelo "UNIFLOW".	60
3.3.3. Medidor portátil de tipo ultrasónico por tiempo en tránsito marca "BADGER METER, Inc." modelo "Compusonic 4500-12".	62
CAPÍTULO 4. PRUEBAS DE LABORATORIO.	66

4.1. Elección de la infraestructura hidráulica.	67
4.2. Descripción de la infraestructura utilizada en la realización de las pruebas.	68
4.2.1. Revisión del vertedor de aforo.	73
4.3. Desarrollo de las pruebas.	75
4.3.1. Actividades previas en el vertedor.	75
4.3.2. Realización de la pruebas.	76
4.3.2.1. Medidor electromagnético marca "Marsh-McBirney, Inc. (FLO-TOTE)".	76
4.3.2.2. Medidor ultrasónico por tiempo en tránsito marca "CONTROLOTRON".	78
4.3.2.3. Medidor ultrasónico por tiempo en tránsito marca "BADGER METER, Inc."	80
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.	83
5.1. Consideraciones generales.	84
5.1.1. Precisión y error relativo.	85
5.2. Desarrollo de las evaluaciones y resultados.	87
5.2.1. Medidor electromagnético marca "Marsh-McBirney, Inc. (FLO-TOTE)".	87
5.2.2. Medidor ultrasónico por tiempo en tránsito marca "CONTROLOTRON".	90
5.2.3. Medidor ultrasónico por tiempo en tránsito marca "BADGER METER, Inc."	93
5.3. Resumen comparativo.	96
5.3.1. Probabilidad asociada con la precisión.	99
CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.	104
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	107

LISTA DE FIGURAS

	PAG
Figura 2.1. Niveles de referencia para medir la presión.	7
Figura 2.2. Piezómetro.	9
Figura 2.3. Manómetro en "U" de líquido para presiones relativas.	10
Figura 2.4. Manómetro diferencial.	11
Figura 2.5. Desplazamiento de un émbolo en un cilindro con aceite.	13
Figura 2.6. Representación gráfica de la Ecuación de la Energía.	15
Figura 2.7. Esquema del flujo laminar.	17
Figura 2.8. Esquema del flujo turbulento.	18
Figura 2.9. Distribución parabólica de velocidades en régimen laminar.	18
Figura 2.10. Esquema del elemento cilíndrico considera en el fluido.	19
Figura 2.11. Experimento de Reynolds.	20
Figura 2.12. Geometría de la sección de un vertedor de pared delgada.	22
Figura 2.13. Coeficiente de gasto μ de vertedores triangulares en la formula de la Universidad Católica de Chile.	24
Figura 2.14. Valores de K en la fórmula de la Universidad Católica de Chile para vertedores triangulares.	24
Figura 2.15. Características geométricas del vertedor utilizado.	25
Figura 2.16. Curva de descarga del vertedor utilizado para el aforo del gasto.	27
Figura 3.1. Venturi conectado a manómetro diferencial.	32
Figura 3.2. a) Coeficiente C_d en función del Re para un venturi. b) Coeficiente C_d en función del grado de estrangulamiento para un venturi.	34
Figura 3.3. Croquis de la instalación de un diafragma.	36

Figura 3.4.	Coeficiente de gasto C_d para diafragmas estándar o normalizados, en función de Re .	37
Figura 3.5.	Tobera intercalada entre bridas en una tubería	38
Figura 3.6.	Coeficiente de gasto C_d para una tobera estándar o normalizada, en función de Re .	39
Figura 3.7.	Tubo de Pitot y líneas de corriente alrededor del mismo.	41
Figura 3.8.	Tubo de Prandtl.	42
Figura 3.9.	Principales componentes de un medidor de turbina.	45
Figura 3.10.	Medidor de turbina fabricado por "Badger Meter Co USA".	46
Figura 3.11.	Medidor de propela fabricado por "Badger Meter Co.USA".	48
Figura 3.12.	Principio básico del funcionamiento de un medidor electromagnético.	50
Figura 3.13.	Aplicación del efecto Doppler para la medición de caudales en tuberías.	52
Figura 3.14.	Carátula de un medidor ultrasónico marca "Badger Meter Co USA".	52
Figura 3.15.	Medidor portátil de inserción, tipo electromagnético marca "Marsh-McBirney, Inc. (FLO-TOTE)".	58
Figura 3.16.	Instalación del sensor en la tubería.	59
Figura 3.17.	Medidor portátil de tipo ultrasónico por tiempo en tránsito marca "CONTROLTRON, modelo Uniflow".	61
Figura 3.18.	Medidor portátil de tipo ultrasónico por tiempo en tránsito marca "BADGER" modelo "Compusonic 4500-12" y tipos de transductores.	63
Figura 3.19.	Tiempo total de viaje de S1 a S2 y viceversa.	64
Figura 4.1	Vista general del modelo empleado para la realización de las pruebas.	69
Figura 4.2	Esquema de la alimentación a la estructura.	70

Figura 4.3	Brida de unión de la derivación con la estructura y válvula de compuerta.	71
Figura 4.4	Tubería y derivación que alimentan a la estructura.	72
Figura 4.5	Vista del vertedor rectangular y canal recolector de agua	72
Figura 4.6	Vertedor triangular utilizado para aforar el gasto a través de la tubería.	73
Figura 4.7	Características geométricas del vertedor.	75
Figura 4.8	Medidor de inserción, colocado en el cople, e instrumento de monitoreo "data logger".	77
Figura 4.9	Vista inferior de los rieles de sujeción empleados en la colocación de los sensores del medidor "CONTROLOTRON"	79
Figura 4.10	Sensores del medidor "BADGER" colocados en un arreglo en "V" montados sobre sus rieles de sujeción.	81
Figura 4.11	Preparación de la tubería para la colocación de los sensores.	82
Figura 5.1	Gráfica del Error Relativo para el medidor "FLO-TOTE".	88
Figura 5.2	Carta de Control de Calidad para el medidor "FLO-TOTE".	88
Figura 5.3	Gráfica de Correlación del medidor "FLO-TOTE".	89
Figura 5.4	Gráfica del Error Relativo para el medidor "CONTROLOTRON".	91
Figura 5.5	Carta de Control de Calidad para el medidor "CONTROLOTRON".	91
Figura 5.6	Gráfica de Correlación del medidor "CONTROLOTRON".	92
Figura 5.7	Gráfica del Error Relativo para el medidor "BADGER".	94
Figura 5.8	Carta de Control de Calidad para el medidor "BADGER".	95
Figura 5.9	Gráfica de Correlación del medidor "BADGER".	95
Figura 5.10	Comparación de los resultados de la correlación entre el gasto de los medidores y el gasto aforado con ayuda del vertedor triangular.	96

Figura 5.11	Precisión esperada del medidor 'FLO-TOTE'	101
Figura 5.12	Precisión esperada del medidor 'CONTROLTRON'	102
Figura 5.13	Precisión esperada del medidor 'BADGER'	103

LISTA DE TABLAS

	PAG
TABLA 2.1. Cargas y gastos de estudio obtenidos en el vertedor.	26
TABLA 3.1. Resumen comparativo de Características.	55
TABLA 3.2. Medidores pre-seleccionados.	57
TABLA 5.1. Resultados obtenidos con el medidor "Marsh-McBirney, Inc. FLO-TOTE".	87
TABLA 5.2. Resultados obtenidos con el medidor "CONTROLOTRON, modelo Uniflow".	90
TABLA 5.3. Resultados obtenidos con el medidor "BADGER, modelo Compu Sonic 4500-12".	93
TABLA 5.4. Resumen comparativo de valores.	98
TABLA 5.5. Probabilidad de la precisión de los medidores.	100

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

La determinación instrumental o por medio de dispositivos para aforo, del valor del gasto en una tubería, ha llamado grandemente la atención del hombre debido a la relevancia de esta información en procesos de diseño e industriales; ya que una medición incorrecta puede ocasionar alteraciones en los costos o en las proporciones de un proceso.

Dicha importancia permitió el desarrollo, a través del, de diferentes técnicas para llevar a cabo estas mediciones; siendo la base de una de ellas la utilización de la diferencia de presiones, de la cual existen datos de su aplicación desde tiempos de la antigua Roma.

Posteriormente, en el siglo XVII, los italianos Benedecto Castelli y su discípulo Evangelista Torricelli introdujeron las bases teóricas para el desarrollo de la medición de la época moderna. En el siguiente siglo el matemático suizo Daniel Bernoulli estableció el principio en el cual se basan las ecuaciones de la hidráulica, empleadas éstas en la medición de la carga de presión. Fue también en esta misma época, pero seis décadas más tarde, que Giovanni Battista Venturi publicó su famoso trabajo sobre los fundamentos del tubo que lleva su nombre.

Hay una gran variedad de dispositivos que se basan en el método de la diferencia de carga. Estos sistemas incluyen a los medidores venturi, diafragmas, toberas, tubos de Pitot y tubos de Prandtl.

Además del método de la carga de presión, se han desarrollado otros mecanismos para la medición de caudales; por ejemplo, aquellos que emplean el avance o roce del agua (medidores de turbina) o los que se basan en la ley de inducción electromagnética (medidores electromagnéticos) o en las señales ultrasónicas a través del fluido (medidores ultrasónicos).

En la actualidad hay una gran variedad de dispositivos para la cuantificación de caudales. La selección de uno específico dependerá de:

- a) El grado de exactitud y/o precisión requerido para una aplicación en particular.
- b) Condiciones del lugar donde se realizarán las mediciones.
- c) Costo del equipo y facilidad para su adquisición.

Para el presente trabajo se consideraron las dos primeras y se analizaron las tecnologías existentes. Posteriormente por las ventajas que ofrecieron se seleccionaron tres medidores los cuales cumplían con los requerimientos planteados.

Con estos tres dispositivos se realizó una investigación experimental para verificar su funcionamiento. Finalmente se evaluaron los datos obtenidos con la aplicación de métodos estadísticos para concluir cual de ellos era más adecuado para las necesidades expuestas.

La información de esta investigación se organizó en seis capítulos conteniendo cada uno de ellos lo siguiente:

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

En este capítulo se da un bosquejo general del trabajo realizado.

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES.

Con base en una revisión bibliográfica se presentan los conceptos que intervienen y hacen comprender mejor la medición del gasto en tuberías a presión.

CAPÍTULO 3. TIPOS DE MEDIDORES.

Se presentan las tecnologías existentes para la medición de caudales en tuberías a presión. Se realizó así mismo la selección de tres equipos y se describió su funcionamiento.

CAPÍTULO 4. PRUEBAS DE LABORATORIO.

En este capítulo se presentan los elementos que intervinieron en la realización de las pruebas, desde la selección del sitio hasta las mediciones hechas con los medidores.

CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS.

Se presenta el trabajo estadístico realizado con los datos obtenidos con cada uno de los medidores.

CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES.

Con base en la información obtenida se determinó el medidor que reunió las características de exactitud y precisión.

CAPÍTULO 2

ANTECEDENTES

CAPÍTULO 2. ANTECEDENTES

2.1. FLUJO EN TUBERÍAS

El empleo del término *tubería* está limitado generalmente, en su aplicación, a los conductos cerrados que llevan agua *bajo presión*. Usualmente las tuberías son de sección circular, porque esta forma combina la ventaja de resistencia estructural con la simplicidad. De todas las tuberías que tienen igual área en su sección, pero diferente forma, la tubería circular tiene el perímetro más pequeño de la sección y, por consiguiente, posee el área de paredes interiores más pequeña por metro de longitud. De esto se deriva que la resistencia que la tubería circular ofrece al escurrimiento del agua, es menor que en una tubería de cualquier otra sección geométrica (Ref. 1).

2.1.1. RADIO HIDRÁULICO

El rozamiento en un conducto cerrado o abierto depende de la superficie mojada, y no solamente de la sección transversal en m²; también se toma en cuenta la forma de ésta, que hará que la superficie en contacto con el líquido sea mayor o menor.

Los tres elementos geométricos de la sección de conducción son :

- *Área hidráulica (A)* : área de la sección transversal ocupada por el líquido dentro del conducto.
- *Perímetro mojado (P)* : perímetro de la sección transversal del conducto en el que hay contacto del líquido con la pared (no se incluye la superficie libre si ésta existe).
- *Radio hidráulico (R_H)* : relación entre el área hidráulica y el perímetro mojado de la sección.

$$R_h = A/P$$

En particular en un conducto de sección circular totalmente lleno:

$$R_h = \frac{\pi D^2}{4\pi D} = \frac{D}{4}$$

2.1.2 PRESIÓN

Sobre la superficie libre de un líquido reina la presencia del aire o gas que sobre ella existe. Esta presión puede adquirir un valor cualquiera en un recipiente cerrado; pero si está abierto, se ejercerá sobre su superficie la presión atmosférica p_{alm} , debida al peso de la columna de aire que gravita sobre el fluido (Ref. 2).

La presión atmosférica varía con la temperatura y con la elevación sobre el nivel del mar. Existe también el concepto de presión absoluta (p_{abs}) cuyo valor corresponde a la presión medida con referencia al cero absoluto (vacío total).

En la medición de presiones es más común utilizar como valor cero de referencia a la atmosférica local. Cuando ocurre esto, la presión se denomina manométrica (fig. 2.2) (Ref. 3)

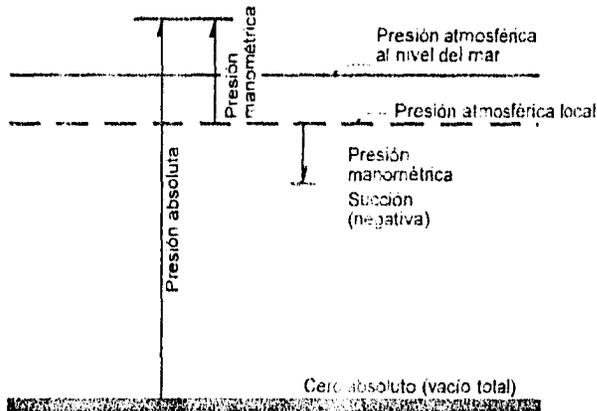


Figura 2.1 Niveles de referencia para medir la presión.

2.1.3. DISPOSITIVOS PARA LA MEDICIÓN DE LA PRESIÓN.

Los medidores de presión o manómetros presentan varias formas debido al amplio rango de presiones que abarcan y a los distintos lugares en que se les emplea. Es por esto también, que poseen un grado de precisión muy diverso.

Los manómetros pueden clasificarse de las siguientes maneras (Ref. 2):

1. - Por el tipo de presión medida

- a) Instrumentos que miden la presión atmosférica, (p_{atm}) :
 - barómetros

- b) Instrumentos que miden la presión relativa (p_g) o presión con relación a la atmósfera:
 - manómetros, miden las sobrepresiones o presiones relativas positivas
 - vacuómetros, miden las depresiones o presiones relativas negativas
- c) Instrumentos que miden la presión absoluta, (p_{abs}):
 - manómetros de presión absoluta, miden p_{abs} pequeñas.

- d) Instrumentos para medir diferencia de presiones:
 - manómetros diferenciales

- e) Instrumentos para medir presiones muy pequeñas:
 - micromanómetros

2. - Por su principio de funcionamiento

- a) Manómetros mecánicos: equilibran la fuerza originada por la presión que se quiere medir con otra fuerza, p. ej., con el peso de una columna de líquido, con un resorte o con la fuerza ejercida sobre la otra cara de un émbolo:
-

- piezómetros de líquido
- manómetros de líquido
- manómetros clásicos
- manómetros de émbolo

b) Manómetros eléctricos: la presión origina una deformación elástica, que se mide eléctricamente.

2.1.3.1. Tubo piezométrico

Es un tubo transparente de cristal o plástico, recto o con un codo, cuyo diámetro debe ser mayor a 5 mm para evitar los efectos de capilaridad debidos a la tensión superficial (Ref. 2). Este tubo (figura 2.2) por un extremo se conecta al interior de la tubería, en el punto en que se quiere medir la presión, y por el otro se tiene contacto con la atmósfera. Los tubos piezométricos sirven para conocer la presión en un líquido midiendo la altura de ascensión del mismo, en el tubo, no requiriendo el empleo de otro líquido diferente. La altura h de la columna piezométrica, multiplicada por el peso específico del líquido, contenido en la tubería, determina la presión en la misma para el punto de contacto con el piezómetro.

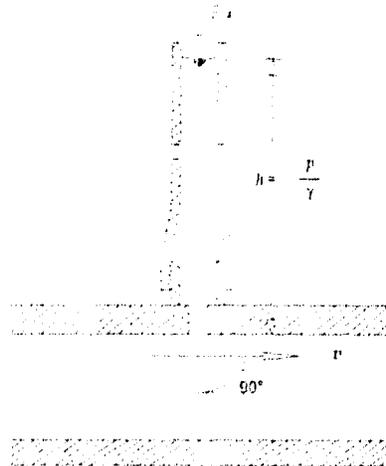


Figura 2.2. Piezómetro

2.1.3.2. Manómetro en "U" de líquido para presiones relativas

Consiste en un tubo transparente en forma de U, parcialmente lleno de un líquido más denso del que se va conocer su presión. Uno de sus extremos se conecta de manera perpendicular a la pared que confina el flujo del recipiente que lo contiene, el otro extremo queda en contacto con la presión atmosférica (figura 2.3). La diferencia de niveles de la columna del líquido en el manómetro indica la diferencia de las cargas de presión ejercidas sobre los extremos de la misma.

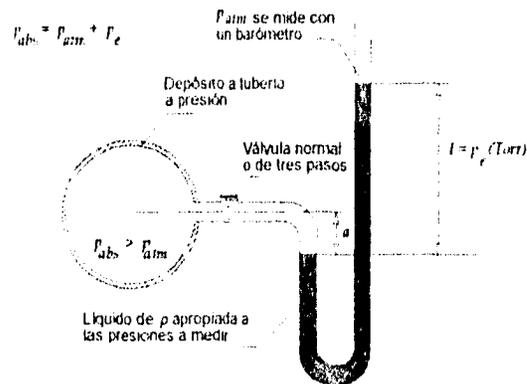


Figura 2.3 . Manómetro en "U" de líquido para presiones relativas

Este dispositivo mide presiones relativas positivas (sobrepresiones) o negativas (depresiones).

2.1.3.3. Manómetro diferencial

Su funcionamiento es parecido al manómetro en "U", con la diferencia de que en este manómetro diferencial ambos extremos están colocados en puntos diferentes de la tubería, sin tener contacto con la atmósfera, por lo que la información que proporciona es la diferencia de presión existente entre dichos puntos (figura 2.4).

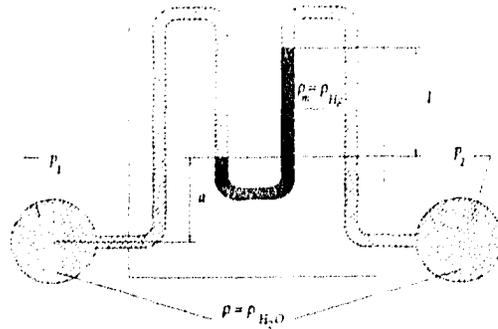


Figura 2.4. Manómetro diferencial

2.1.4. ECUACIÓN DE LA ENERGÍA

Si no son incluidos los efectos termodinámicos en el flujo ni la adición o extracción de energía mecánica desde el exterior (bomba o turbina), es posible derivar las ecuaciones de movimiento, aplicables al flujo de líquidos, a partir de la segunda ley de Newton. Para ello es necesario tomar en cuenta las fuerzas que se oponen al movimiento, las cuales desarrollan un trabajo mecánico equivalente a la energía disipada al vencer dichas fuerzas (Ref.3).

Considerando además que en régimen permanente la trayectoria de una partícula de un fluido coincide con una línea de corriente y como esta partícula no recibe energía de fuera, en el tránsito de un punto ① a otro punto ② de una línea de corriente (fig. 2.6), la energía podrá transformarse de una clase a otra, pero según el principio de conservación de la energía la suma total de la energía que posee la partícula debe de permanecer constante (Ref. 2).

Por tanto la ecuación, expresada en cargas, de la energía para dos puntos de una vena líquida es:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \sum_1^2 h_r \quad 2.1$$

Donde:

- z : energía potencial o carga de posición
- $\frac{P}{\rho g}$: energía de presión o carga de presión
- $\frac{v^2}{2g}$: energía de velocidad o carga de velocidad
- $\sum_1^2 h_f$: pérdida de carga o energía no utilizable

2.1.4.1. Energía potencial

Esta energía también llamada *energía de posición* es igual al trabajo que la fuerza de la gravedad puede ejercer cuando su altura desciende de un punto z_j a otro z_i . Cuando el líquido es llevado, con una bomba p. ej., del nivel inferior al superior, se requiere ejercer sobre él un trabajo contra la fuerza de la gravedad igual y de sentido contrario, el cual se transforma en dicha energía potencial. Las alturas están referidas a un plano horizontal de referencia, $z=0$. Como la fuerza de la gravedad es igual al peso del fluido $W=\rho g V$, se tiene:

Energía potencial total:

$$E_z = \rho g V z \tag{2.2}$$

Energía específica:

$$e_z = \frac{\rho g V z}{\rho V} = g z \tag{2.3}$$

2.1.4.2. Energía de presión

Supóngase que en un cilindro (figura 2.5) conteniendo aceite a una presión constante p , desplaza a un émbolo de superficie A venciendo la resistencia F , y desplazándolo una distancia x .

El trabajo realizado por el fluido es:

$$T = pAx = pV$$

donde $V = Ax$ es el volumen barrido por el pistón.

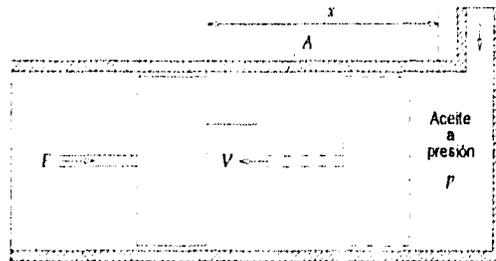


Figura 2.5. Desplazamiento de un émbolo en un cilindro con aceite

Dicho trabajo se realiza a causa de la energía de presión que un volumen V de aceite, con presión p posee dentro del tanque de aceite antes del desplazamiento del émbolo.

Por tanto, un volumen V de aceite, con presión p posee la energía de presión pV , que será igual a (Ref. 2):

$$E_p = pV = \frac{p\rho V}{\rho} = p \frac{m}{\rho}$$

La energía de presión total es, entonces:

$$E_p = \frac{p}{\rho} m \quad 2.4$$

La energía de presión específica es:

$$e_p = \frac{p}{\rho} \quad 2.5$$

2.1.4.3. Energía cinética

La energía cinética total de m kg de fluido es:

$$E_v = m \frac{v^2}{2}$$

donde m es la masa total del fluido.

La energía cinética específica será (Ref. 2):

$$e_v = \frac{v^2}{2} \tag{2.6}$$

En las ecuaciones anteriores, las unidades en que está expresada la energía específica $[e]$ son: $\left[\frac{m^2}{s^2} \right]$.

Ahora bien, si se divide dimensionalmente $[e]$ por la aceleración de la gravedad, $[g] = [L][T]^{-2}$ que es una constante, se obtiene:

$$\frac{[e]}{[g]} = \frac{[L]^2 [T]^{-2}}{[L][T]^{-2}} = L \tag{2.7}$$

Si se dividen las energías específicas por g , se obtiene su valor correspondiente en cargas.

El término $\sum_1^2 h_f$, es referido a la presencia de la viscosidad, lo que origina un rozamiento tanto del fluido con el contorno (tubería), como de sus partículas entre si. Por lo que, además de las tres clases de energía mencionadas, se toma en cuenta la energía de fricción, que por las teorías de la Termodinámica, sólo provoca una variación del estado térmico del fluido (Ref. 2).

Pero al ser el agua un fluido incompresible (los cambios de densidad de un punto a otro son despreciables), esta fricción no es aprovechable y es llamada *pérdida de energía*, o bien expresada en forma de altura, *altura perdida* h_r , (figura 2.6).

Si se considera:

$$H = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{v^2}{2g} \quad 2.8$$

que representa la energía por unidad de peso que tiene el líquido en una determinada sección, la cual es medida desde el plano horizontal de referencia, la ec. 2.1 se simplifica:

$$H_1 = H_2 + \sum_1^2 h_r \quad 2.9$$

La cual expresa que: la energía en el punto ① (suma de energía de posición, de presión y cinética) = energía en el punto ② (suma de energía de posición, presión y cinética) + la energía perdida por el rozamiento entre ① y ② $\left(\sum_1^2 h_r \right)$.

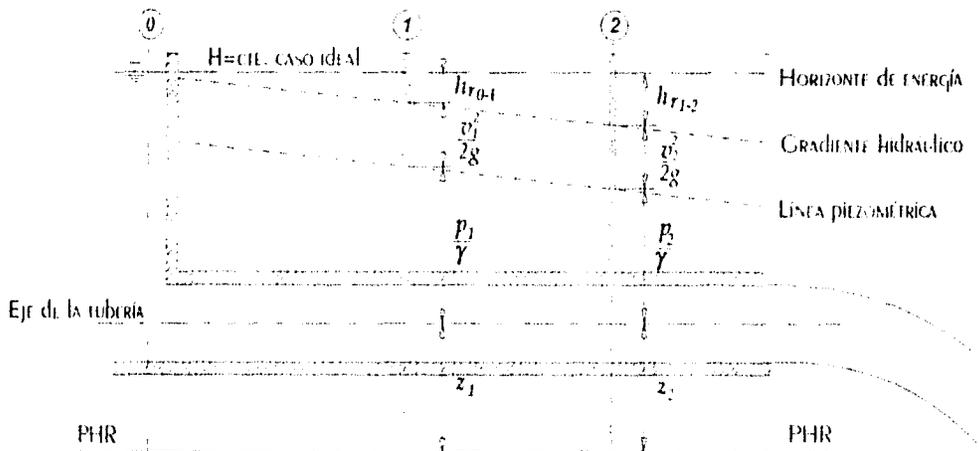


Figura 2.6. Representación gráfica de la Ecuación de la Energía

2.1.5. CLASIFICACIÓN DE FLUJOS

El estudio del movimiento de un fluido en el interior de un contorno (tubería, canal) es muy importante.

Para ello es necesario distinguir los distintos regímenes que pueden presentarse en dicho movimiento. Una primera clasificación se establece al observar *macroscópicamente* al flujo y es como sigue:

2.1.5.1. Flujo permanente y corriente variable

Permanente: si en cualquier punto del espacio por donde circula el fluido no varían con el tiempo las características de éste (aunque varíen de un punto a otro), en particular su velocidad y su presión.

No permanente: si las características en un punto determinado varían de un instante a otro.

El flujo permanente es más sencillo de estudiar que el no permanente, por la complejidad que representa el hacer intervenir al tiempo como variable independiente. Sin embargo, en la práctica el flujo permanente es la excepción más que la regla. A pesar de ello, muchos problemas se pueden analizar suponiendo que el flujo es permanente, aun cuando existan pequeñas fluctuaciones de velocidad o de otras características con el tiempo, siempre que el valor medio de cualquier característica permanezca constante en un intervalo razonable.

2.1.5.2. Flujo uniforme y no uniforme

Uniforme: si en cualquier sección transversal a la corriente, la velocidad en puntos homólogos es igual en magnitud y dirección, aunque dentro de una misma sección transversal varíe de un punto a otro.

No uniforme: cuando los cambios en el vector velocidad se presentan en la dirección del flujo o en direcciones transversales.

Este último tipo de *no uniformidad* siempre se encuentra cerca de fronteras sólidas por efecto de la viscosidad; sin embargo, en hidráulica suele aceptarse la uniformidad o no uniformidad del flujo cuando se refiere a la variación de la velocidad media en la dirección general del movimiento (Ref. 3).

El que un flujo sea permanente no implica sea uniforme; pueden así ocurrir las cuatro diferentes combinaciones (idem) .

Al estudiar al flujo *microscópicamente* la clasificación es en *laminar y turbulento*. Esta clasificación es un resultado propiamente de la viscosidad (medida de su resistencia a fluir) del fluido; y no habría distinción entre ambos en ausencia de la misma (Ref. 3).

2.1.5.3. Flujo laminar

El movimiento en este régimen se caracteriza porque el desplazamiento de las partículas es ordenado, estratificado, el fluido se mueve como clasificado en capas que no se mezclan entre sí (figura 2.7) .



Figura 2.7 . Esquema del flujo laminar

2.1.5.4. Flujo turbulento

Las partículas se mueven sobre trayectorias completamente erráticas, sin seguir un orden establecido (figura 2.8). Existen pequeñas componentes de la velocidad en direcciones transversales a la del movimiento general, las cuales no son constantes sino que fluctúan con el tiempo. Dichas componentes originan un mezclado intenso de las partículas que consume parte de la energía del movimiento por efecto de la fricción interna.

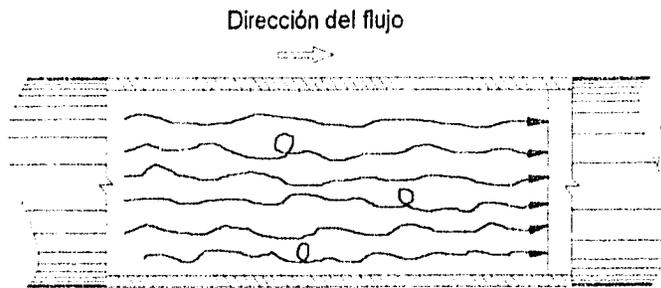


Figura 2.8 . Esquema del flujo turbulento

La distribución de velocidades en régimen laminar en una tubería de sección circular es parabólica (figura 2.9).

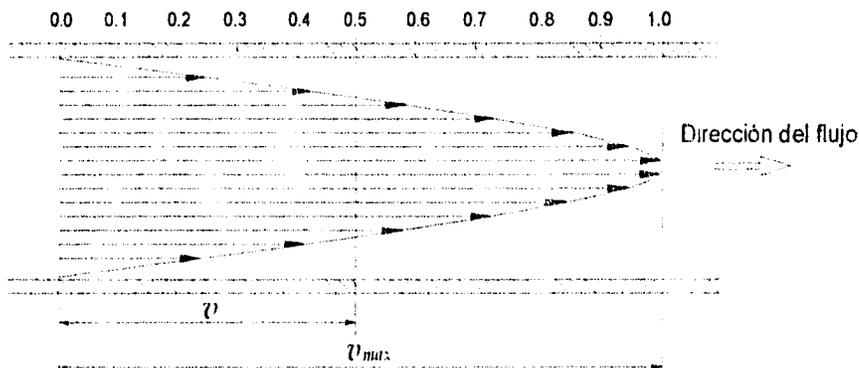


Figura 2.9. Distribución parabólica de velocidades en régimen laminar

De la figura 2.9 se observa que la velocidad de desplazamiento del fluido presenta valores decrecientes desde el eje (velocidad máxima) hasta la pared de la tubería (velocidad cero).

La ecuación de la parábola que describe su comportamiento es:

$$v = \frac{\gamma S_f}{4\mu}(R^2 - r^2) \quad 2.10$$

Donde:

- S_f = pendiente local del gradiente de fricción
- μ = viscosidad
- R = Radio de la tubería
- r = radio del tubo o elemento

La deducción de esta ecuación surge del análisis del equilibrio de las fuerzas que actúan sobre un elemento, considerado en el fluido, de forma cilíndrica, con radio r (desde el eje del conducto) y longitud ds (figura 2.10).

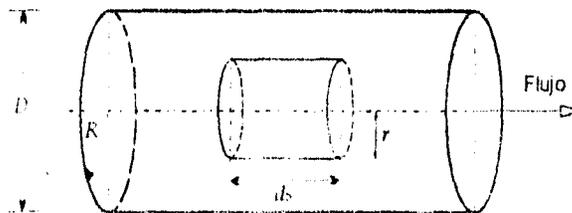


Figura 2.10. Esquema del elemento cilíndrico considerado en el fluido

2.1.6. NÚMERO DE REYNOLDS

Al estudiar la diferencia entre el régimen laminar y turbulento aparece un parámetro muy importante conocido como el Número de Reynolds.

Osborne Reynolds, físico inglés de finales del siglo XIX, realizó una serie de experimentos con un aparato cuyo esquema aparece en la figura 2.11.

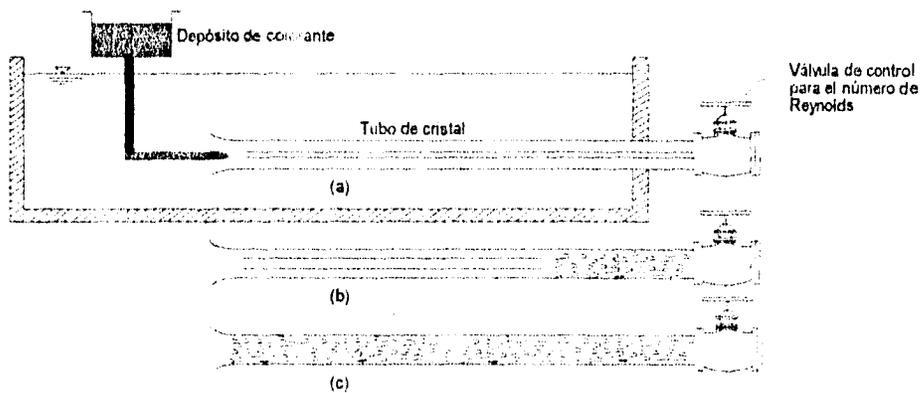


Figura 2.11. Experimento de Reynolds

Como se observa en la figura, éste consiste de un tubo abocinado terminado en una válvula. En el tubo entra agua desde un recipiente en reposo a una velocidad controlada por dicha válvula. El depósito contiene un colorante fuerte, p. ej.: anilina, que se inyecta a la entrada del tubo de vidrio por un tubo pequeño terminado en una boquilla. El número de Reynolds en la corriente del tubo es (Ref. 2):

$$Re = \frac{VD}{\nu} \tag{2.11}$$

Donde:

- V = velocidad media
- D = diámetro del conducto
- ν = viscosidad cinemática del fluido

Aumenta de una continua al abrir la válvula; en efecto, al abrir se incrementa el caudal y con él V , y por lo tanto Re .

Si se abre poco a poco la válvula, se observa lo siguiente:

- Al principio el hilo de corriente visible por el colorante es prácticamente una línea recta: *corriente laminar* (fig. 2.11 a).
- Después, con la válvula suficientemente abierta se empiezan a formar remolinos aguas abajo junto a la válvula, mezclándose allí el colorante con el agua: *comienzo de turbulencia* (fig. 2.11 b).
- Finalmente los remolinos se propagan por todo el tubo, intensificándose la mezcla del colorante y quedando todo el tubo coloreado: *corriente turbulenta* (fig. 2.11 c).

Con este experimento Reynolds encontró que en un tubo el flujo laminar se vuelve inestable cuando Re ha rebasado un valor crítico, para tornarse después en turbulento. Con base en diferentes investigaciones el número crítico de Reynolds adquiere valores muy distintos que van desde 2 000 hasta 40 000. De ello se deduce que dicho valor depende en mucho de los disturbios iniciales y define además un cierto límite, abajo del cual éstos se amortiguan, estabilizando al flujo laminar (Ref. 3):

Es interesante observar que, tanto el flujo laminar como el turbulento, resultan propiamente de la viscosidad del fluido por lo que, en ausencia de la misma, no habría distinción entre ambos.

2.2. DISPOSITIVO DE AFORO. VERTEDOR TRIANGULAR DE PARED DELGADA

2.2.1. GENERALIDADES

Si la descarga de un líquido se efectúa por encima de un muro o placa, a superficie libre, la estructura hidráulica en la que ocurre se denomina vertedor; éste presenta diferentes formas según su uso. Así, cuando la descarga se efectúa sobre una placa con perfil de cualquier forma, pero con arista aguda, el vertedor se llama de pared delgada; por el contrario, en el caso en que el contacto entre la pared y la lámina vertiente es toda una superficie, el vertedor es de pared gruesa. Ambos son utilizados como dispositivos de aforo en laboratorio o en canales de pequeñas dimensiones, pero el segundo puede emplearse como obra de control o de excedencias en una presa y también de aforo en canales de dimensiones mayores.

2.2.2. ECUACIÓN DE GASTO

La ecuación general del gasto para un vertedor de pared delgada es :

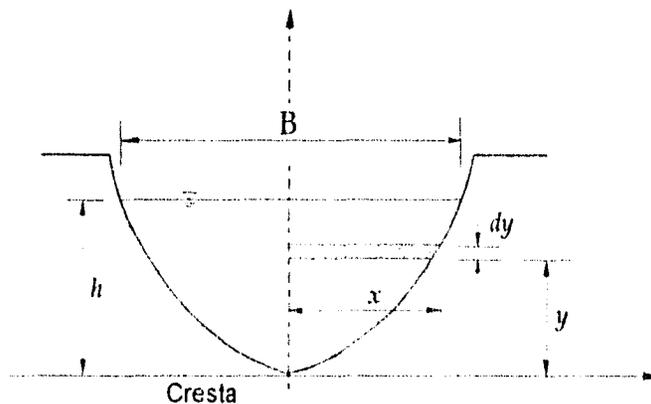


Figura 2.12 . Geometría de la sección de un vertedor de pared delgada

$$Q = 2\sqrt{2g\mu} \int_0^h x(h-y)^1 dy \quad 2.12$$

La cual es posible integrar si se conoce la forma del vertedor.

En la deducción de la ecuación se han considerado hipótesis únicamente aproximadas, como la omisión de la pérdida de energía que se considera incluida en el coeficiente μ (Ref. 3).

Para la realización de la pruebas se utilizó un vertedor con geometría triangular, quedando la ecuación de la siguiente forma:

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) \mu h^{\frac{5}{2}} \quad 2.13$$

Donde:

Q - Gasto que circula por el modelo, $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

g - Constante de la aceleración de la gravedad, $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

θ - Ángulo del vertedor

μ - Coeficiente de descarga, $[\circ]$

h - Carga hidráulica sobre el vertedor, $[m]$

o bien

$$Q = Ch^{\frac{5}{2}} \quad 2.14$$

donde C depende de θ , μ y g . Existen diferentes fórmulas experimentales para el cálculo de μ o C , las cuales son válidas para diferentes ángulos θ del vértice (Ref. 3).

El criterio utilizado para el cálculo del gasto fue el sugerido por la Universidad Católica de Chile, el cual adiciona en la fórmula un valor k , que es un coeficiente de descarga adimensional (idem).

Para obtener los valores de dichos coeficientes se emplearon las gráficas de las figuras 2.13 y 2.14, respectivamente (Ref. 3).

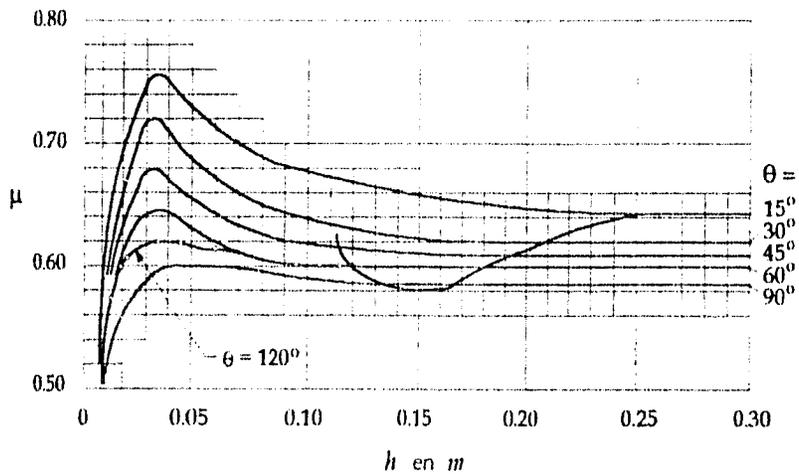


Figura 2.13. Coeficiente de gasto μ de vertedores triangulares en la fórmula de la Universidad Católica de Chile.

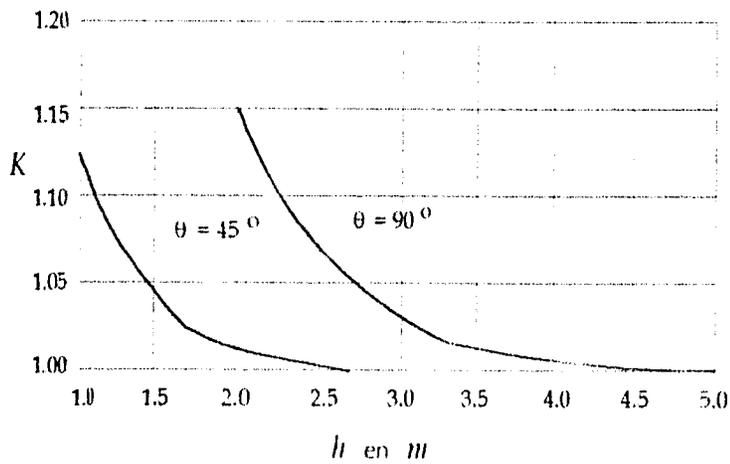


Figura 2.14. Valores de K en la fórmula de la Universidad Católica de Chile para vertedores triangulares.

Los vertedores triangulares se recomiendan para el aforo de gastos inferiores a 30 l/s y cargas superiores 6 cm. Su precisión es mejor que la del rectangular, para gastos pequeños, e incluso para gastos comprendidos entre 40 y 300 l/s. Para gastos mayores es recomendable el rectangular debido a que el triangular es más sensible a cualquier cambio en la rugosidad de la placa y, también, porque requiere mayor exactitud en la medición de las cargas (Ref. 3)

2.2.3. CARACTERÍSTICAS DEL VERTEDOR UTILIZADO

Las características geométricas del vertedor y el valor correspondiente a la carga hidráulica se muestran en la figura 2.15.

Cuando el nivel del agua dentro del tanque estabilizador coincide con el del vértice del vertedor, se establece el nivel de referencia cero también llamado tara del vertedor. Tomando como referencia este nivel y una vez establecido el gasto dentro del modelo se obtiene el valor de la carga sobre el vertedor para posteriormente calcular el gasto.

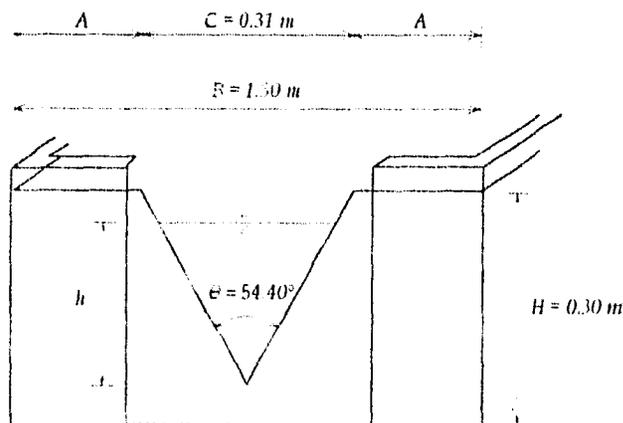


Figura 2.15. Características geométricas del vertedor utilizado

En la figura 2.16 se puede observar la curva de descarga del vertedor, construida en base a los datos mostrados en la siguiente tabla:

TABLA 2.1. CARGAS Y GASTOS DE ESTUDIO OBTENIDOS EN EL VERTEDOR

h [cm]	H/h [-]	μ [-]	K [-]	Q [l/s]
0	0.00	-	-	0.00
2	90.0	0.619	1	0.06
4	45.0	0.661	1	0.28
6	30.0	0.639	1	0.38
8	22.5	0.620	1	1.08
10	18.0	0.618	1	2.11
12	15.0	0.616	1	3.51
14	12.9	0.612	1	5.28
16	11.3	0.610	1	7.48
18	10.0	0.610	1	10.15
20	9.0	0.609	1	13.29
22	8.2	0.608	1	16.94
24	7.5	0.608	1	21.10
26	6.9	0.608	1	25.85
28	6.4	0.608	1	31.18
30	6.0	0.608	1	37.11
32	5.6	0.608	1	43.67
34	5.3	0.608	1	50.87
36	5.0	0.608	1	58.73
38	4.7	0.608	1	67.27
40	4.5	0.608	1	76.53

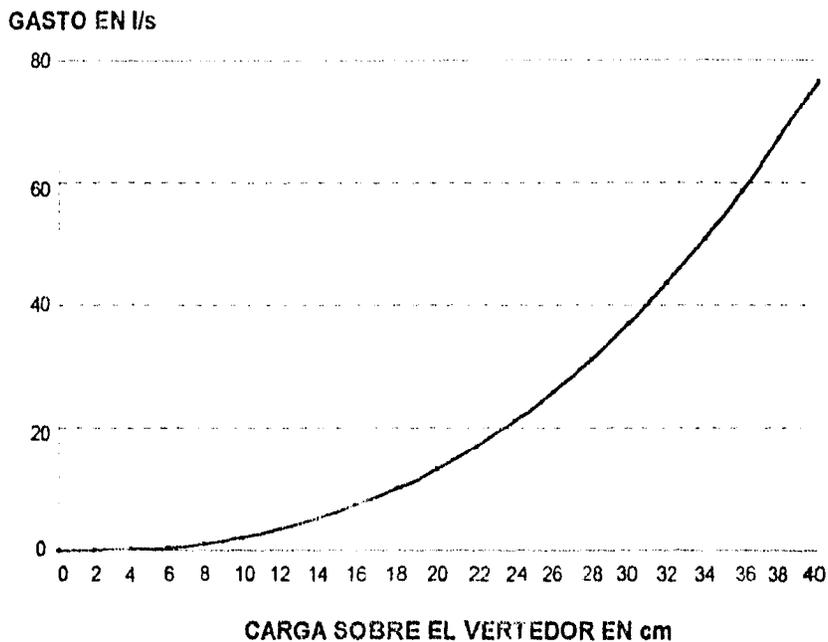


Figura 2.16. Curva de descarga del vertedor utilizado para el aforo del gasto

Al analizar los datos de la tabla 2.1, se observa que con las características geométricas del vertedor pueden obtenerse valores de los coeficientes de descarga para una carga de hasta 2 cm, esto significa que sería posible aforar un gasto aproximado de 0.04 l/s.

2.3. CONCEPTOS BÁSICOS

2.3.1. EFECTO DOPPLER

La frecuencia de una onda, desde el punto de vista del observador, aumenta cuando la fuente se le acerca y también aumenta cuando el observador se aproxima a la fuente. Siempre que hay un movimiento relativo entre una fuente de ondas y un receptor, hay un cambio en la frecuencia observada de la onda. La frecuencia aumenta cuando la fuente y el receptor se aproximan y disminuye

cuando se alejan. El corrimiento de la frecuencia de una onda, debido al movimiento relativo entre la fuente y el receptor, se llama *efecto Doppler*. La cantidad de aumento o disminución es, (Ref. 4):

$$f = 2f_0 \frac{v}{C} \qquad 2.16$$

Donde:

- f_0 = frecuencia original,
- v = amplitud del movimiento,
- C = velocidad del sonido en el medio.

El efecto Doppler se puede usar como medio para indicar la presencia de ondas ultrasonoras observando la variación de la frecuencia cuando una fuente ultrasónica se aproxima a una superficie reflectante o viceversa. Una variación de este tipo se puede presentar en forma de indicación audible o ultrasónica (Ref. 4).

2.3.2. TRANSDUCTORES

El transductor es un instrumento que transforma energía de una clase a otra, la cual guarda una relación conocida con la primera, a fin de poderla medir más fácilmente, o procesarla o transmitirla a distancia (Ref. 5).

Por ejemplo, cuando una señal sonora es convertida en una señal eléctrica existe, por supuesto, un cambio de una energía a otra, pero esto no es todo: una señal es una *figura de variaciones* de algo, como movimiento, magnetismo, brillo luminoso, corriente eléctrica o diferencia de potencial. Cuando tiene lugar el cambio de energía, la *figura* de las variaciones debe conservarse, por que en caso contrario, habrá distorsión. Si la forma de las variaciones no cambia, se dice que la *señal* es la misma, no importa que la figura sea de corriente eléctrica, magnetismo, sonido o alguna otra forma de energía.

El auricular de un teléfono es un ejemplo de un transductor que transforma la energía eléctrica a energía sonora.

CAPÍTULO 3

TIPOS DE MEDIDORES

CAPÍTULO 3. TIPOS DE MEDIDORES

3.1. DISPOSITIVOS MÁS COMUNES EN LA MEDICIÓN DE GASTO EN TUBERÍAS A PRESIÓN.

A continuación se hace una breve descripción de los dispositivos que con mayor frecuencia han sido empleados para la medición del caudal en tuberías a presión; en algunos casos se proporciona información sobre sus orígenes. Se menciona además, su principio de funcionamiento y la relación que guarda éste con las características del flujo dentro de la tubería.

Se complementa dicha información con las ventajas y desventajas técnicas que posee cada uno de los medidores. Estos datos sirvieron para realizar una selección preliminar de aquellos que se adaptarían más fácilmente a las condiciones cambiantes de los diferentes lugares en que se pretenda efectuar el aforo de un gasto.

3.1.1. MEDIDOR VENTURI

En 1797 el físico italiano Giovanni Battista Venturi presentó su trabajo sobre el tubo que lleva su nombre; sin embargo, fue hasta 1887 que el ingeniero norteamericano Clemens Herschel utilizó estas investigaciones para fabricar el primer tubo venturi comercial (Ref. 6). Este dispositivo es muy simple en su forma y detalles; consta de dos secciones cónicas convergentes de tubo, unidas por una sección corta cilíndrica. El medidor debe insertarse en la tubería cuyo gasto vaya aforarse.

Su funcionamiento consiste en producir un estrangulamiento de la sección transversal de la tubería, con lo que se logra un cambio en las presiones de una sección a otra. Con la medición de este cambio es posible conocer el gasto que circula por la sección

En la figura 3.1 se muestra el corte longitudinal de un venturi. En la deducción de la fórmula se desprecian las pérdidas de energía además de emplear la velocidad media dentro de la tubería, por lo que los coeficientes α son iguales a uno (Ref. 3).

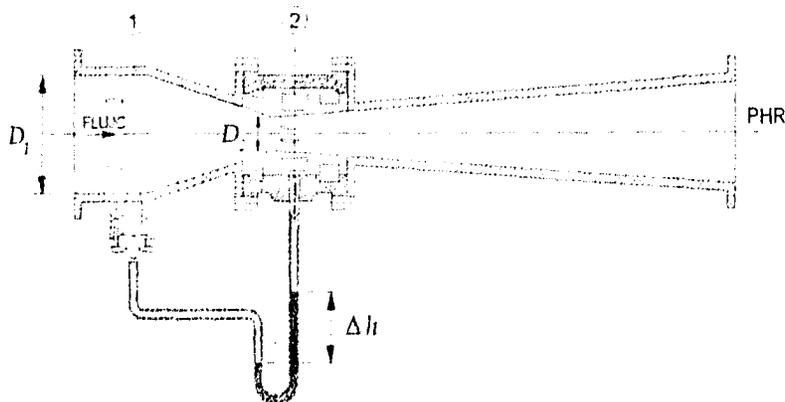


Figura 3.1. Venturi conectado a manómetro diferencial

Con z_1 y z_2 como cargas de posición de las secciones ① y ②, respecto de un plano de referencia cualquiera, la ecuación de Bernoulli resulta ser:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} \quad 3.1$$

Por otra parte, de la ecuación de continuidad se tiene que

$$V_1 = \frac{V_2 A_2}{A_1} \quad 3.2$$

Con $h = \left(z_1 + \frac{p_1}{\gamma} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\gamma} \right)$; sustituyendo la ec. 3.2 se obtiene:

$$V_2 = \frac{\sqrt{2gh}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}}$$

y en términos de la deflexión en el manómetro de mercurio, el gasto es:

$$Q = \frac{C_v A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{2gh} = \frac{C_v A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \times \sqrt{2g\Delta h \left(\frac{\gamma_m}{\gamma} - 1\right)} \quad 3.3$$

La ec. 3.3 se afecta por el coeficiente C_v para corregir los errores debidos a la no inclusión de la pérdida de carga y a considerar que $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$.

Definiendo además, un coeficiente de caudal C_d que engloba al coeficiente C_v :

$$C_d = \frac{C_v}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} = \frac{C_v}{\sqrt{1 - m^2}} \quad 3.4$$

donde $m = \frac{A_2}{A_1}$ es el grado de estrangulamiento, se obtiene finalmente:

$$Q = C_d A_2 \sqrt{2g\Delta h \left(\frac{\gamma_m}{\gamma} - 1\right)} \quad 3.5$$

Los valores de C_v (ec. 3.3) y C_d (ec. 3.5) no son constantes (Ref. 2) sino que dependen del número de Reynolds:

$$Re = \frac{V_2 D_2}{\nu}$$

donde D_2 es el diámetro de la sección estrangulada, V_2 la velocidad media en la misma, y ν la viscosidad cinemática del líquido.

Con base en investigaciones sistemáticas se establecieron normas para su construcción, evitando un tarado previo del venturi; pudiéndose tomar los valores de C_d como estándar. En la figura 3.2 se muestran las gráficas donde se obtienen sus valores (Ref. 2).

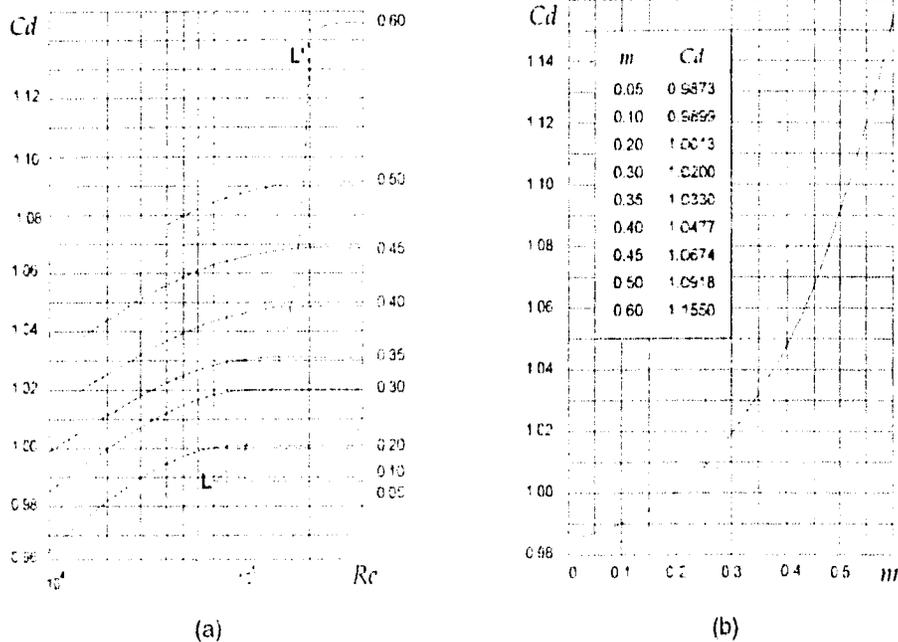


Figura 3.2. (a) Coeficiente C_d en función del número de Reynolds, para un Venturi. (b) Coeficiente C_d en función del grado de estrangulamiento para un Venturi (Ec. 3.5)

Ventajas de este medidor:

- Su vida útil promedio es de 30 años, aunque puede superar los 50 dependiendo de los materiales empleados en su construcción.
- Simple en su construcción, sin incluir partes móviles.
- No presenta cambios repentinos de presión al paso del flujo.
- El ensanchamiento gradual después de la sección contracta ocasiona que no se tengan grandes pérdidas de presión

- Debido a su constante aplicación, este medidor ha sido ampliamente estudiado, teniéndose a la fecha bastante información para su construcción
- Su funcionamiento es mecánico.

Desventajas que posee:

- Al ser un medidor de grandes dimensiones ocasiona que sea difícil su colocación en lugares donde se disponga de una longitud pequeña de tubería.
- Se requiere una expresión matemática, que esta en función de la diferencial de presión, para conocer el gasto en la tubería.
- En dicha expresión, la presión diferencial no varía de forma lineal con respecto al rango de flujo sino que, se requiere extraer la raíz cuadrada.

3.1.2. DIAFRAGMA

Un diafragma es una placa de metal, bronce, acero inoxidable, etc. que lleva un orificio circular de diámetro d concéntrico con el eje de la tubería de diámetro D , donde se inserta según la sección deseada. Su diseño es relativamente simple, siendo sencilla su construcción. Generalmente es bajo en costo y fácil de instalar. Es posible utilizarlo solamente en aquellas tuberías donde se permita una gran pérdida de energía

La modificación en las velocidades ocasiona un cambio de presiones antes y después del diafragma cuyo valor permite determinar el gasto. En la figura 3.3 se presenta un corte transversal de un diafragma mostrando las secciones ① y ② donde se hacen las tomas piezométricas para conectarlas a un manómetro diferencial (como en la fig 3.1). En el esquema se han dibujado también las líneas de corriente.

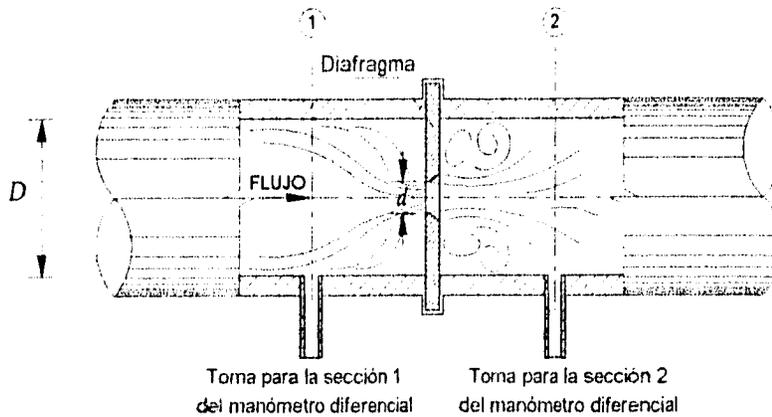


Figura 3.3. Croquis de la instalación de un diafragma

La fórmula para calcular el caudal es la misma que para el Venturi (Ref. 2):

$$Q = C_d A_o \sqrt{2g\Delta h \left(\frac{Z_2}{\gamma} - 1 \right)} \quad 3.6$$

El coeficiente C_d se obtiene de manera experimental, mediante el *tarado del diafragma*; depende no sólo de las características geométricas del dispositivo y de la rugosidad de las paredes, sino también del número de Reynolds que incluye el efecto de la viscosidad (Ref. 3).

De manera similar que con un venturi, el diafragma puede construirse bajo normas establecidas. Para este caso los valores del coeficiente C_d pueden tomarse de la gráfica mostrada en la figura 3.4.

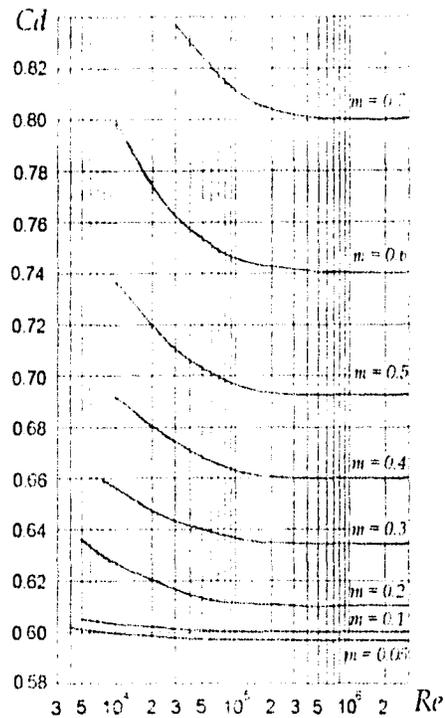


Figura 3.4. Coeficientes de gasto (C_d) para diafragmas estándar o normalizados, en función del número de Reynolds.

Ventajas del medidor:

- De los equipos descritos, es el que presenta el menor costo de adquisición y construcción.
- Su fabricación es muy económica, aún para grandes diámetros.
- Es fácil de instalar y de reemplazar.
- No posee partes móviles.
- Su funcionamiento es mecánico.

Desventajas que posee:

- Debido a la gran pérdida de presión pueden presentarse problemas en el suministro aguas abajo.

- Se requiere una expresión matemática, que esta en función de la diferencial de presión , para conocer el gasto en la tubería.
- En dicha expresión, la presión diferencial no varía de forma lineal con respecto al rango de flujo sino que, se requiere extraer la raíz cuadrada.

3.1.3. TOBERA

Las primeras noticias sobre el uso comercial de las toberas datan de documentos de mediados del siglo XIX. Y fue en 1934 que la ASME¹ inició un extenso programa de investigación sobre los coeficientes para este dispositivo (Ref. 6).

Las toberas en general son conductos convergentes en la dirección del flujo (fig. 3.5) que producen un aumento de velocidad y una disminución de la presión. Se utilizan en el caso de tuberías con diámetros mayores a 30 cm (Ref. 3).

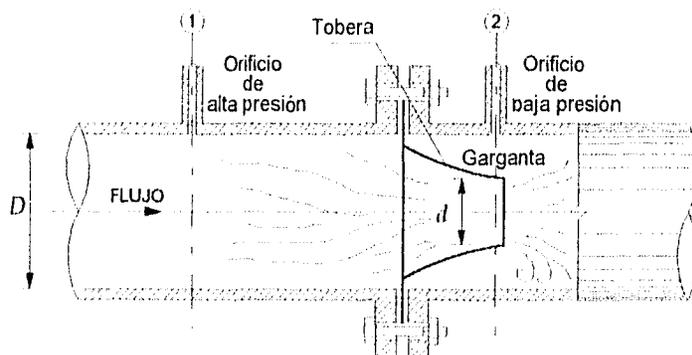


Figura 3.5. Tobera intercalada entre bridas en una tubería

La fórmula para calcular el gasto es la siguiente (Ref. 3)

$$Q = CdA_2 \sqrt{2g\Delta h \left(\frac{\gamma_m}{\gamma} - 1 \right)} \quad 3.7$$

¹ American Society of Mechanical Engineers (ASME).

Un *tarado de la tobera* será también aquí necesario para determinar C_d si no está construida según normas. En las *toberas estándar* o normalizadas se pueden emplear los valores de la figura 3.6.

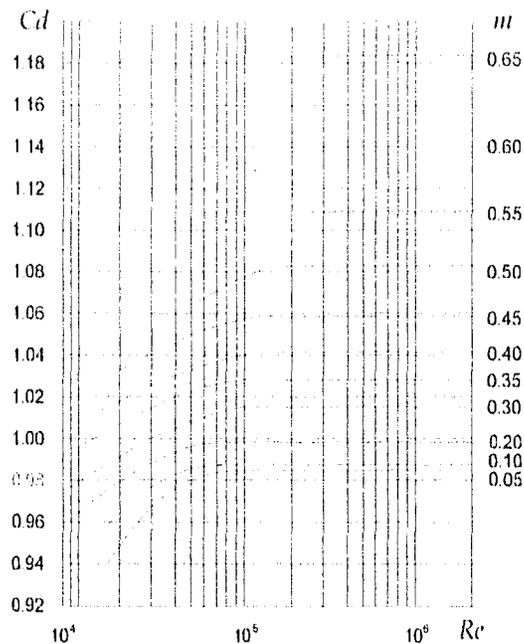


Figura 3.6. Coeficientes de gasto (C_d) para una tobera estándar o normalizada, en función del número de Reynolds

Ventajas de este medidor:

- Presenta una menor pérdida de presión con respecto al venturi y el diafragma.
- No tiene partes móviles.
- Dependiendo del material con que se construya, puede presentar una gran vida útil.
- Posee una simplicidad en su diseño e instalación.
- Su funcionamiento es mecánico.

Desventajas que posee:

- Gran sensibilidad a la distorsiones ocasionadas por las variaciones en el perfil de velocidades.
- Es afectado su funcionamiento por la vibración en la tubería y por la presencia de burbujas de aire en el agua.
- Puede ser instalado en un rango limitado de diámetros de tubería.
- Se requiere una expresión matemática, que esta en función de la diferencial de presión, para conocer el gasto en la tubería.
- En dicha expresión, la presión diferencial no varía de forma lineal con respecto al rango de flujo sino que, se requiere extraer la raíz cuadrada.

3.1.4. TUBO DE PITOT

El tubo de Pitot fue diseñado y utilizado por el ingeniero francés Henri Pitot en 1730, para realizar experimentos en el río Sena. Consiste en un tubo doblado, como el mostrado en la figura 3.7, que permite medir la presión total (suma de la presión estática y de la presión dinámica), también llamada de estancamiento. Justo en la embocadura del tubo se forma un punto de estancamiento o remanso: la velocidad se reduce a cero en ese punto y la presión se obtiene a partir de la ecuación de Bernoulli como:

$$z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}$$

Con $z_1 = z_2$ por el plano horizontal de referencia

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g}$$

Como en el punto (2) se presenta una velocidad de estancamiento $v_2 = 0$ se tiene

$$\frac{p_2}{\gamma} = \frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} \quad 3.8$$

De la figura 3.7 se puede observar que existe un equilibrio entre las secciones ①, ② y ③ por lo que,

$$\frac{p_2}{\gamma} = \gamma h$$

simplificando

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \gamma h \quad 3.9$$

Esto significa que si se conoce la presión estática en el punto ①, es posible obtener la velocidad del flujo.

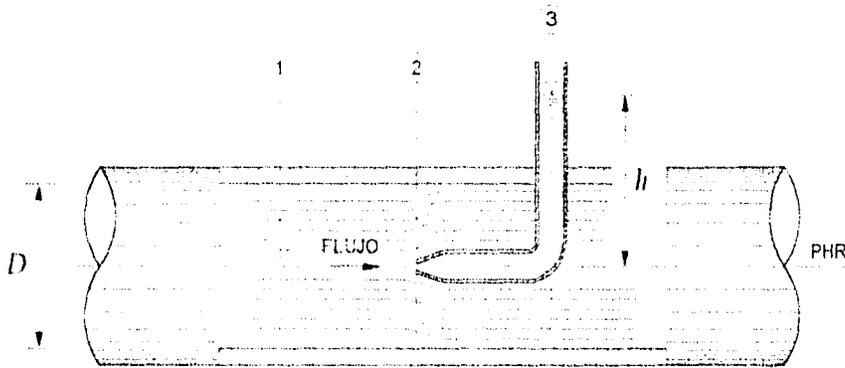


Figura 3.7. Tubo de Pitot y líneas de corriente alrededor del mismo.

Ventajas del medidor:

- Su permanencia se limita al periodo de medición del gasto.
- Por su diseño, produce pocas pérdidas de presión en la tubería.
- Es fácil de instalar, requiriendo solamente la colocación de una terminal de inserción en la tubería.
- Su funcionamiento es mecánico.

Desventajas que posee:

- Cualquier fuga en el medidor o en la conexión de inserción a la tubería, repercute en la exactitud del aparato.
- La variación en el perfil de velocidades afecta a su funcionamiento.
- Se requiere una expresión matemática, que esta en función de la diferencial de presión, para conocer el gasto en la tubería.
- En dicha expresión, la presión diferencial no varía de forma lineal con respecto al rango de flujo sino que, se requiere extraer la raíz cuadrada.

3.1.5. TUBO DE PRANDTL

Fue idea de Prandtl combinar en un solo instrumento un tubo de Pitot y un tubo piezométrico. El tubo de Pitot mide la presión total, el piezométrico la presión estática y el tubo de Prandtl la diferencia de las dos, que es la presión dinámica (Ref. 2)

En la figura 3.8 se muestra un tubo de Prandtl introducido en una corriente de fluido con peso específico γ , conectado a un manómetro diferencial, cuyo líquido manométrico tiene un peso específico γ_m .

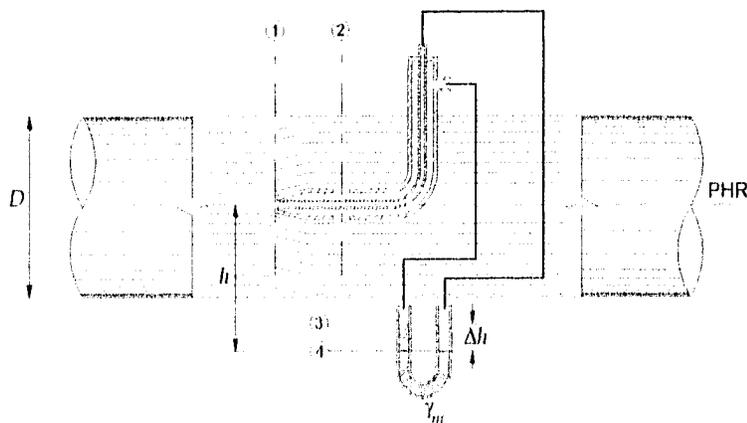


Figura 3.8. Tubo de Prandtl. Combina en un solo instrumento un tubo de Pitot 1 y un tubo piezométrico 2.

El tubo de Prandtl, al igual que el tubo de Pitot, al ser introducido en el fluido produce una perturbación que se traduce en la formación, en la sección ①, de un punto de estancamiento, de manera que $v_1 = 0$.

Para satisfacer el equilibrio estático, entre las columnas del líquido y del manómetro, se debe cumplir con lo siguiente:

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_3}{\gamma} + h$$

$$\frac{p_2}{\gamma} = \frac{p_4}{\gamma} + (h + \Delta h)$$

además $p_3 = p_4 + \gamma_m \Delta h$, simplificando

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_4}{\gamma} + \frac{\gamma_m}{\gamma} \Delta h + h$$

$$\frac{p_4}{\gamma} = \frac{p_2}{\gamma} - h - \Delta h$$

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} - h - \Delta h + \frac{\gamma_m}{\gamma} \Delta h + h \quad 3.10$$

como $p_1 = p_2$

$$\frac{v_1^2}{2g} = \Delta h \left(\frac{\gamma_m}{\gamma} - 1 \right)$$

quedando finalmente que,

$$v_1 = \sqrt{2g\Delta h \left(\frac{\gamma_m}{\gamma} - 1 \right)} \quad 3.11$$

Esto significa que únicamente conociendo el valor de Δh en el manómetro diferencial es posible obtener la velocidad dentro del tubo y en consecuencia el gasto a través de la tubería.

Ventajas del medidor:

- Su permanencia se limita al periodo de medición del gasto.
- Por su diseño, produce pocas pérdidas de presión en la tubería.
- Es fácil de instalar, requiriendo solamente la colocación de una terminal de inserción en la tubería.
- Su funcionamiento es mecánico.

Desventajas que posee:

- Cualquier fuga en el medidor o en la conexión de inserción a la tubería, repercute en la exactitud del aparato.
- La variación en el perfil de velocidades afecta a su funcionamiento.
- Se requiere una expresión matemática que está en función de la diferencial de presión, para conocer el gasto en la tubería.
- En dicha expresión, la presión diferencial no varía de forma lineal con respecto al rango de flujo sino que, se requiere extraer la raíz cuadrada.

3.1.3. MEDIDOR DE TURBINA

En 1790 Benjamin J. Hoffman en Hamburgo, Alemania publicó un folleto donde describe la forma en que los medidores de corriente inventados por Reinhard Woltman realizan la medición del flujo de aire y agua. Es al parecer, el primer intento para realizar mediciones. Posteriormente cambiaron los materiales de diseño y construcción.

Estos dispositivos en general, consisten en una turbina ligera operada contra la corriente de manera axial, lo que ocasiona el movimiento de los engranajes y la totalización del flujo. La cantidad del mismo es computada por el número de rotaciones ocurridas durante un periodo dado. En 1910 en un documento de la

ASME, titulado "Descargas en ríos" se hace referencia a los primeros medidores utilizados para medir de forma práctica únicamente la velocidad en la superficie (Ref. 7).

El principio de este medidor fue utilizado durante mucho tiempo para el diseño de medidores que implicaban el movimiento de una rueda con paletas; con base en este diseño se han podido construir medidores de menor tamaño modificando la forma en que el agua mueve el rotor de manera vertical u horizontal.

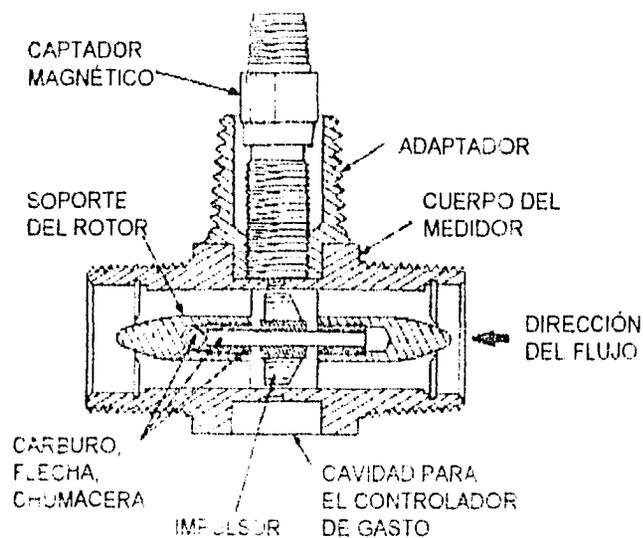


Figura 3.9. Principales componentes de un medidor de turbina

En los setenta fue desarrollado un nuevo tipo de medidor de turbina con una capacidad de operación superior a los rangos de flujo de los medidores convencionales (crecidos por los fabricantes desde los años veinte (Ref. 7)

Los nuevos medidores de turbina de alta velocidad son construidos con otros materiales (Ref. 8). Éstos tienen un menor peso, son autolubricantes, etc., entre otras ventajas. El mantenimiento de los engranajes se reduce debido a la baja fricción existente, lo que ocasiona una mayor durabilidad para los medidores de este tipo.

La instalación de los nuevos medidores de turbina son el resultado de las modificaciones realizadas en 1978 a la norma AWWA² C-701 para medidores de agua fría estándar (Medidores tipo turbina para servicio a los consumidores) (Ref. 7). Estos cambios incluyen una distinción de los medidores de turbina en Clase I y Clase II. Los de la primera son los utilizados hasta 1978; en la segunda, se encuentran los nuevos medidores cuya característica es su baja pérdida de carga (a pesar de las altas velocidades del flujo) y su gran sensibilidad para grandes gastos con una pequeña variación en la precisión para un amplio margen de ellos.

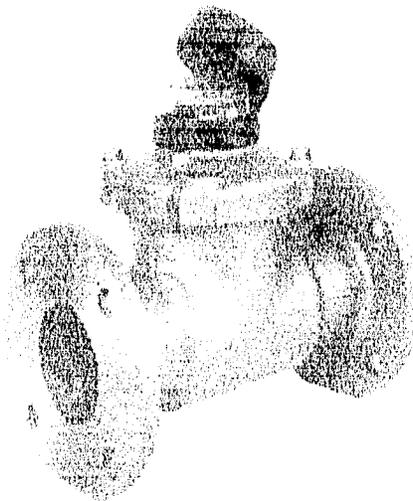


Figura 3.10 . Medidor de Turbina fabricado por "Badger Meter Co., USA"

Los medidores de turbina Clase II son considerablemente más pequeños y ligeros que los de la Clase I, siendo más fáciles de instalar. Los fabricantes de los medidores de turbina Clase II recomiendan colocar aguas arriba un "strainer" (Filtro), que obstruye el paso de materia extraña que pueda afectar a la turbina; además de mejorar las condiciones de flujo a la entrada del medidor, permitiendo una distribución de fuerzas más equilibrada (Ref. 8).

² American Water Work Association

Ventajas del medidor

- El diámetro del medidor y de la tubería son iguales
- El flujo no es bloqueado por el elemento primario si el diámetro se incrementa.
- La pérdida de presión es moderada y decrece conforme se incrementa el diámetro de la tubería.
- En diámetros muy grandes de tubería, el medidor presenta una buena precisión que se ve favorecida con la calibración periódica del aparato.
- La señal del flujo de salida es directamente proporcional a un tren de pulsos con alta linealidad.
- Su funcionamiento es mecánico, y en caso de operarlos con almacenadores de datos, "data logger", éste último provee su propia alimentación.

Desventajas que posee:

- El medidor requiere de un mantenimiento y lubricación constantes.
- Estos dispositivos tiene costos elevados, especialmente para grandes diámetros de tubería
- Los fluidos agresivos deterioran su calibración por lo que se requiere un programa de calibración periódica. La presencia de líquidos corrosivos deterioran la calidad de la lubricación.
- El factor de calibración es afectado si existen cambios en la viscosidad del fluido.
- Su funcionamiento es sensible a la formación de flujos turbulentos
- La falta de lubricación, en los medidores de menor diámetro, disminuye su desempeño por las pérdidas por fricción que se presentan.

3.1.7. MEDIDOR DE PROPELA

Su elemento de medición es un rotor o propela en contacto con el agua que es accionado por la velocidad del líquido al contacto con los álabes (figura 3.11). El diámetro de la propela es más pequeño con relación al diámetro interno de la tubería, especialmente en aquellos de gran tamaño. Ésta es la razón principal para utilizarlos en líneas de servicio principales donde los rangos de flujo no tienen cambios abruptos (Ref. 2).

Este medidor fue diseñado con el objeto de permitir mediciones en tuberías de grandes diámetros ($\phi > 72"$) y en aguas con impurezas que ocasionarían taponamientos en otro tipo de medidores.

Los registradores de flujo o totalizadores varían de acuerdo a cada fabricante teniéndose lecturas estándar, lecturas circulares, etc., existiendo la opción de acoplar lectores de transmisión remota.

Las especificaciones de precisión están contenidas en las normas AWWA-704 para Medidores de agua fría estándar, apartado: "Medidores de propela aplicados en líneas principales" (Ref. 7).

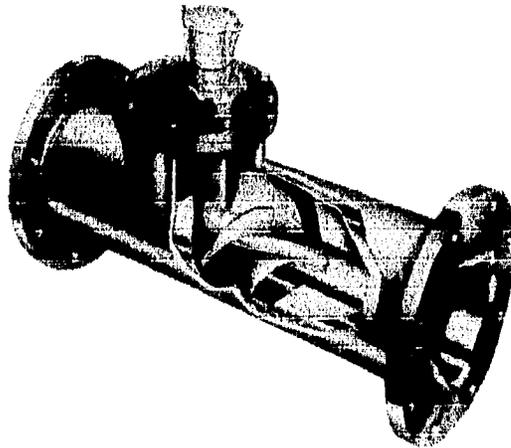


Figura 3.11. Medidor de Propela fabricado por "Badger Meter Co., USA"

Ventajas del medidor:

- El flujo no es bloqueado por el elemento primario si el diámetro se incrementa.
- La pérdida de presión es moderada y decrece conforme se incrementa el diámetro de la tubería.

- En diámetros muy grandes de tubería, el medidor presenta una buena precisión que se ve favorecida con la calibración periódica del aparato.
- La señal del flujo de salida es directamente proporcional a un tren de pulsos con alta linealidad.
- Su funcionamiento es mecánico, y en caso de operarlos con almacenadores de datos, "data logger", éste último provee su propia alimentación.

Desventajas que posee:

- El medidor requiere de un mantenimiento y lubricación constantes.
- Estos dispositivos tiene costos elevados, especialmente para grandes diámetros de tubería.
- Los fluidos agresivos deterioran su calibración por lo que se requiere un programa de calibración periódica. La presencia de líquidos corrosivos deterioran la calidad de la lubricación.
- El factor de calibración es afectado si existen cambios en la viscosidad del fluido.
- Su funcionamiento es sensible a la formación de flujos turbulentos.
- La falta de lubricación, en los medidores de menor diámetro, disminuye su desempeño por las pérdidas por fricción que se presentan.

3.1.8. MEDIDOR ELECTROMAGNÉTICO

El principio en el que se basa este aparato fue investigado por el físico inglés Michel Faraday en 1832, sin embargo su aplicación práctica fue realizada hasta un siglo después en la medición de flujos sanguíneos. Consiste en que cuando un conductor se mueve a través de un campo magnético se produce una fuerza electromotriz; como los líquidos tienen cierto grado de conductividad, generarán un voltaje entre los electrodos, como se muestra en la figura 3.12; dicho voltaje será proporcional a la velocidad del flujo en el conducto (Ref. 9).

Debido a la necesidad de un dispositivo para la medición de flujos de metales en estado líquido en reactores nucleares y con el advenimiento de la detección

de señales electrónicas complejas, este medidor ha incrementado su uso comercial.

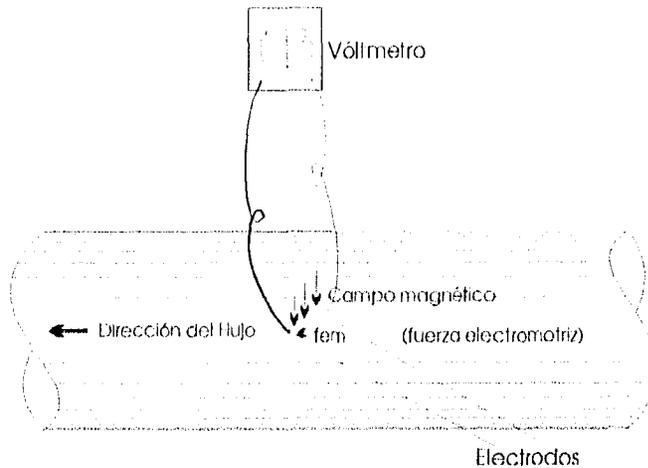


Figura 3.12. Principio básico del funcionamiento de un medidor electromagnético

Este tipo de medidores es recomendable cuando se tienen líquidos en los cuales resulta difícil la medición del caudal por ser viscosos, corrosivos, con sólidos en suspensión, etc., ya que no obstruye el flujo por no requerir de canillas o espitas de presión, las cuales están propensas a taparse (Ref. 9).

Ventajas del medidor:

- Su diámetro coincide con el de la tubería por lo que no obstruye el paso del agua.
- Ocasiona pérdidas de presión insignificantes
- Se encuentra disponible para un rango de diámetros muy grande.
- Puede realizar mediciones de forma bidireccional.
- Las variaciones en la densidad del fluido, viscosidad, presión y temperatura tienen un efecto mínimo sobre el desempeño del medidor.

- La presencia de flujo turbulento aguas arriba del medidor no afecta a su funcionamiento.

Desventajas que posee:

- Los líquidos a medir deben ser eléctricamente conductivos (tener una conductividad de 20 Micro S/cm. o mayor).
- Para tuberías muy pequeñas, estos medidores se vuelven relativamente caros.
- Este tipo de medidor es sensible a la geometría y las propiedades eléctricas de la tubería y a las variaciones de corriente de alimentación.

3.1.9. MEDIDOR ULTRASÓNICO

Este medidor tiene básicamente dos modos diferentes de funcionamiento. Uno llamado "transit time" o tiempo en tránsito abarca la medición de la diferencia del tiempo empleado por una onda sonora para desplazarse corriente arriba y corriente abajo entre dos estaciones de medición. La diferencia del tiempo entre ambos recorridos es proporcional a la velocidad del flujo.

El segundo modo de operación es empleando el efecto Doppler (figura 3.13), en este caso la señal sonora es reflejada por algún material en suspensión que se esté moviendo junto con el agua (velocidad de la partícula). Los ultrasonidos se desplazan primero en la dirección de la corriente, después en dirección contraria, etc., su velocidad se suma a la del flujo, después se resta, etc. A partir de esta variación se puede calcular el flujo (Ref 9).

Los medidores ultrasónicos de tiempo en tránsito son utilizados para la medición de gastos en tuberías que conducen agua sin material en suspensión (agua potable), mientras que los Doppler se usan para el caso de aguas residuales o bien aquellas con aire disuelto

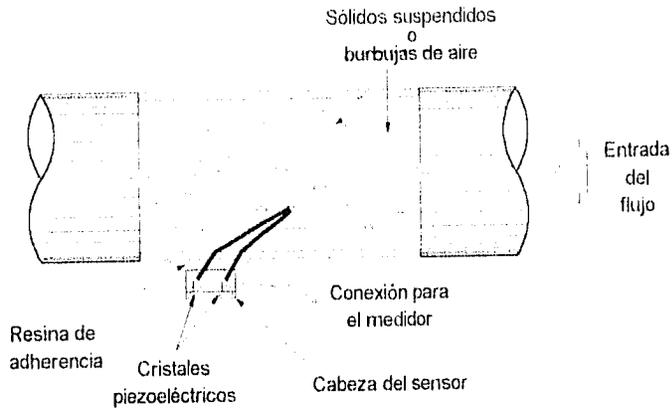


Figura 3.13. Aplicación del efecto Doppler para la medición de caudales en tuberías a presión

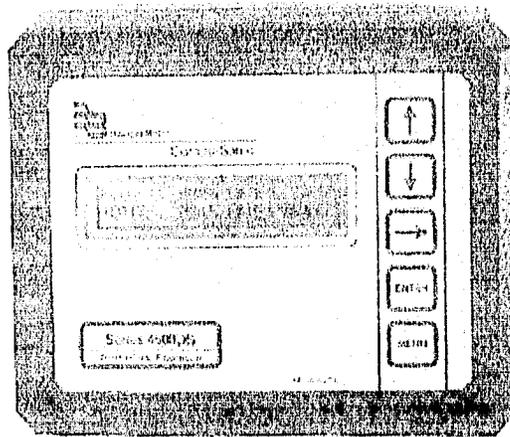


Figura 3.14. Carátula de un Medidor Ultrasónico marca "Badger Meter Co.; USA"

Ventajas del medidor:

- No obstruye el paso del fluido, por lo que no ocasiona ningún tipo de pérdidas de carga.
- Puede ser empleado en la medición del gasto de un gran número de fluidos, sin tener la restricción de su conductividad eléctrica.
- Se instalan sobre las paredes de la tubería y no requieren arreglos previos mayores.
- No se interrumpe el flujo durante el mantenimiento o reemplazo del medidor.
- No posee partes móviles.
- Se adapta a los diferentes tamaños de diámetros de tubería.
- Costos bajos en instalación y operación.
- Es capaz de medir flujos bidireccionales.
- Requiere energía eléctrica para funcionar, sin embargo, tanto el propio medidor como el almacenador de datos, 'data logger', permiten utilizarse con baterías.

Desventajas que posee:

- Sensible al cambio de la composición fisicoquímica del fluido.
- La presencia de sólidos suspendidos de gran tamaño así como de grandes burbujas de aire, distorsionan y bloquean la propagación de las ondas sónicas.
- Mide la velocidad representativa a través del diámetro de la tubería, mas no la velocidad representativa compensada.
- Es sensible al perfil de velocidades del flujo; su precisión puede alterarse debido a los cambios en la rugosidad de la tubería y por cambios en el flujo de laminar a turbulento.
- La correcta colocación de los sensores es esencial para asegurar una buena transmisión de la señal sónica.
- Si se usa el montaje superficial, es importante cuidar el tipo de sellador para colocarlos, ya que se pueden producir pérdidas de señal por absorción.

3.2. CRITERIOS PARA LA SELECCIÓN DE LOS EQUIPOS DE PRUEBA

Además de conocer sus funcionamiento, la selección de un medidor dependió de si cumplía o no con ciertas características. Éstas se refieren, por ejemplo, a la posibilidad de realizar mediciones en muy diversos diámetros de tubería, bajo diferentes condiciones de trabajo y el utilizar un solo equipo para todas ellas.

Por lo anterior se requirió conocer de los medidores en estudio, cuales reunían también las siguientes características:

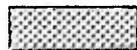
- Estar diseñado con una tecnología de vanguardia.
- Ser portátil.
- Tener una precisión del 98% al 101% del gasto medio.
- Poder almacenar información y contar con las interfaces necesarias para su traslado a una computadora.
- No ocasionar pérdidas de carga significativas en la instalación.
- Ser capaz de utilizar su propia fuente de suministro, con la seguridad de no depender de alimentaciones eléctricas externas.
- Obtener de forma directa el valor del gasto, sin necesidad de expresiones matemáticas.
- No requerir de un tramo muy extenso de tubería para su colocación .

Para realizar la comparación se elaboró un resumen (Tabla 3.1) que presenta a los 9 medidores, señalando con un cuadro sombreado cuando cumplían con la característica indicada. En este caso, el aparato contó con un punto a favor.

En el extremo derecho de la tabla se encuentra una columna llamada de "puntaje" en la que se sumaron los puntos positivos que tuvo cada dispositivo.

TABLA 3.1. RESUMEN COMPARATIVO DE CARACTERÍSTICAS

MEDIDOR	ERROR (%)	PRECISIÓN (%)	USO EN TUBERÍA Σ	PÉRDIDA DE CARGA	CÁLCULOS PARA AFORO	REQUIERE CALIBRACIÓN	PORTÁTIL	ALMAC. INFORMACIÓN	DEPEND. ELÉCTRICA	TAMAÑO	PUNTAJE
1 - Venturi	± 0.75	± 0.25	1.0" a 120"	baja	si	no	no	no	no	grande	4
2 - Diafragma	± 0.25 a ± 2.0	± 0.25	todas	media	si	no	no	no	no	medio	3
3 - Tobera	± 0.75	± 0.15	1" a 10"	media	si	no	no	no	no	medio	4
4 - Pitot	± 0.5 a ± 5	± 0.50	0.5" a 96"	baja	si	no	si	no	no	grande	5
5 - Prandtl	± 0.5 a ± 5	± 0.50	0.5" a 96"	baja	si	no	si	no	no	grande	5
6 - Turbina	± 0.5 a ± 2.0	± 0.02	3/6" a 24"	media	no	si	no	si	no	grande	4
7 - Propela	± 0.5 a ± 2.0	± 0.02	3/6" a 24"	media	no	si	no	si	no	grande	4
8 - Magnético	± 0.5	± 0.25	0.1" a 120"	baja	no	si	si	si	fuentes y/o batería	pequeño	6
9 - Sónicos	± 1 a ± 2.5	± 0.25	0.125" a 120"	ninguna	no	si	si	si	fuentes y/o batería	pequeño	6



Característica a favor del medidor

Observando la columna denominada de 'puntaje' se encuentra que los medidores con mayor cantidad de características positivas son los magnéticos y los sónicos, les siguen los de Pitot y Prandtl, con el mismo puntaje están el Venturi, Tobera, Turbina, Propela y con la menor puntuación quedó el diafragma.

Es importante señalar que esta calificación o puntaje asignado a cada medidor, fue tomando en cuenta los requerimientos antes expuestos para el tipo de aplicación deseada.

De la muestra anterior, podemos separar aquellas tecnologías que se pueden presentar de forma totalmente portátil, quedando las siguientes: MAGNÉTICO, SÓNICO, PITOT y PRANDTL, con precisiones de $\pm 0.5\%$, $\pm 1\%$ a $\pm 2.5\%$, $\pm 0.5\%$ a $\pm 5\%$ y $\pm 0.5\%$ a $\pm 5\%$ respectivamente. Teniendo una confiabilidad mayor en todo el rango de caudales para los dos primeros (el medidor magnético y el sónico).

Estos dos, el magnético y el sónico requieren de alimentación eléctrica para funcionar, sin embargo, pueden operar por largo tiempo con el uso de baterías. En el caso del tubo Pitot y el tubo de Prandtl, no se requiere alimentación eléctrica alguna.

Los medidores de tipo magnético y ultrasónico cuentan con la posibilidad de instalárseles un almacenador de datos, "data logger", capaz de registrar en una memoria electrónica los caudales medidos cada cierto periodo y por varios días.

Después de la identificación de diferentes tipos de medidores, aceptables para la realización de los aforos, se investigó la existencia de estos equipos en México y los posibles proveedores.

Con base en el interés mostrado por los distribuidores en las pruebas que se realizarían a los medidores, se logró la aceptación y la posibilidad de adquirir en préstamo algunos de los equipos listados a continuación en la tabla 3.2:

TABLA 3.2. MEDIDORES PRE-SELECCIONADOS.

	MEDIDOR	MARCA	PARA DIAMETRO DE TUBERIA
1	Flo-tote	Marsh Mc Birney	de 2" a 96"
2	HP1	Hoffer Flow Controls	de 3" a 60"
3	MPI 400	Accu - Flo - Dynasonics	de 1.25" a 60"
4	M31 - 902	Accu - Flo - Dynasonics	de 1.25" a 60"
5	Spectra	Controlotron	de 2" a 60"
6	System 900 Uniflow	Controlotron	de 2" a 60"
7	Compusonic 4500 -12	Badger Meter	de 2" a 60"
8	AQ 400	Badger Meter	de 5/8" a 96"

Por ser equipos de gran innovación en México su existencia en número es restringida, por lo que la realización de las pruebas quedó limitada a la disponibilidad de cada uno de ellos.

Con base en esta disponibilidad se trabajó solamente con los siguientes, que son representativos de las tecnologías y características buscadas:

- 'Flo-Tote' de 'Marsh McBirney', tipo punta de inserción electromagnética.
- 'Uniflow' de 'Controlotron', tipo 'clamp-on' con funcionamiento ultrasónico por tiempo en tránsito.
- 'Badger Meter' de la línea Industria, Modelo 'Compusonic 4500-12' tipo 'clamp-on' con funcionamiento ultrasónico por tiempo en tránsito.

En las páginas siguientes se describe cada uno de los equipos con los cuales se llevó a cabo la investigación.

3.3. DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS SELECCIONADOS

3.3.1. MEDIDOR PORTÁTIL DE INSERCIÓN DE TIPO ELECTROMAGNÉTICO MARCA "MARSH-MCBIRNEY, INC. (FLO-TOTE)"

Este tipo de medidor se ha utilizado desde hace dos décadas mostrando una gran precisión, linealidad y estabilidad. Otra característica es que el costo del equipo es independiente del diámetro de la tubería (Ref. 10).

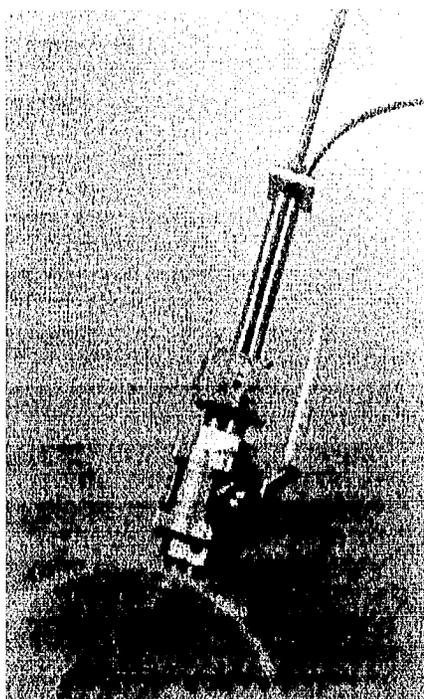


Figura 3.15. Medidor portátil de inserción, tipo electromagnético marca "Marsh-McBirney, Inc." (Flo-Tote)

Su gama para cuantificar caudales es muy amplia; ya que puede utilizarse en tuberías por donde circulan flujos de procesos industriales, agua potable, aguas residuales, agua en sistemas de refrigeración, químicos, etc.

El medidor de flujo electromagnético fue diseñado para operar en tuberías cerradas cuyo diámetro queda comprendido entre 2 y 96 pulgadas con un rango de precisión adecuado

La medición se realiza en la pared de la tubería por medio de un sensor electromagnético garantizando que no se tendrán fugas o derrames. El diseño hidrodinámico de los sensores evita atascamiento y obstrucción lo cual reduce los costos de mantenimiento. Es aplicable para fluidos limpios o con sólidos disueltos (Ref. 10).

La instalación no requiere interrupción en el proceso de flujo. La colocación del sensor dentro de la tubería se realiza por medio de una válvula de bola (fig. 3.16), con ayuda del equipo de inserción hasta detenerlo en la posición correcta dentro del flujo que conduce la tubería.

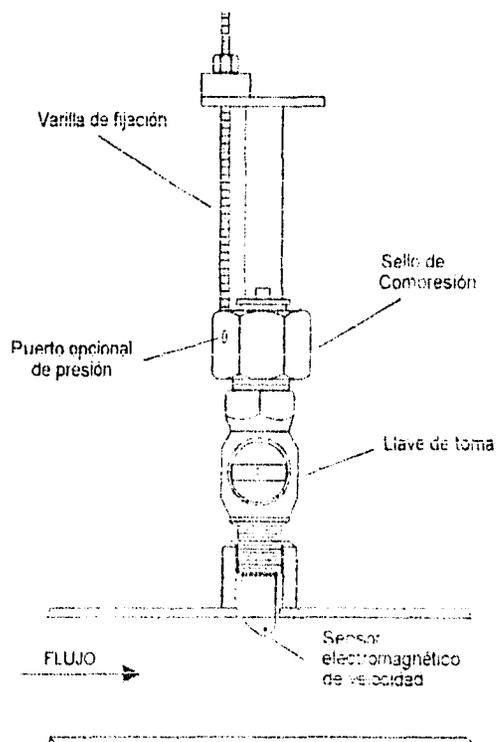


Figura 3.16. Instalación del sensor en la tubería

3.3.2. MEDIDOR PORTÁTIL DE TIPO ULTRASÓNICO POR TIEMPO EN TRÁNSITO MARCA "CONTROLOTRON", MODELO "UNIFLOW"

Tradicionalmente la cuantificación del flujo se ajusta a las características de medición y a los costos de instalación y operación, comúnmente se emplean diafragmas, toberas, venturis o algún tipo de medidor ultrasónico. Por su bajo costo y diversidad de uso, el sistema "Uniflow" puede sustituir a los medidores convencionales de flujo.

Este medidor opera en cualquier diámetro y tipo de tubería. Su sistema es portátil construido con materiales resistentes. Este dispositivo consta de tres funciones diferentes ya que es un medidor de flujo, almacenador de datos y almacenador de gráficos.

La comunicación con el equipo se realiza por medio de un programador manual, en el que de los desplegados existen versiones en alemán, español, inglés y francés.

Una vez instalados los transductores no se requiere dar al menú de instalación palabras externas, solamente se selecciona la instrucción correspondiente de la lista de opciones que presenta el menú disponible del programador manual de este medidor (Fig. 3.17)

Este tipo de medidor combina el sistema de Pulso-Múltiple patentado por Controlotron y el sistema TransX de Tecnologías de transucción y transmisión. "Uniflow" opera con niveles altos de precisión aún con la presencia de aireación en los líquidos, cavitación o cuando circulan líquidos no homogéneos (Ref. 11).

Su programación se ha estandarizado para realizarla en campo no importando el modelo del medidor. El sistema Estándar Analógico o la Función Digital de Datos únicamente requiere de un enchufe para cada aplicación (Ref. 11.).

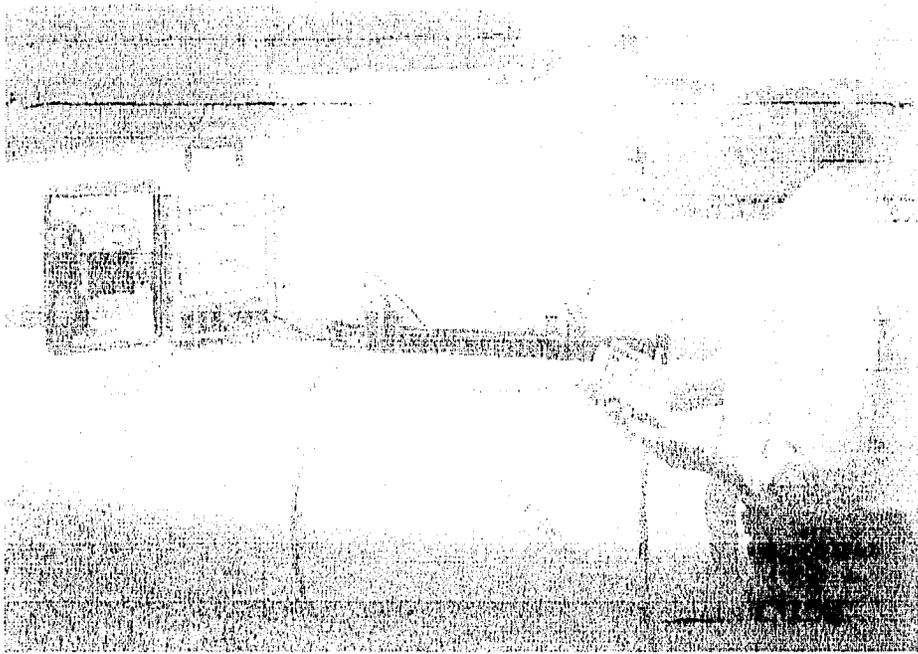


Figura 3.17. Medidor portátil de tipo ultrasónico por tiempo en tránsito marca "Controlotron", modelo "Uniflow"

El medidor se instala fácilmente en sitios nuevos, o se puede trasladar de sitios donde ya no se requiere a nuevos lugares para diferentes aplicaciones.

Este dispositivo es capaz de realizar la medición de una gran cantidad de fluidos y para un amplio rango de diámetros de tubería. También posee diversas unidades de medición que se despliegan en la pantalla y que pueden seleccionarse libremente; por ejemplo, el valor del gasto puede solicitarse en m^3/s , l/s , gal/min , etc., según los requerimientos.

Cuando se lleva a cabo una medición, no es necesario anotar cada uno de los valores que se despliegan, el equipo almacena los datos de manera instantánea, o para los intervalos que previamente se hayan seleccionado. Posteriormente pueden desplegarse gráficamente en la pantalla, imprimirse o enviarse mediante un modem a una computadora personal.

La medición se realiza por medio de la velocidad sónica en el fluido para lo cual se requieren las propiedades físicas del mismo. El usuario únicamente lo identifica y se lo indica al medidor. Es posible también, detectar la inclusión de aire dentro del líquido, permitiendo mostrar el porcentaje de aireación presente en la aplicación.

3.3.3. MEDIDOR PORTÁTIL DE TIPO ULTRASÓNICO POR TIEMPO EN TRÁNSITO MARCA 'BADGER METER', MODELO 'COMPUSONIC 4500-12'

El modelo 'Compusonic' de la serie 4500 es un medidor de flujo ultrasónico diseñado para la medición de agua potable y residual (afluente/efluente) tanto municipal como industrial en tuberías totalmente llenas.

La serie 4500 se utiliza para medir gastos en tuberías de 2 ó más pulgadas de diámetro. Se ofrece en tres clases diferentes de transductores para diferentes aplicaciones:

- transductores con bandas de agarre para tuberías de plástico y metal: adecuadas para transmisiones ultrasónicas (fig. 3.18 a).
- transductores de inserción: penetran las paredes de la tubería (fig. 3.18 b).
- transductores montados internamente para tuberías de grandes diámetros (fig. 3.18 c).

Por su diseño, este medidor es capaz de medir flujos bidireccionales (Ref. 12).

El medidor opera en base al sistema de detección de tiempo con cambio de fase: esta técnica mejora la detectabilidad de la diferencia de tiempo para realzar la exactitud y proporcionar una operación estable mientras que se reducen substancialmente los efectos del ruido (ídem).

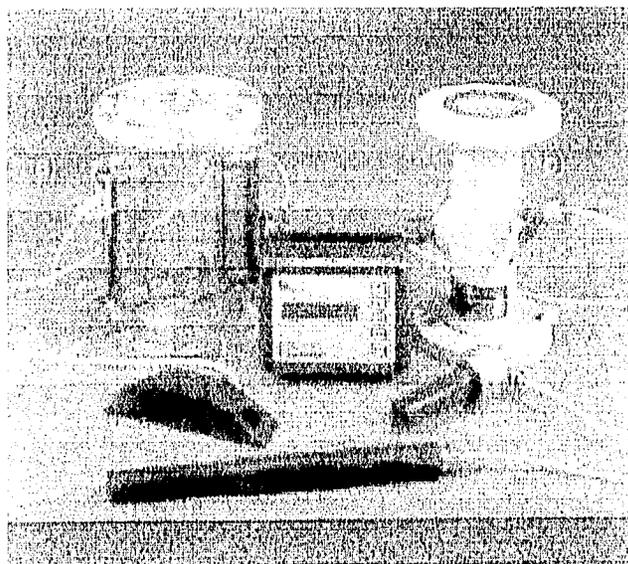


Figura 3.18. Medidor portátil de tipo ultrasónico por tiempo en tránsito marca Badger modelo "compusonic 4500-12" y tipos de transductores

La ráfaga de energía ultrasónica se transmite y recibe por medio de trayectorias bien definidas a través del flujo. La velocidad de éste se mide exactamente por medio de la diferencia en la llegada de las señales de los transductores ascendente y descendente (fig. 3.19). El "tiempo de viaje total" es medido para compensar con exactitud la variación de la velocidad sónica del fluido. Dichas variaciones pueden deberse a cambios en la cantidad de sólidos suspendidos o disueltos así como también variaciones en la temperatura. (Ref. 12) .

La unidad electrónica se controla con un microprocesador. A las señales se les da un valor numérico antes de ser procesadas para que ninguna modificación análoga cause distorsiones en la información o cause desvíos que puedan contaminar a las señales. Esta técnica aumenta la confiabilidad del medidor y minimiza las variaciones del mismo que son asociadas normalmente con inestabilidades en los componentes. El valor numérico se confirma, almacena y

filtra mediante sofisticados algoritmos matemáticos para corregir distorsiones en la señal (ídem).

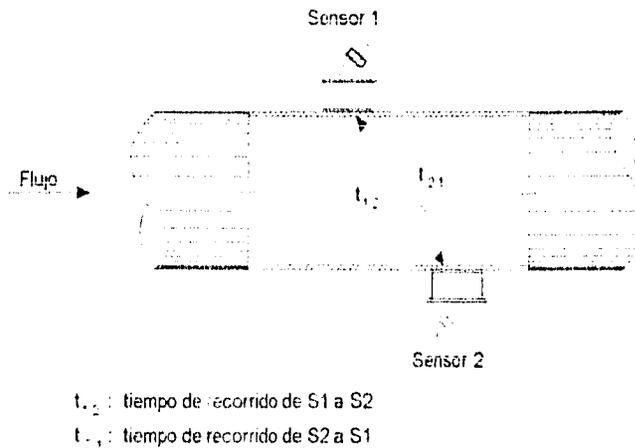


Figura 3.19. Tiempo total del viaje de S1 a S2 y viceversa

Los medidores de flujo de la serie 4500 pueden ser montados en forma vertical u horizontal. Se requiere de un perfil de velocidad bien desarrollado con la tubería llena y la corriente ascendente debe ser suficiente para asegurar una distribución predecible de la velocidad del líquido (Ref. 12.)

La serie 4500 está equipada con un puerto serial bidireccional que sostiene comunicaciones interactivas tanto con microcomputadoras como sistemas computacionales. El puerto se accesa mediante un enchufe montado en la electrónica de la unidad. Se han establecido protocolos de comunicación versátiles para asegurar la confiabilidad.

Las comunicaciones con el puerto serial se pueden utilizar para cambiar aplicaciones en el medidor, cambiar las unidades de energía usadas para los cálculos de flujo, comprobar la calidad de la operación y las señales del medidor y para transmitir informaciones como gasto y totales de flujo (ídem).

La técnica de tiempo en tránsito asegura dependencia en la operación y precisión en el sistema. En unidades calibradas se considera común exactitudes de $\pm 1\%$ sobre el rango de flujo (idem).

CAPÍTULO 4

PRUEBAS DE LABORATORIO

CAPÍTULO 4. PRUEBAS DE LABORATORIO

4.1. ELECCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA

Al analizar las actividades que se llevarían a cabo, se observó la necesidad de realizar varios trabajos previos al desarrollo de las pruebas, destacando entre ellos la elección del sitio que, de acuerdo a su infraestructura hidráulica y facilidad en su operación, permitiera efectuar los trabajos de manera adecuada para obtener los resultados con los que sería evaluado cada uno de los equipos.

Existen pocos lugares con la infraestructura hidráulica adecuada para pruebas que permitan evaluar la confiabilidad de un equipo de medición. Entre los posibles lugares a utilizar estaban los siguientes:

- Laboratorio de medidores de la Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica.
- Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.
- Laboratorio de Hidráulica del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.

Después de visitarlos se observó que ninguno contaba con un modelo exclusivo para realizar mediciones con los equipos que se pretendía evaluar, ante esta situación se buscó que dentro de las instalaciones existiera una estructura hidráulica en donde fuera posible realizar adecuaciones mínimas para lograr las características que requerían cada uno de los equipos.

Además de lograr las condiciones hidráulicas adecuadas que sugieren los fabricantes también se buscó que éstas se asemejaran a las posibles condiciones de trabajo en las que operarán los equipos.

Para algunos de los medidores seleccionados la variación en el perfil de velocidades dentro de la tubería puede provocar que el registro del gasto sea

incorrecto. Para evitarlo se buscó que la alimentación a la estructura se realizara mediante un tanque de carga constante y no mediante un equipo de bombeo. Se procuró además, que la línea principal de alimentación del tanque a la estructura, al momento de estar efectuando las mediciones, no tuviera derivaciones de agua hacia ningún otro lugar.

Después de revisar los requerimientos que debía cumplir la tubería para el desarrollo de las pruebas, se decidió que el lugar más adecuado era el Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Se tomó la decisión porque dicho laboratorio cuenta con estructuras alimentadas por un tanque de carga constante, lo que garantizaba condiciones hidráulicas sin variaciones durante el periodo que durarían las mediciones. También se vió que era posible controlar la extracción de agua de las derivaciones existentes en las tuberías.

4.2. DESCRIPCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA UTILIZADA EN LA REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS

El Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM cuenta con diferentes estructuras donde se llevan a cabo las prácticas impartidas en él.

De ellas eran al menos tres las que cumplían de manera global con las características técnicas requeridas para la realización de las pruebas. Se eligió la correspondiente a la práctica de "Tránsito de Avenidas en Vasos" (fig. 4.1).

En la figura 4.1 se presenta una vista general del lugar donde se desarrollaron los trabajos.

Se puede observar las dos secciones de control con que cuenta, la primera un vertedor triangular colocado al final del tanque estabilizador de niveles. La

segunda un vertedor rectangular instalado en un pared de acrílico para observar directamente los niveles de agua en él.

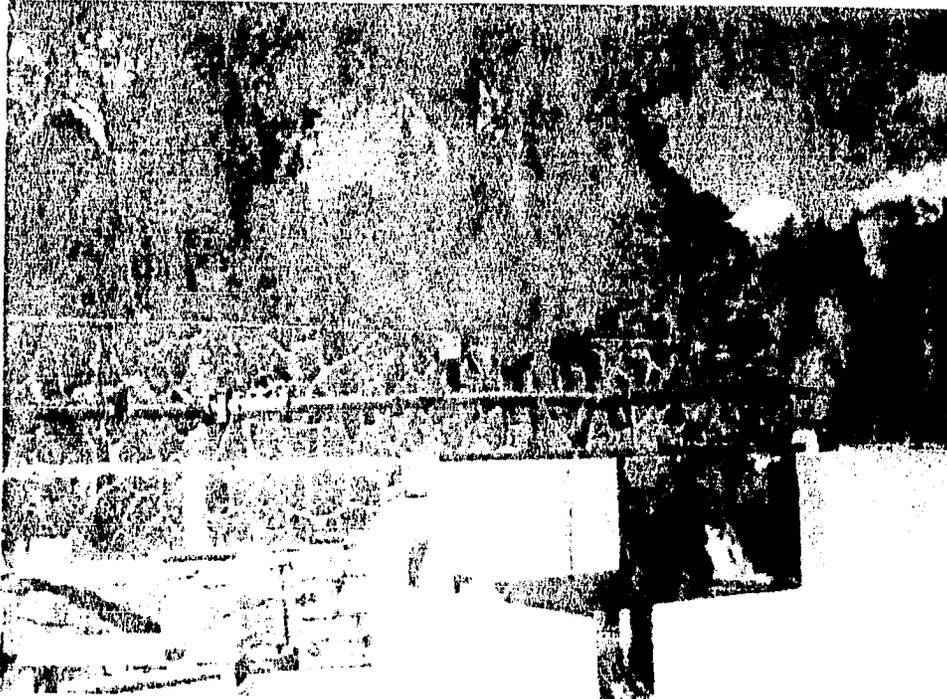


Figura 4.1. Vista general del modelo empleado para la realización de las pruebas

El suministro del agua a las estructuras del laboratorio se puede realizar de dos distintas maneras: mediante bombeo o con la ayuda de un tanque de carga constante que es alimentado con bombas verticales de distintas capacidades. El agua empleada para la realización de los experimentos se recircula en su totalidad y mediante canales de retorno es conducida hasta una cisterna, que se conecta al cárcamo de bombeo, donde se ubican las bombas que alimentan el tanque de carga constante. En este tanque se tienen varias derivaciones en tubería de acero de 10" ó 12" de diámetro, que sirven como líneas principales de alimentación. El diámetro de las tuberías empleadas para derivar el agua

depende del gasto máximo que se vaya a utilizar (Ref. 13). La diferencia de altura entre el nivel del agua en el tanque y el nivel del piso es de 5.5 m.

La tubería principal que deriva el agua hacia la estructura en que se realizaron las pruebas tiene un diámetro de 10" y alimenta así mismo a otros tres modelos (fig. 4.2).

La derivación hacia la estructura de "Tránsito de Avenidas en Vasos" se realiza mediante una *Te* de 10" con reducción al centro de 4" (Ref. 13), (fig. 4.2).

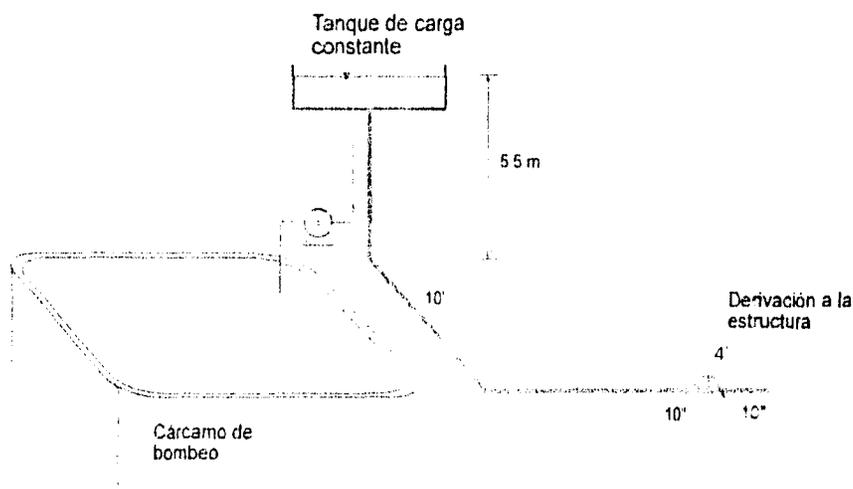


Figura 4.2. Esquema de la alimentación a la estructura

Después de un tramo de tubería de 0.04m de longitud y 4" de diámetro se tiene una brida de acero que se emplea como unión entre la derivación y la tubería que descarga el agua directamente a la estructura (fig. 4.3).

Como se observa en la figura 4.3, el modelo es alimentado por una tubería de acero al carbón de 4" de diámetro. A una distancia aproximada de 1.50 m, a partir del nivel de piso, se ubica una válvula de compuerta la cual permaneció totalmente abierta durante la realización de las pruebas.



Figura 4.3 . Brida de unión de la derivación principal con la estructura y válvula de compuerta.

Después de un codo de 90° y separado 2.10 m del nivel de piso se tiene una tubería de aproximadamente 8 m de largo. Antes de un cambio de dirección de 45° se ubica una derivación hacia el modelo en donde se encuentra la válvula de compuerta que controla el gasto de entrada (fig. 4.4). Esta válvula y la de control general, ubicada al principio de la tubería, permiten garantizar que esta última siempre trabaje a tubo lleno.

El agua que circula por el tanque estabilizador de nivel es descargada a otro tanque desde el cual se vierte con la ayuda de un vertedor rectangular y de una válvula de desfogue hacia uno de los canales de retorno (fig. 4.5).

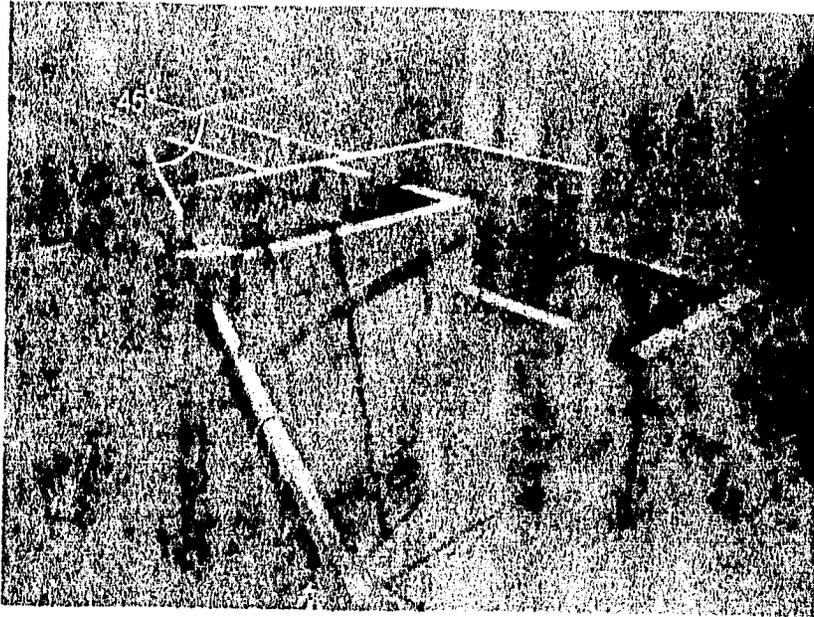


Figura 4.4. Tubería y derivación que alimentan a la estructura

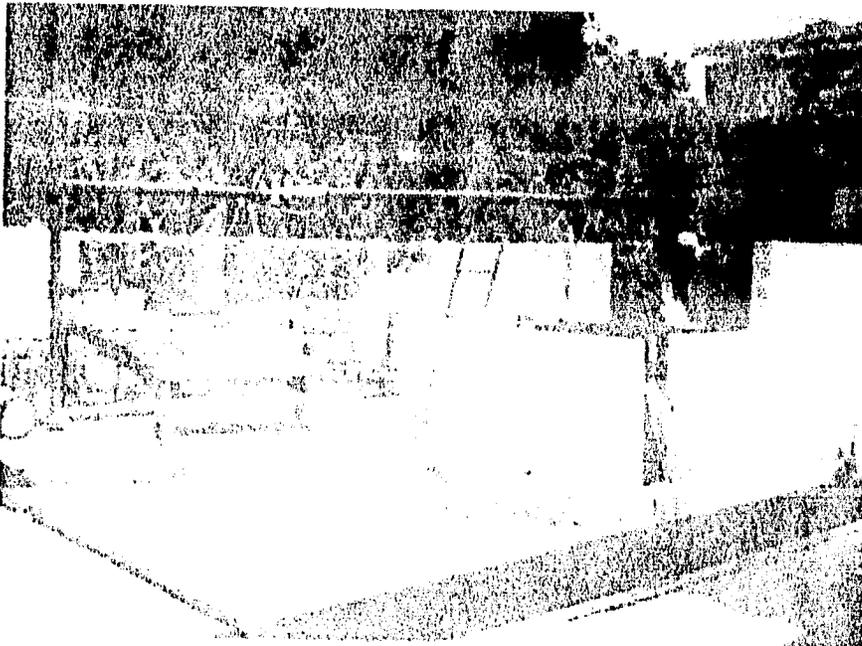


Figura 4.5. Vista del vertedor rectangular y canal recolector de agua

La tubería que descarga en el interior de la estructura se encuentra separada una distancia de 0.3 m medidos a partir del nivel de piso y descarga al tanque estabilizador de nivel donde se encuentran dos muros tranquilizadores que son empleados para minimizar las variaciones del nivel de agua.

En el extremo opuesto del tanque se tiene una sección de control con la cual se obtuvo el gasto que circulaba por la tubería (fig. 4.5).

4.2.1. REVISIÓN DEL VERTEDOR DE AFORO

El gasto a través de la tubería fue aforado con la ayuda de la sección de control colocada en el extremo opuesto de la descarga que alimenta al modelo.

Como puede observarse en la figura 4.6 la sección de control es un vertedor de sección triangular, de placa de 1/8" de espesor.

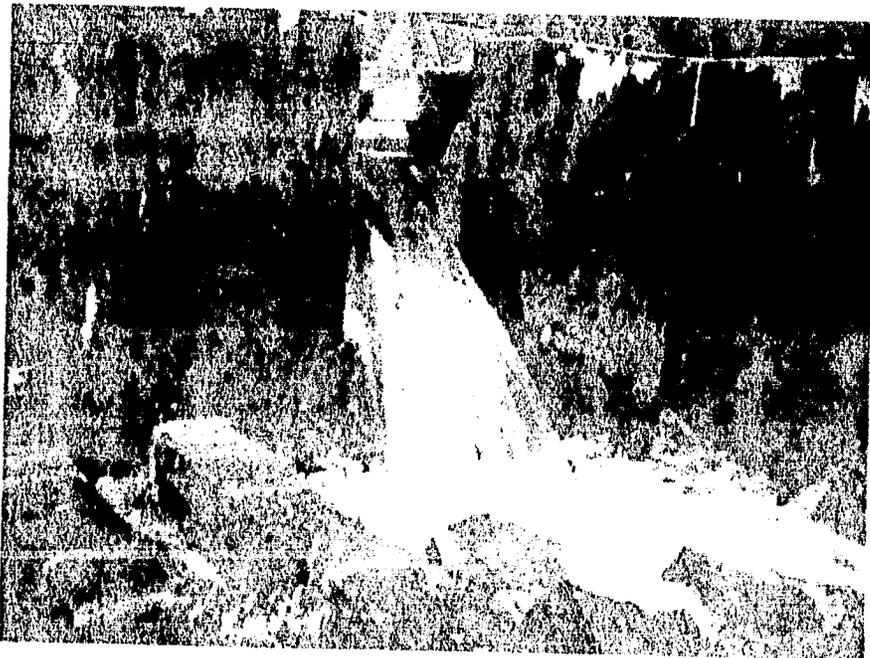


Figura 4.6. Vertedor triangular utilizado para aforar el gasto a través de la estructura

Con base en dicho espesor de placa y los gastos que se emplearían en el desarrollo de las pruebas, se consideró al vertedor como de pared delgada (Ref. 3).

Posteriormente se midió la abertura entre las paredes del vertedor y se encontró un ángulo de 54.40° . También se obtuvo la dimensión del ancho del tanque en el que está alojado, el cual se denomina "canal de llegada", cuya medida fue de 1.30 m.

Al tener las características geométricas y la carga hidráulica sobre el vertedor fue posible calcular el gasto.

Para ello se uso la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan \frac{\theta}{2} \mu K h^{\frac{5}{2}} \quad 4.1$$

Donde:

Q - Gasto que circula por el modelo, $\left[\frac{m^3}{s} \right]$

g - Constante de la aceleración de la gravedad, $\left[\frac{m}{s^2} \right]$

θ - Ángulo del vertedor

μ - Coeficiente de descarga, $[-]$

k - Coeficiente de descarga, $[-]$

h - Carga hidráulica sobre el vertedor, $[m]$

El criterio utilizado para el cálculo de los coeficientes μ y k fue el sugerido por la Universidad Católica de Chile (Ref. 3).

La carga hidráulica sobre el vertedor es la que se obtiene al medir la distancia que hay desde su vértice inferior hasta el nivel de la superficie libre del agua.

Las características geométricas del vertedor y el valor correspondiente a la carga hidráulica se muestran en la figura 4.7.

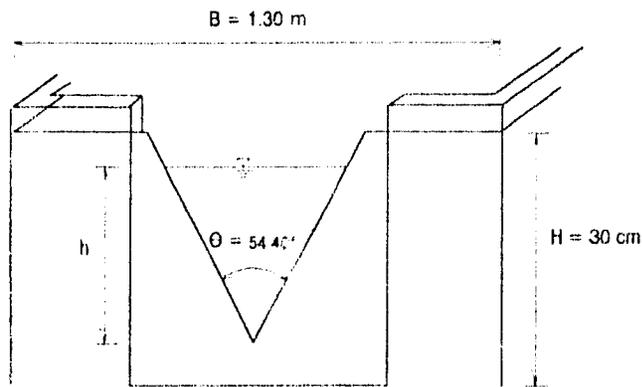


Figura 4.7 Características geométricas del vertedor

4.3. DESARROLLO DE LAS PRUEBAS

4.3.1. ACTIVIDADES PREVIAS EN EL VERTEDOR

Considerando el valor máximo que se podía obtener con el vertedor y en base a los datos investigados, se estableció un rango de cargas sobre él para fijar el gasto que se utilizaría en la realización de las pruebas. Para este fin se construyó la curva de descarga del vertedor mostrada en la sección 2.2.3.

La carga mínima se estableció para el menor valor con el que se lograba una descarga libre sobre el vertedor.

Aun cuando se pueden obtener valores de los coeficientes de descarga para cargas muy pequeñas es recomendable utilizar los vertedores triangulares para cargas superiores a 8 cm y hasta 60 cm. En la realización de las pruebas se

respetó esta recomendación y como se podrá observar los gastos mínimos empleados rebasan esta limitante.

Para cada medidor se establecieron como mínimo 5 pruebas. Las primeras lecturas se realizaban con un gasto mínimo y paulatinamente se iba incrementando hasta el valor máximo que se podía obtener con el vertedor.

Cada una de las pruebas se procuró realizarla en forma independiente, es decir, sin hacer mediciones simultáneas para no afectar el flujo en las zonas donde se colocaron los otros medidores.

4.3.2. REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS

En conjunto los equipos requirieron de trabajos especiales para su colocación, calibración o programación; sin embargo, puede establecerse que la metodología seguida en la realización de las pruebas se clasificó en tres grandes partes:

1. Calibración y programación de los equipos.
2. Medición y registro de datos.
3. Análisis de resultados.

Cada equipo de medición debía configurarse de acuerdo a las condiciones hidráulicas presentes en el arreglo seleccionado para la realización de las pruebas. Efectuándose los siguientes trabajos en cada uno de ellos.

4.3.2.1. Medidor electromagnético marca "Marsh-McBirney, Inc. (FLO-TOTE)"

Para su instalación, este equipo requirió de la instalación previa de una válvula de bola y un cople en la tubería (fig. 4.8).

Este medidor requiere ser programado para la obtención de la información que permita valorar su confiabilidad.

Para ello se requiere localizar el punto en el que se presenta la velocidad media del fluido; para lo cual se realizan, dependiendo del diámetro interno de la conducción, cierto número de lecturas puntuales a diferentes profundidades dentro de la tubería. Con estos datos se obtiene el perfil de velocidades y con base en éste se ubica al punto donde se mide la velocidad media.



Figura 4.8. Medidor de inserción colocado en el cople que previamente se había soldado, se observa el instrumento de monitoreo o "Datalogger" conectado al medidor

Su obtención es de acuerdo a constantes de calibración y expresiones matemáticas incluidas en la información técnica proporcionada para este equipo por el fabricante.

Una vez definido este punto, se procede a nueva programación del equipo en su totalidad. El medidor se reprogramó para obtener, cada cinco minutos, el promedio de las lecturas durante un periodo de 15 s.

El registro de velocidades que se obtiene debe afectarse por un coeficiente de corrección para poder calcular el gasto, además de contar con las características geométricas de la tubería.

Este medidor se colocó de acuerdo a las instrucciones sugeridas por el fabricante.

4.3.2.2. Medidor ultrasónico marca "CONTROLOTRON"

Este medidor requiere, antes de la colocación de sus sensores en el conducto, la revisión de su calibración a cero; para lo cual, primero se colocan en una tubería hipotética con un gasto igual a cero: ésto simulado con una barra metálica incluida en el equipo de medición.

Una vez establecidas dichas condiciones, se procede a revisar el flujo que indica la pantalla del medidor, en este caso era igual a cero por lo que no fue necesario modificar la calibración existente en el programa del medidor.

Ya verificada la calibración del equipo, se procedió a programarlo. Se incluyó dentro de su registro de configuración las propiedades del fluido, las características de la tubería y algunos datos adicionales que requiere el programa como el tiempo e intervalo de registro. Se estableció que el caudal sería registrado cada cinco minutos, por periodo de 15s.

Las características técnicas proporcionadas para este equipo indicaban que los sensores podían colocarse alrededor de la tubería no importando si ésta se encontraba recubierta por algún material, la única condición para realizarlo era conocer el tipo y espesor del mismo. Como no fue posible determinar estos

parámetros se optó por eliminar el recubrimiento y limpiar la tubería. Otro de los datos que se requería incorporar en la programación del medidor era el espesor del tubo. Junto con el equipo de medición fue posible adquirir un medidor de espesores electrónico con el fin de obtener este valor lo más exacto posible.

Las pruebas realizadas con este equipo se efectuaron bajo condiciones de operación recomendadas por el fabricante, es decir colocando el medidor en el lugar ideal para obtener las lecturas, se analizaron las posibles opciones y se optó por colocarlo a una distancia mayor a 10 veces el diámetro de la tubería hacia aguas abajo del medidor de turbina existente en la estructura utilizada para las pruebas (fig. 4.9)

Debido a la estructura del equipo que fue posible adquirir, los resultados obtenidos no se almacenaron en un archivo de datos; directamente se mandaron a su impresora. La colocación de los sensores en la tubería fue con ayuda de rieles de sujeción (fig. 4.9). La distancia de los sensores sobre los rieles la proporciona el medidor con base en los datos del conducto ya proporcionados.

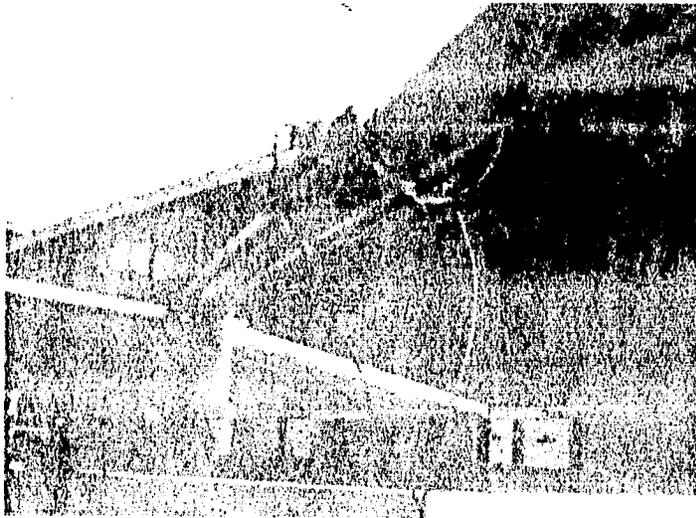


Figura 4.9. Vista inferior de los rieles de sujeción empleados en la colocación de los sensores del medidor "CONTROLTRON".

4.3.2.3. Medidor ultrasónico marca "BADGER METER, INC."

Antes de iniciar las pruebas y con la colaboración del personal técnico de la empresa "Badger Meter, Inc." División Industrial se calibró el medidor a las condiciones existentes dentro de la tubería con el propósito de obtener un error de medición lo más pequeño posible.

La calibración para este dispositivo es parecida al del *Controlotron*, con la diferencia de que este medidor no requiere de ningún aditamento especial; basta con colocar los sensores del equipo en una tubería llena de agua (pero sin movimiento) y verificar en su pantalla que el valor registrado para el gasto sea cero.

La ficha técnica proporcionada para este equipo, indica los lineamientos que se deben seguir al colocarlo sobre la tubería en que se obtendrá el gasto.

Considerando que las mejores condiciones de medición se logran cuando la tubería trabaja a tubo lleno, se optó por colocar el medidor en una vertical (fig. 4.10). Los datos que reflejan las características de la tubería se requieren para programar el medidor, todos estos valores fueron obtenidos durante el desarrollo de las pruebas con los anteriores equipos, por lo que la programación ya no representó ningún problema.

Este medidor al igual que el ultrasónico marca *Controlotron* puede colocarse sobre la tubería no importando si existe recubrimiento. para tener las mejores condiciones de medición se eliminó la pintura de recubrimiento y se limpió la tubería hasta descubrir el material de que esta hecha (fig. 4.11).

No fue posible conseguir un almacenador de datos para este equipo, por lo que el valor del gasto se tomó como lectura directa en la carátula del cuadro de despliegue de datos del medidor.



Figura 4.10. Sensores del medidor 'BADGER', colocados en un arreglo en 'V', montados sobre sus rieles de sujeción



Figura 4.11. Preparación de la tubería para la colocación de los sensores

La colocación de los sensores se realizó por medio de rieles. El acomodo más adecuado, así como la distancia en los rieles lo proporciona el medidor. En este caso se requirió un arreglo en "V", por lo que sólo se necesitó un riel para montar los dos transductores.

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DE RESULTADOS

CAPITULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. CONSIDERACIONES GENERALES

Para comparar el gasto registrado con cada uno de los medidores y el obtenido con la ayuda del vertedor triangular se calculó el error absoluto, el error relativo y la precisión. En todos los casos se consideró como valor real del gasto al aforado con el vertedor triangular.

Después de obtener los valores correspondientes de error relativo y precisión, se construyeron tres tipos de gráficas para cada medidor:

- *Gráfica del error relativo*: para construirla se trabajó con la columna de valores del error relativo, obteniéndose su valor promedio (\bar{x}) y su desviación estándar (σ). Posteriormente, con esta información se establecieron rangos de $\bar{x} \pm n_{\text{MTB}} \sigma$. Por último, se colocaron las coordenadas $Qv-E_R$ para observar la distribución de los datos en dichos rangos.
- *Carta de control de calidad (precisión)*: en esta gráfica se colocaron los valores de precisión obtenidos para cada valor de gasto, marcando nuevamente los rangos $\bar{x} \pm n_{\text{MTB}} \sigma$ para obtener la distribución de los datos en estos rangos.
- *Correlación $Qm_i - Qv$* : en este caso se trazó una línea ideal a 45° . Después se colocaron los gastos obtenidos con el medidor y la recta correspondiente a su correlación. En esta gráfica se puede observar la tendencia del registro del medidor ya que aparecen indicadas las zonas de *submedición* y *sobremedición*.

Los valores utilizados en la elaboración de las gráficas aparecen después de las tablas de datos de cada medidor.

5.1.1. PRECISIÓN Y ERROR RELATIVO

Se entenderá a la precisión relativa como la relación porcentual entre el gasto registrado por el medidor (Q_m) y el gasto del vertedor triangular (Q_v).

$$P = \frac{Q_m}{Q_v} \cdot 100, \quad [\%] \quad 5.1$$

Por ejemplo, si se tienen valores de $Q_m=23.45$ y $Q_v=21.47$ su precisión será:

$$P = \frac{Q_m}{Q_v} \cdot 100 = \frac{23.45}{21.47} \cdot 100 = 109.22\%$$

Como se observa el valor rebasa el 100%. En este caso se dice que el medidor está *sobre-midiendo*, es decir, registra más agua de la que realmente está circulando por la tubería.

En un caso contrario, en que se tenga un $Q_m=19.32$ y un $Q_v=21.47$ la precisión del medidor será:

$$P = \frac{Q_m}{Q_v} \cdot 100 = \frac{19.32}{21.47} \cdot 100 = 89.99\%$$

El valor obtenido es inferior a 100% por lo que se considera que el medidor está *sub-midiendo*, o sea, registrando menos caudal del que circula por la estructura.

Para el cálculo del error absoluto y relativo se emplearon las siguientes expresiones:

$$|E_A| = Q_m - Q_v \quad 5.2$$

Donde:

E_A = Error absoluto

Q_m = Gasto en el medidor

Q_v = Gasto en el vertedor

$$E_R = \frac{(Q_m - Q_v)}{Q_v} \cdot 100 \quad 5.3$$

Donde:

E_R = Error relativo en porcentaje

Q_m = Gasto en el medidor

Q_v = Gasto en el vertedor

En forma similar a la interpretación de la precisión, valores de E_R positivos indican *sobre-mediciones* del medidor; mientras que valores de E_R negativos representan *sub-mediciones* del aparato.

Para la correlación, se utilizó una de tipo lineal por las características de los datos. Las expresiones utilizadas fueron (Ref. 14):

$$y = a + bx \quad 5.4$$

Donde:

$$a = \frac{(\sum y)(\sum x^2) - (\sum x)(\sum xy)}{n\sum x^2 - (\sum x)^2}$$

$$b = \frac{n\sum xy - (\sum x)(\sum y)}{n\sum x^2 - (\sum x)^2}$$

Además se calculó el *coeficiente de correlación* (r) que mide el grado de relación de los valores comparados. Entre más próximo sea su valor a la unidad es mejor.

$$r = \frac{n\sum xy - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n\sum x^2 - (\sum x)^2][n\sum y^2 - (\sum y)^2]}} \quad 5.5$$

5.2 DESARROLLO DE LAS EVALUACIONES Y RESULTADOS

5.2.1 MEDIDOR PORTÁTIL DE INSERCIÓN DE TIPO ELECTROMAGNÉTICO MARCA "MARSH-MCBIRNEY, INC. (FLO-TOTE)"

TABLA 5.1. RESULTADOS OBTENIDOS CON EL MEDIDOR
"MARSH-MCBIRNEY, INC. (FLO-TOTE)"

PRUEBA	Q Vertedor (l/s)	Q Medidor (l/s)	E _A	E _R (%)	PRECISIÓN (%)
1	3.93	4.59	0.66	16.79	116.79
2	6.14	6.24	0.10	1.63	101.63
3	8.16	9.55	1.39	17.03	117.03
4	12.17	14.35	2.18	17.91	117.91
5	15.73	16.65	0.92	5.85	105.85
6	19.34	21.64	2.30	11.89	111.89
7	21.39	25.03	3.56	16.58	116.58
8	22.39	20.28	2.11	-9.42	90.58

- Datos para la gráfica del error relativo:

$$\bar{x} = 9.783$$

$$\sigma = 9.145$$

- Datos de la correlación:

$$y = -0.09514 + 0.93x$$

$$r = 0.9733$$

GRAFICA DEL ERROR RELATIVO

Medidor de inserción (FLO-TOTE)

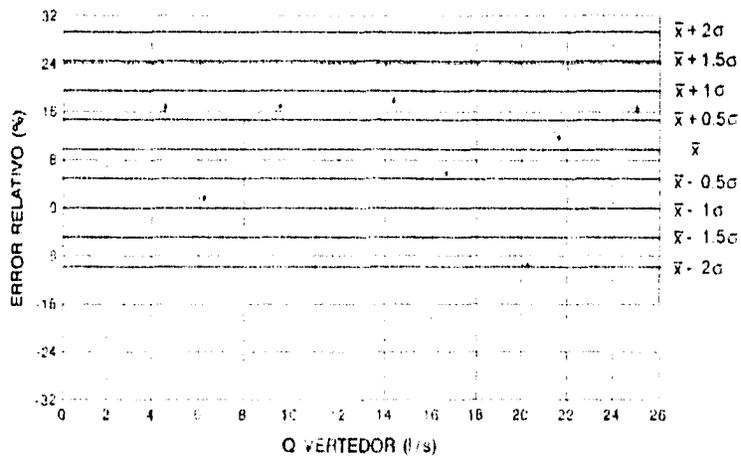


Figura 5.1. Gáfica del Error Relativo para el medidor "FLO-TOTE".

CARTA DE CONTROL DE CALIDAD (PRECISION)

Medidor de inserción (FLO-TOTE)

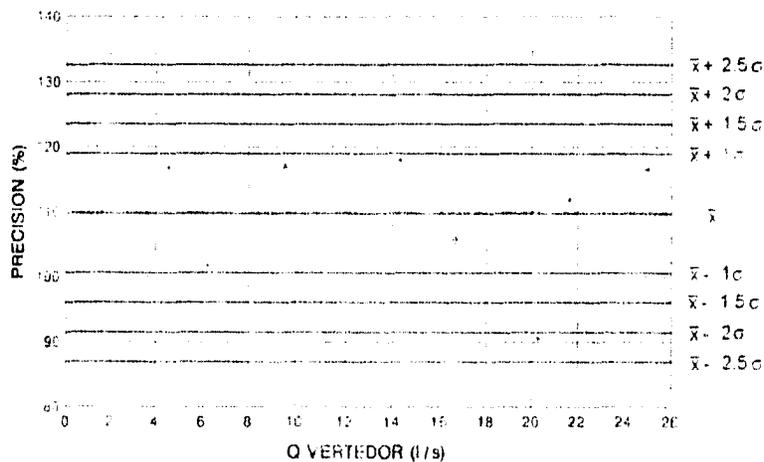


Figura 5.2. Carta de Control de Calidad para el medidor "FLO-TOTE".

CORRELACION Q_{mi} - Q_v

Medidor de inserción (FLO-TOTE)

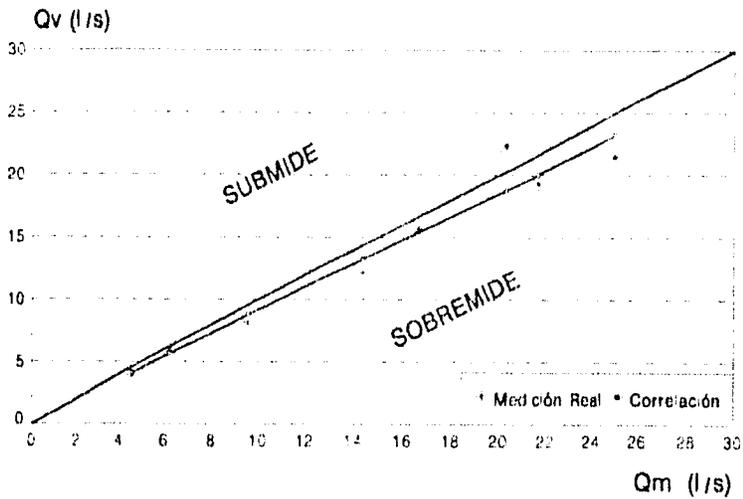


Figura 5.3. Gráfica de Correlación del medidor "FLO-TOTE".

5.2.2 MEDIDOR PORTÁTIL DE TIPO ULTRASÓNICO POR TIEMPO EN TRÁNSITO
MARCA "CONTROLOTRON, MODELO UNIFLOW"

TABLA 5.2. RESULTADOS OBTENIDOS CON EL MEDIDOR
"CONTROLOTRON, MODELO UNIFLOW"

PRUEBA	Q _{Vertedor} (l/s)	Q _{Medidor} (l/s)	E _A	E _R (%)	PRECISIÓN (%)
1	1.75	1.58	0.17	-9.71	90.29
2	3.03	3.07	0.04	1.322	101.32
3	6.14	5.13	1.01	-16.45	83.55
4	7.91	7.75	0.16	-2.02	97.98
5	9.76	8.79	0.97	-9.94	90.06
6	12.17	11.08	1.09	-8.96	91.04
7	12.83	10.68	2.15	-16.76	83.24
8	15.73	13.63	2.10	-13.35	96.65
9	17.95	14.89	3.06	-17.05	82.95
10	19.34	16.79	2.55	-13.19	86.81
11	21.47	19.32	2.15	-10.01	89.99
12	22.39	22.92	0.53	2.37	102.37
13	22.69	20.61	2.08	-9.17	90.83

- Datos para la gráfica del error relativo:

$$\bar{x} = -9.455$$

$$\sigma = 6.46$$

- Datos de la correlación:

$$y = 0.510 + 1.066x$$

$$r = 0.9897$$

GRAFICA DEL ERROR RELATIVO

Medidor ultrasónico (CONTROLOTRON)

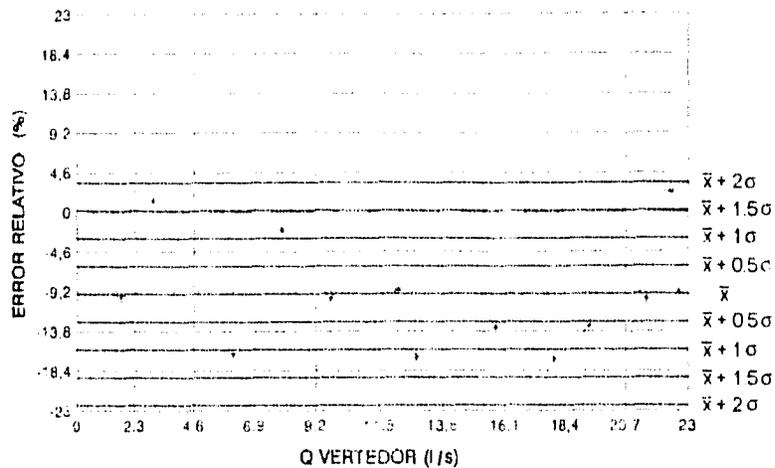


Figura 5.4. Gráfica de Error Relativo para el medidor "CONTROLOTRON"

CARTA DE CONTROL DE CALIDAD (PRECISION)

Medidor ultrasónico (CONTROLOTRON)

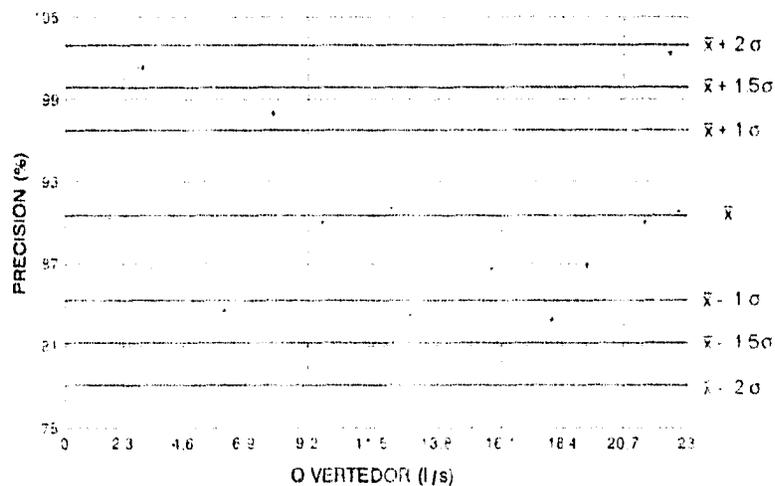


Figura 5.5. Carta de Control de Calidad para el medidor "CONTROLOTRON"

CORRELACION $Q_m - Q_v$

Medidor Ultrasónico (CONTROLOTRON)

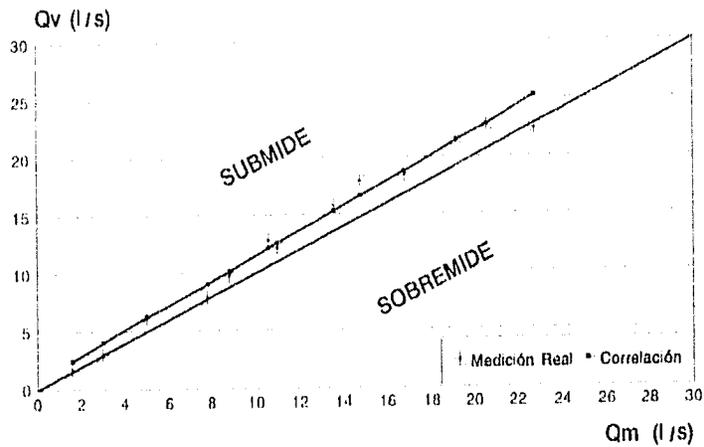


Figura 5.6. Gráfica de Correlación del medidor "CONTROLOTRON".

5.2.3. MEDIDOR PORTÁTIL DE TIPO ULTRASÓNICO POR TIEMPO EN TRÁNSITO MARCA "BADGER MODELO COMPUSONIC 4500-12"

TABLA 5.3. RESULTADOS OBTENIDOS CON EL MEDIDOR "BADGER, MODELO COMPUSONIC 4500-12"

PRUEBA	Q Verificador (l/s)	Q Medidor (l/s)	E _A	E _R (%)	PRECISIÓN (%)
1	1.41	1.76	0.35	24.82	124.82
2	2.27	2.62	0.35	15.42	115.42
3	2.39	2.65	0.26	10.88	110.88
4	3.29	3.73	0.44	13.37	113.37
5	3.72	3.74	0.02	0.54	100.54
6	4.46	4.84	0.38	8.52	108.52
7	5.12	4.91	0.21	-4.10	95.90
8	6.01	6.10	0.09	1.50	101.50
9	6.31	5.78	0.53	-8.40	91.60
10	7.56	7.49	0.07	-0.93	99.07
11	8.39	7.68	0.71	-8.46	91.54
12	8.59	8.48	0.11	-1.28	98.72
13	10.25	8.91	1.34	-13.07	86.93
14	10.51	10.27	0.24	-2.28	97.72
15	10.61	9.23	1.33	-13.01	86.99
16	11.83	11.18	0.65	-5.49	94.51
17	13.32	12.79	0.53	-3.98	96.02
18	13.46	11.68	1.79	-13.22	86.78
19	15.12	14.27	0.65	-5.62	94.38
20	15.54	13.39	2.15	-13.84	86.16
21	16.88	14.5	2.38	-14.10	85.90
22	17.33	15.66	1.67	-9.64	90.36
23	18.98	17.28	1.70	-8.96	91.04
24	18.42	16.51	2.91	-14.98	85.02

- Datos para la gráfica del error relativo:

$$\bar{x} = -2.763$$

$$\sigma = 10.612$$

- Datos de la correlación:

$$y = -0.7675 + 1.1585 x$$

$$r = 0.9966$$

GRAFICA DEL ERROR RELATIVO

Medidor Ultrasónico (BADGER)

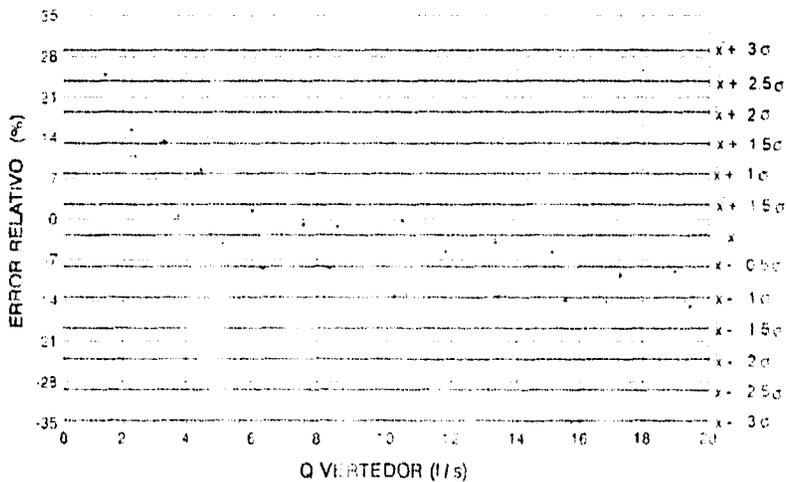


Figura 5.7. Gráfica del Error Relativo para el medidor "BADGER".

CARTA DE CONTROL DE CALIDAD (PRECISION)
 Medidor Ultrasónico (BADGER)

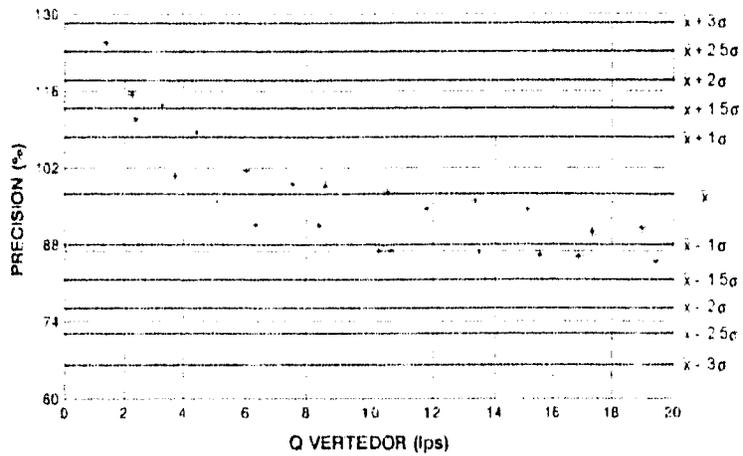


Figura 5.8. Carta de Control de Calidad para el medidor "BADGER".

CORRELACION Q_{mi} - Q_v
 Medidor Ultrasónico (BADGER)

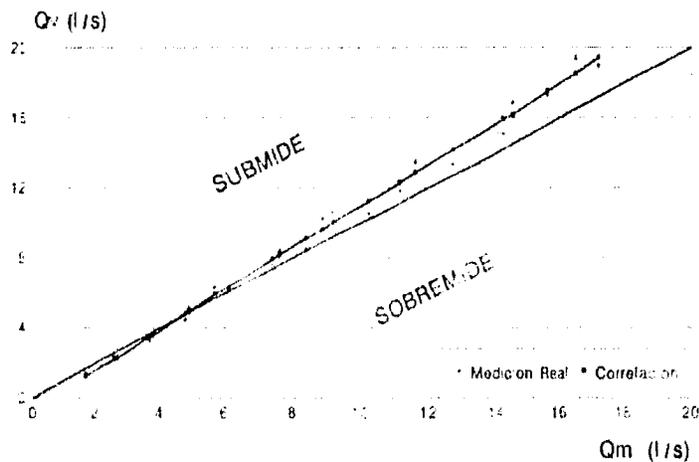


Figura 5.9. Gráfica de Correlación del medidor "BADGER".

5.3 RESUMEN COMPARATIVO

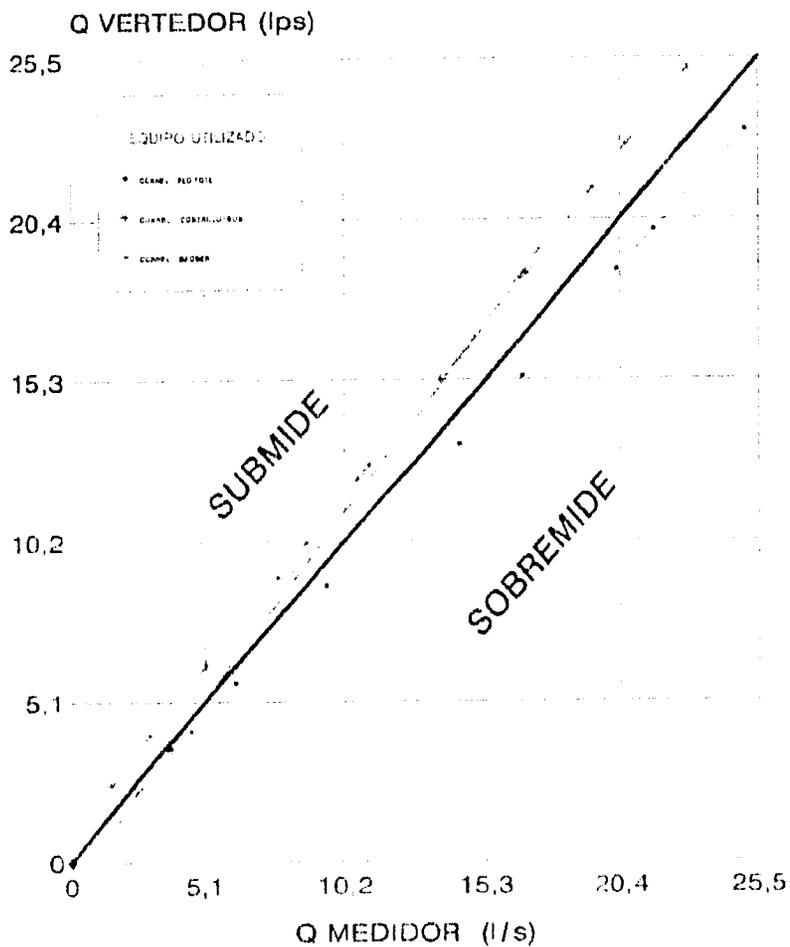
CURVA DE CORRELACION ENTRE
EL VERTEDEDOR Y LOS MEDIDORES

Figura 5.10. Comparación de los resultados de la correlación entre el gasto de los medidores y el gasto aforado con ayuda del vertedor triangular

En esta gráfica se observa una recta de 45° , los valores de gasto que la forman poseen una precisión del 100% (o un error relativo de 0%). Se presentan también las correlaciones realizadas para cada uno de los medidores, las cuales se pueden comparar contra la recta de precisión ideal.

Esta línea a 45° divide en dos zonas a la gráfica. En la parte superior se encuentran los valores de *sub-medición* de los medidores. En la parte inferior se alojan los datos de *sobre-medición*.

Para una mejor interpretación de las gráficas de error relativo, precisión y correlación, se elaboró la tabla 5.4. En ella se hace una comparación entre los tres medidores mediante sus rangos de caudales, a los cuales se asocia un intervalo de precisión y de error relativo.

Están contenidos también las ecuaciones de correlación y los coeficientes de determinación.

Esta comparación permite entender mejor los datos presentados en las cartas de calidad de que cada uno de los medidores se presenta.

En la tabla se observa que el medidor con los tamaños de rango más pequeños es el *Controlotron*, seguido por el *Flo-tote*, quedando último el ultrasónico de *Badger*. Asimismo, el *Controlotron* posee el rango de caudales más amplio.

Sin embargo se ve también la tendencia de este medidor a la *sub-medición* y del de inserción a la *sobre-medición*.

TABLA 5.4. RESUMEN COMPARATIVO DE VALORES

MEDIDOR	ECUACIÓN DE CORRELACIÓN $y=11+bx$	COEF. DE DETERMINACIÓN	\bar{x}	σ	RANGO	PRECISIÓN (%)	ERROR (%)	TAMAÑO DE RANGO	RANGO CAUDALES (Us)
FLO-TOTE	$y=-0.0951+0.93x$	0.9733	9.783	9.145	$\bar{x} \pm \sigma$	119 - 101	+19 ; +1	18	3.5 - 22.5
					$\bar{x} \pm 1.5\sigma$	123.5 - 96	+23.5 ; -4	27.5	3.5 - 22.5
					$\bar{x} \pm 2\sigma$	128.5 - 91.5	+28.5 ; -8.5	37	3.5 - 22.5
CONTROLOTRON	$y=0.510+1.066x$	0.9898	-9.455	6.461	$\bar{x} \pm \sigma$	97 - 84	-3 ; -16	13	1.5 - 23
					$\bar{x} \pm 1.5\sigma$	100.5 - 81	+0.5 ; -19	19.5	1.5 - 23
					$\bar{x} \pm 2\sigma$	103.5 - 78	+3.5 ; -22	25.5	1.5 - 23
BADGER	$y=-0.767+1.1585x$	0.9966	-2.763	10.611	$\bar{x} \pm \sigma$	108 - 86.5	+8 ; -13.5	21.5	3.5 - 19
					$\bar{x} \pm 1.5\sigma$	113.5 - 81	+13.5 ; -19	32.5	2.3 - 19
					$\bar{x} \pm 2\sigma$	118.5 - 76	+18.5 ; -24	42.5	2 - 19
					$\bar{x} \pm 3\sigma$	129.5 - 65	+29.5 ; -35	64.5	1.4 - 19

5.3.2. PROBABILIDAD ASOCIADA CON LA PRECISIÓN

Se observó que era posible realizar una comparación desde el punto de vista probabilístico con los datos, mediante el uso de algún modelo de distribución de probabilidad.

Los modelos normales y logarítmicas recibieron una atención especial, ya que proporcionan un buen ajuste en los casos en que se dispone de pocos datos acerca de un fenómeno y es determinante tomar decisiones sobre el mismo.

Se seleccionó el modelo de distribución de probabilidad de Kolmogorov-Smirnov (K-S) para evaluar la confiabilidad de los medidores. La expresión matemática de dicho modelo es:

$$F(x_i) = \frac{(i - \frac{1}{2})}{(N + \frac{1}{2})} \quad 5.3$$

Donde .

i = posición del valor i -ésimo más grande observado de las precisiones registradas por cada medidor .

N = tamaño de la muestra.

Los valores de $F(x_i)$ se graficaron en papel para distribuciones de probabilidad contra los valores correspondientes de la precisión, posteriormente, se ajustaron estos valores a una línea recta. Para obtener de ella finalmente las probabilidades buscadas. El procedimiento de cálculo se menciona a continuación:

- a) Para el conjunto de datos de un mismo medidor, enlistar los valores de las precisiones de mayor a menor.
- b) Calcular los valores de la probabilidad de acuerdo a la expresión matemática ya señalada.

- c) Graficar en papel para distribuciones de probabilidad K-S. Hacer su ajuste por mínimos cuadrados y unir los puntos que formen una recta.
- d) De las intercepciones de la recta determinar el % que resulta de fijar el rango para el cual se considera que un medidor es preciso, es decir, de 98% y el 101%.

Con los datos obtenidos de las gráficas se elaboró el resumen presentado en la tabla 5.5, en la cual aparece un segundo rango ampliando el margen de precisión requerido.

TABLA 5.5 PROBABILIDAD DE LA PRECISIÓN DE LOS MEDIDORES.

MEDIDOR	PRECISIÓN		P R O B A B I L I D A D
	95% < P < 105%	98% < P < 101%	
FLO-TOTE	30	8	
CONTROLTRON	29	11	
BADGER 4500-12	30	10	

De la tabla se observa que:

- La probabilidad de encontrar en el medidor de punta de inserción electromagnética en una precisión entre el 98 y el 101% es de 8%.
- La probabilidad de encontrar en el medidor ultrasónico *Controltron* una precisión entre el 98 y el 101% es de 11%.
- La probabilidad de encontrar en el medidor ultrasónico de *Badger*, el *Compusonnic 4500-12* una precisión entre el 98 y el 101% es de 10%.

Figura 5.11. Precisión esperada del medidor FLO-TOTE

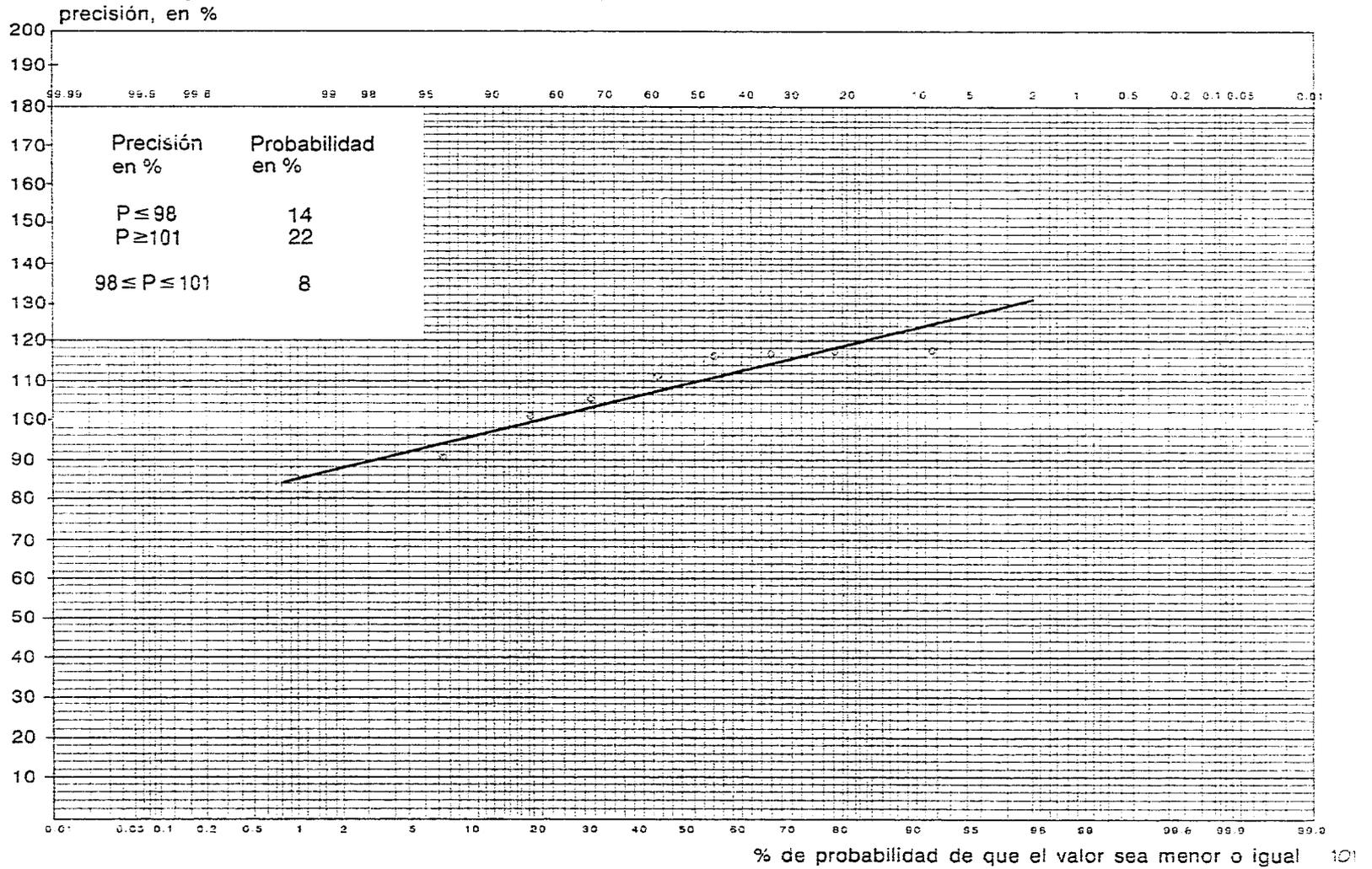


Figura 5.12. Precisión esperada del medidor CONTROLOTRON

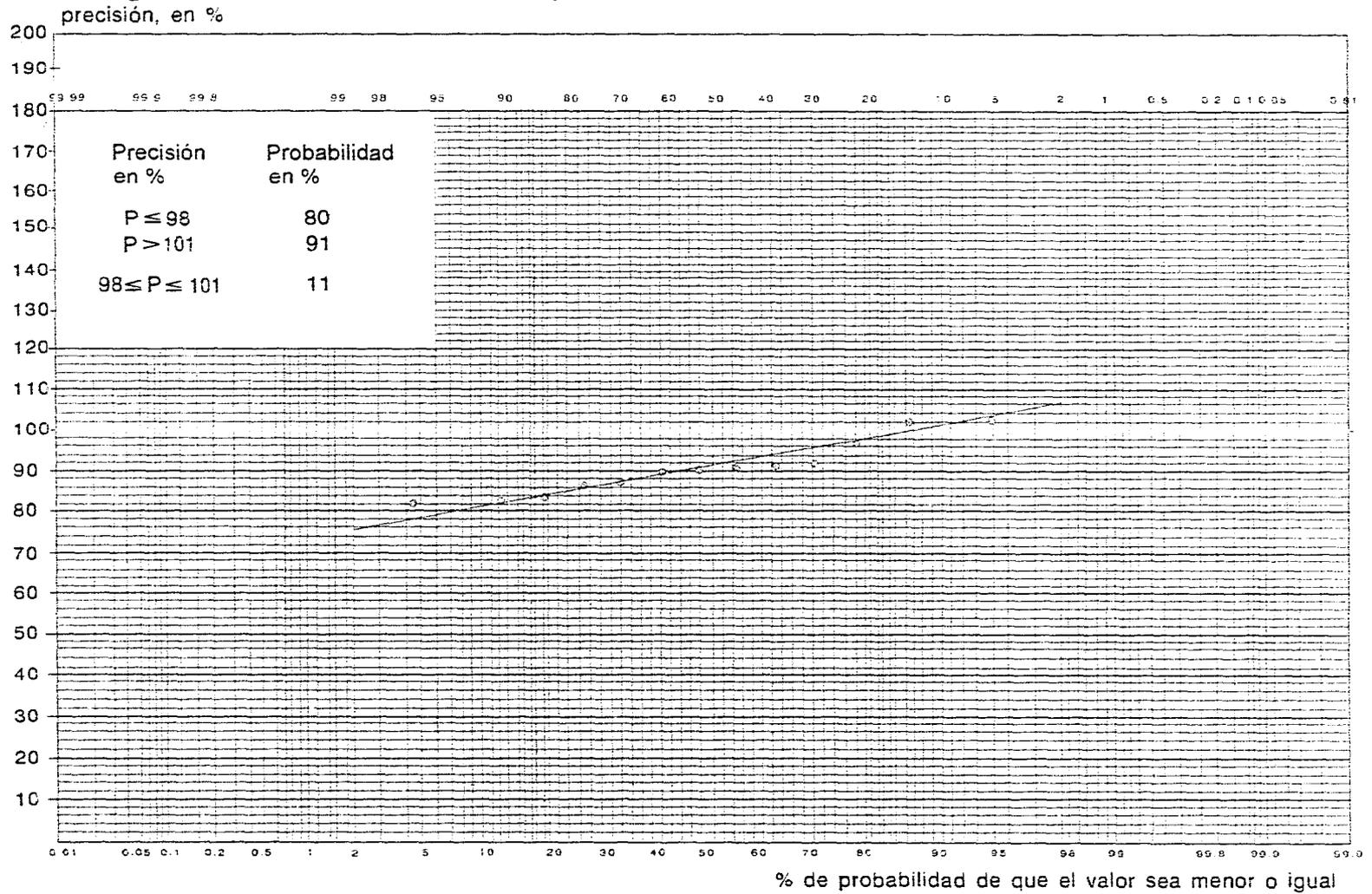
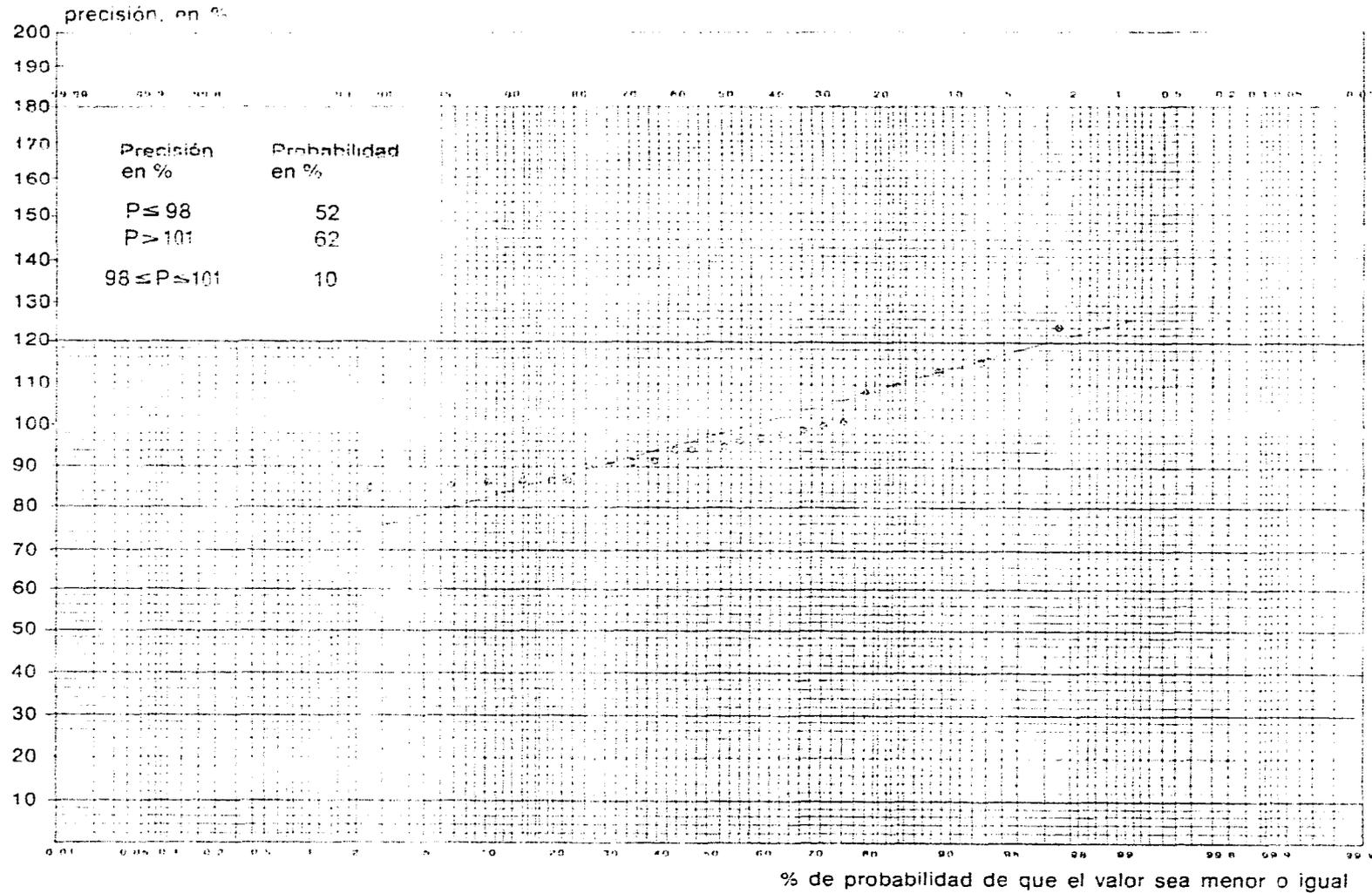


Figura 5.13. Precisión esperada del medidor BADGER COMPUSONIC



CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES

CAPITULO 6. CONCLUSIONES

De la información obtenida de las gráficas de precisión, cartas de control de calidad y de la probabilidad asociada a la precisión, se presentan las siguientes conclusiones:

- Del análisis de correlación de datos puede verse que el medidor ultrasónico de *BADGER* presentó un coeficiente de determinación mayor que el de los otros dos medidores. En segundo lugar estuvo el medidor ultrasónico *CONTROLOTRON*; quedando al último el medidor de punta electromagnética *FLO-TOTE*. Sin embargo, la diferencia en dichos valores no es significativa, ya todos resultaron muy cercanos a la unidad y mayores a 0.94.
- De la gráfica comparativa de correlaciones, se puede notar un favorable comportamiento por parte del medidor *CONTROLOTRON*, ya que los registros de éste, en relación con los del vertedor, forman una recta en su correlación casi paralela a una de 45°, mientras que las rectas de *BADGER* y *FLO-TOTE* se van separando conforme aumentan los valores del gasto.
- Del análisis de las gráficas de control de calidad se observa que el equipo *CONTROLOTRON* tiene un comportamiento mejor que el *BADGER* y el *FLO-TOTE*. Para el rango de caudales que presenta y los errores asociados con los mismos

El análisis probabilístico colocó al medidor *CONTROLOTRON* con una ligera ventaja sobre los demás, sin embargo la diferencia no es muy determinante.

Observando la información anterior encontraremos que ninguno de los medidores cumple con las precisiones que los fabricantes señalan en sus catálogos, es decir, en ningún caso se cumple que los registros queden comprendidos en el rango de precisión 98 y el 101% .

S. bien es cierto que el *CONTROLOTRON* presentó una mayor probabilidad de que sus valores estuvieran en ese intervalo, al observar su gráfica de correlación se encuentra su tendencia a *sub-medir*, mientras que el *FLO-TOTE* se inclina hacia la *sobre-medición*. Por su parte el medidor *BADGER* atraviesa la recta de 45° por lo que para ciertos registros cumple con el rango de precisión solicitado, siendo el único de los tres en lograrlo.

Otra posibilidad que surge al observar estas gráficas es la de tener una mala calibración para el medidor *CONTROLOTRON* o el *FLO-TOTE*, que si se lograra mejorar contribuiría a un registro más exacto de los gastos.

Por lo tanto, si tuviera que elegirse una de las tres tecnologías el análisis global de los datos favorecería al medidor de *CONTROLOTRON*. Pero para el caso de que los gastos a medir estuvieran en el rango de 3.7 a 8.6 l/s indudablemente que la mejor opción sería el ultrasónico de *BADGER*. Sin embargo todo dependerá del uso al que se destine el medidor.

**REFERENCIAS
BIBLIOGRÁFICAS**

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. RUSSELL, George E.
"Hidráulica".
Ed. Continental S.A. de C.V.
México, D.F., 1982
Capítulo. 8

2. MATAIX, Claudio P.
"Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas".
Ed. Harla S.A. de C.V.
México D.F., 1982
Capítulos 4-8

3. SOTELO, Gilberto.
"Hidráulica General".
Volumen 1. Fundamentos
Ed. Limusa S.A.
México D.F. 1987
Capítulos 2-4, 7 y 8

4. CARLIN, Benson.
"Ultrasónica"
Ed. Urmo S.A.
España 1982
Capítulos 1 y 11

-
5. STOLLBERG, Robert y HILL, Faith.
"Física". Fundamentos y fronteras
Ed. Publicaciones Cultural S.A.
México, D.F., 1974

 6. CHEREMINISINOFF, Nicholas P.
"Applied fluid flow measurement". Fundamentals and technology.
New Jersey Institute of Technology Newark, New Jersey
Ed. Marcel Dekker, Inc
New York, USA 1970
Capítulos 2-6

 7. AWWA, American Water Works Association.
"Flowmeters and Water Supply"
Manual M33
USA
Capítulo 3

 8. ESTRADA, Oscar y OROZCO Mario
"Control hidráulico de sistemas de medición en tomas domiciliarias"
Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería UNAM.
México, D.F., 1995
Capítulos 3-5

 9. ROBERSON, G.
"Mecánica de Fluidos".
México, D.F., 1982
Capítulos 5 y 6

 10. MARSH McBIRNEY Inc.
"Technical Bulletin Model 280 Insertable Electromagnetic Flowmeter"
USA.
-

11. CONTROLTRON

"System 990 Uniflow Universal Transit-time Clamp-On Ultrasonic Flowmeter. "

Boletín técnico

New York, USA.

12. BADGER METER

"Compu-sonic Flowmeter. Closed pipe"

Badger Meter Instruction Manual

Industrial Division, Technical Brief Compu-sonic series 4000 Transit Time Ultrasonic Flowmeter.

Tulsa, USA. 1994

13. GRIÑAN, A.

"El Funcionamiento Hidráulico del Laboratorio de Hidráulica de la Facultad de Ingeniería UNAM"

Tesis de Licenciatura. Facultad de Ingeniería, UNAM.

México D.F., 1986.

14. SPIEGEL, Murray

"Estadística"

Ed. McGraw-Hill

Madrid, España 1990

Capítulo 10, 13 y 14