



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

MEDIDORES DE FLUJO EN TUBERÍAS A PRESIÓN

Carlos Enrique Castillo de Paz

Asesorado por el Ing. Carlos Salvador Gordillo

Guatemala, enero de 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

MEDIDORES DE FLUJO EN TUBERÍAS A PRESIÓN

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

CARLOS ENRIQUE CASTILLO DE PAZ
ASESORADO POR EL ING. CARLOS SALVADOR GORDILLO GARCÍA

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL

GUATEMALA, ENERO DE 2011

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
VOCAL I	Ing. Alfredo Beber Aceituno
VOCAL II	Inga. Alba Maritza Guerrero Spínola de López
VOCAL III	Ing. Miguel Ángel Dávila Calderón
VOCAL IV	Br. Luis Pedro Ortíz de León
VOCAL V	P.A. José Alfredo Ortíz Herincx
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXÁMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympo Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Juan Ramón Ordóñez Pérez
EXAMINADOR	Ing. Joel Eduardo Guerrero Hernández
EXAMINADOR	Ing. Crecencio Benjamín Cifuentes Spínola
SECRETARIA	Inga. Marcia Ivonne Véliz Vargas

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS
DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERIA

Guatemala, 19 de Octubre de 2010

Ingeniero
Pedro Aguilar Polanco
Jefe Departamento de Hidráulica
Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería

Ingeniero Aguilar:


Atentamente le informo que he revisado el Trabajo de Graduación del estudiante universitario **Carlos Enrique Castillo de Paz**, carné 2004-13713, denominado "**Medidores de Flujo en Tuberías a Presión**", habiéndose desarrollado según el protocolo aprobado.

Deseo manifestar que el estudiante Castillo de Paz ha llenado las expectativas de este trabajo, permitiéndole rebasar las conclusiones y recomendaciones esperadas, por lo que en mi calidad de asesor lo doy por aprobado y le solicito darle el trámite correspondiente.

Sin otro particular me es grato saludarle,

Deferentemente,

"Id y enseñad a Todos"



Ing. Carlos Salvador Gordillo
Asesor de Tesis



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



Guatemala,
19 de noviembre de 2010


Ingeniero
Flujo Leonel Montenegro Franco
Director de la Escuela de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Guatemala

Estimado Ingeniero Montenegro,

Atentamente y por este medio, envío a usted, el trabajo de graduación desarrollado por el estudiante Carlos Enrique Castillo de Paz, titulado **MEDIDORES DE FLUJO EN TUBERÍAS A PRESIÓN**.

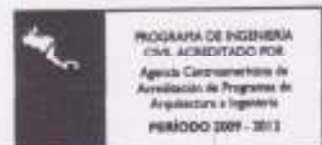
Por lo que, habiendo cumplido con los objetivos y los requisitos de ley del referido trabajo; y existiendo la **APROBACIÓN DE MI MISMO**, por parte del Asesor Ing. Carlos Salvador Gordillo García y habiéndose efectuado todas las observaciones técnicas, el suscrito lo da por **APROBADO**, solicitándole darle el trámite respectivo.

¡DÉJENLO Y ENSEÑEN A TODOS!


Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Jefe del Departamento de Hidráulica
Escuela de Ingeniería Civil

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO
DE
HIDRÁULICA
USAC

Más de **130 años** de Trabajo Académico y Mejora Continua





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



El Director de la Escuela de Ingeniería Civil, después de conocer el dictamen del Asesor Ing. Carlos Salvador Gordillo y del Coordinador del Área del Departamento de Hidráulica Ing. Pedro Aguilar Polanco, al trabajo de graduación del estudiante Carlos Enrique Castillo de Paz, titulado MEDIDORES DE FLUJO EN TUBERÍAS A PRESIÓN, da por este medio su aprobación a dicho trabajo.



Ing. Hugo Leonel Montenegro Franco



FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECTOR
USAC

Guatemala, enero de 2011

/bbdeb.

Universidad de San Carlos
de Guatemala



Facultad de Ingeniería
Decanato

DTG. 012.2011

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Civil, al Trabajo de Graduación titulado: **MEDIDORES DE FLUJO EN TUBERÍAS A PRESIÓN**, presentado por el estudiante universitario **Carlos Enrique Castillo de Paz**, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:

Ing. Murphy Olimpo Paiz Recinos
Decano

Guatemala, 21 de enero de 2011

/gdech



HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

Cumpliendo con los preceptos que establece la Ley Orgánica de Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

MEDIDORES DE FLUJO EN TUBERÍAS A PRESIÓN,

tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Ingeniería Civil, con fecha 9 de noviembre de 2009.

CARLOS ENRIQUE CASTILLO DE PAZ

ACTO QUE DEDICO A:

Mi padre

Jaime Higinio Castillo Santos, quien me ha dado su apoyo incondicional en todo momento, gracias a su carácter y entereza se ha convertido en la persona más importante de mi vida.

Mi madre

Magda Leticia de Castillo, a quien nunca podre pagar todos sus desvelos, ni aun con las riquezas más grandes del mundo, porque gracias a su apoyo y consejo he llegado a realizar la más grande de mis metas.

Mis hermanos

Rosario del Carmen y Javier Eduardo, quienes representan un motivo para seguir adelante y me inspiran para tratar de influir de manera positiva en sus vidas.

Mi tío

Francisco Monterroso (Q.D.E.P.), por ser un ejemplo a seguir en mi vida, por ser una de las personas que me enseñó el camino a seguir con su ejemplo y amor hacia las demás personas.

Mi tía

Judith De Sosa, con mucho cariño y agradecimiento.

Mis abuelos

Por darles la vida a los mejores padres del mundo.

AGRADECIMIENTO ESPECIAL A:

DIOS	Por haberme dado la vida, fuerzas y muchas ganas para ser alguien en la vida y por acompañarme siempre.
MIS PADRES	Por su amor, comprensión y apoyo durante esta carrera llamada vida.
MIS HERMANOS	Por todos los momentos que hemos compartido juntos. Que mi logro sea un ejemplo y sirva como una fuente de inspiración para poder alcanzar sus metas.
MI CUÑADO Y SU FAMILIA	Por toda su ayuda incondicional, cariño y apoyo, gracias de todo corazón.
MI NOVIA	Lucia Urizar, gracias por su amor, apoyo, comprensión, paciencia y cariño.
MI FAMILIA EN GENERAL	Por ayudarme siempre y en todos los momentos, por inculcarme siempre el estudio.
MI ASESOR	Ing. Carlos Salvador Gordillo García, por la asesoría de mi trabajo de graduación, pero sobre todo, gracias por ser un amigo.

AMIGOS Y COMPAÑEROS

Edgar Clara, Jaime Toj, Juan Orozco Byron Miranda, Cristóbal Tumax, Héctor Barreda, Julio Ruiz, Carlos Lickes, Julio Armas, Daniel Say, Rolmy Salguero, Jorvin Diéguez, Hugo Gálvez, Alejandro Valle, Alejandro Dávila, Luis Pedro Herrera, Daniel Barrera, Gianni Monterroso, Juan David Ramos, Daniel Gonzales, Camilo, Luis Fernando Barrera, Adrián Barrilas. Porque juntos compartimos ideas, inquietudes, alegrías, tristezas y por todas las vivencias que nos quedan por delante.

CATEDRATICOS

Por sus conocimientos que día a día impartieron durante las diferentes etapas de mis estudios.

TOPOGRAFÍA GONZALEZ

Por el aprendizaje obtenido y los gratos momentos compartidos.

MUNICIPALIDAD DE MIXCO

Por todos los conocimientos adquiridos y los gratos momentos en la unidad de planificación y diseño.

LA FACULTAD DE INGENIERÍA

Por formarme como profesional.

LA UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA

Por ser el templo del conocimiento.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	XI
GLOSARIO	XIII
RESUMEN	XV
OBJETIVOS	XVII
INTRODUCCIÓN	XIX
1. MEDICIÓN DE FLUJO	1
1.1. Medición de flujo	1
1.2. Tipos de flujo	1
1.2.1. Flujo volumétrico	2
1.2.2. Flujo másico	5
1.2.3. Flujo en peso	6
1.3. Leyes básicas en el movimiento de los fluidos	7
1.3.1. Ley de conservación de masa	7
1.3.2. Ecuación de continuidad	8
1.3.3. Ecuación de la cantidad de movimiento lineal	10
1.4. Primer principio de la termodinámica	11
1.4.1. Ecuación de Bernoulli	11
1.4.2. Formas de flujo	15
1.4.2.1. Flujo laminar	15
1.4.2.2. Flujo turbulento	16
1.4.2.3. Flujo permanente	17
1.5. Presión en un fluido	18
1.5.1. Presión estática	18
1.5.2. Presión dinámica	19

1.6. Factores que afectan la medición de caudales	20
1.6.1. Presión disponible	20
1.6.2. Exactitud requerida	21
1.6.3. Material	21
1.6.4. Tipo de flujo	21
1.6.5. Sensibilidad	22
2. MEDIDORES DE FLUJO EN TUBERÍAS A PRESIÓN	23
2.1. Definición	23
2.2. Tipos de medidores de flujo	23
2.2.1. Tobera	23
2.2.2. Codos	25
2.2.3. Flujómetro	26
2.2.4. Vertederos	27
2.2.4.1. Tipos de vertederos	27
2.2.4.2. Características	28
2.2.4.3. Vertedero rectangular	29
2.2.4.3.1. Características	29
2.2.4.4. Vertedero triangular	33
2.2.4.4.1. Características	33
2.2.4.5. Vertedero trapezoidal	35
2.2.4.6. Consideraciones generales sobre la instalación de los vertederos	36
2.2.5. Canal Parshall	37
2.2.5.1. Características	37
2.2.5.2. Operación y cálculo del gasto en los canales Parshall	39
2.2.5.3. Grado de sumersión	40
2.2.5.4. Selección e instalación de los canales Parshall	40

2.2.6. Medidor de flujo por presión diferencial	41
2.2.6.1. Placa de orificio	41
2.2.6.1.1. Características	42
2.2.6.1.2. Operación e instalación	43
2.2.6.1.3. Requerimientos de instalación física	45
2.2.6.1.4. Mantenimiento	52
2.2.6.1.5. Coeficiente de descarga C_d	53
2.2.6.1.6. Factor de expansión	54
2.2.6.1.7. Ventajas y desventajas	55
2.2.6.2. Tubo Venturí	56
2.2.6.2.1. Características	56
2.2.6.2.2. Coeficiente de descarga C_d	58
2.2.6.2.3. Factor de expansión para tubos Venturí	59
2.2.6.2.4. Tubo Venturí de inserción	60
2.2.6.2.5. Aplicación y selección de las placas de orificio y tubo Venturí	61
2.2.6.2.6. Instalación del tubo Venturí	61
2.2.6.2.7. Ventajas y desventajas del tubo Venturí	62
2.2.6.3. Medidor tipo Dall	63
2.2.6.3.1. Características	63
2.2.6.3.2. Coeficiente de descarga C_d	63
2.2.6.3.3. Instalación	64
2.2.6.3.4. Ventajas y desventajas	64
2.2.7. De área variable	65
2.2.7.1. Rotámetro	65
2.2.7.1.1. Características	65
2.2.7.1.2. Aplicaciones del rotámetro	67
2.2.7.1.3. Derivación de la ecuación básica de flujo	

para rotámetros	68
2.2.7.1.4. Operación e instalación del rotámetro	73
2.2.7.1.5. Ventajas y desventajas de los rotámetros	74
2.2.8. Medidores mecánicos	75
2.2.8.1. Características	75
2.2.8.1.1. Capacidad nominal	76
2.2.8.1.2. Capacidad real	76
2.2.8.1.3. Gastos admisibles	77
2.2.8.1.4. Gasto instantáneo	77
2.2.8.2. Partes y componentes	77
2.2.8.3. Dispositivos de medida	79
2.2.8.4. Transmisión mecánica	79
2.2.8.5. Transmisión magnética	80
3. ENSAYO DE LABORATORIO: MEDIDORES DE FLUJO EN TUBERÍAS	
A PRESIÓN	83
3.1. Descripción	83
3.2. Datos de laboratorio	84
3.3. Desviación estándar en toma de datos	85
3.4. Calibración	93
3.5. Análisis de sensibilidad	118
3.6. Instructivo de practica	129
CONCLUSIONES	139
RECOMENDACIONES	141
BIBLIOGRAFÍA	143

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1	Concepto de volumen de control cuando se analiza un fluido a través de una tubería.	2
2	Ecuación de continuidad	8
3	Descripción de la ecuación de Bernoulli	14
4	Esquema de flujo laminar	16
5	Esquema de flujo turbulento	17
6	Medición de la presión estática.	19
7	Medición de la presión dinámica	20
8	Detalles de tobera	24
9	Codo y su toma de presión	25
10	Flujómetro de área variable	26
11	Tipos de vertederos	27
12	Partes de un vertedero	29
13	Vertedero rectangular	30
14	Forma de la vena líquida	31
15	Derivación de ecuación básica para vertederos rectangulares	31
16	Derivación de ecuación básica para vertederos triangulares	34
17	Derivación de ecuación básica para vertederos trapezoidales	36
18	Diagrama y dimensiones de un canal Parshall	38
19	Tipos de orificio de placa de orificio	42
20	La placa de orificio origina que la velocidad aumente	

	y por lo tanto la presión disminuye.	44
21	Relación para que se establezca flujo uniforme	47
22	Dimensiones generales de la placa de orificio	48
23	Tomas de presión a $D-D/2$	51
24	Tomas de presión a 1 pulgada	51
25	Tomas de presión en los bordes	52
26	Sección transversal del tubo Venturí	56
27	Dimensiones constructivas tubo Venturí	57
28	Coeficiente de descarga del tubo Venturí en función de R_d	59
29	Corte esquemático de un rotámetro	66
30	Fuerzas en el flotador	68
31	Medidor mecánico	78
32	Mecanismo de transmisión	80
33	Acoples magnéticos	81
34	Q_{af} contra Δh (placa de orificio)	97
35	Q_t contra Δh (placa de orificio)	99
36	Q_r contra Q_t (placa de orificio)	101
37	Q_t, Q_{af}, Q_r contra Δh (placa de orificio)	103
38	C_d contra Reynolds (placa de orificio)	105
39	Q_{af} contra Δh (tubo Venturí)	107
40	Q_t contra Δh (tubo Venturí)	109
41	Q_t contra Q_{af} (tubo Venturí)	111
42	Q_t, Q_{af}, Q_r contra Δh	113
43	Q_{af} contra Q_{rot} (Rotámetro)	115
44	Q_{af} contra Q_r (Rotámetro)	117
45	h_l contra Δh (placa de orificio)	120
46	Error contra Δh (placa de orificio)	122
47	Error contra Δh papel doble logaritmo (placa de orificio)	123
48	h_l contra Δh (tubo Venturí)	125

49	Error contra Δh (tubo Venturí)	127
50	Error contra Δh papel doble logaritmo (tubo Venturí)	128

TABLA

I	Dimensiones recomendadas para los elementos primarios	4
II	Dimensiones extremas para los elementos primarios	7
III	Posiciones de las tomas de presión.	7
IV	Tipo de instalación	8
V	Datos de aforo	12
VI	Desviación estándar placa de orificio	88
VII	Desviación estándar tubo Venturí	90
VIII	Desviación estándar rotámetro	92
IX	Qaf contra Δh (placa de orificio)	96
X	Qt contra Δh (placa de orificio)	98
XI	Qaf contra Qt (placa de orificio)	100
XII	Qt, Qaf, Qr contra Δh (placa de orificio).	102
XIII	Cd contra Reynolds (placa de orificio)	104
XIV	Qaf contra Δh (tubo Venturí)	106
XV	Qt contra Δh (tubo Venturí)	108
XVI	Qt contra Qaf (tubo Venturí)	110
XVII	Qt, Qaf, Qr contra Δh (tubo Venturí)	112
XVIII	Qaf contra Qrotámetro (rotámetro)	114
XIX	Qaf contra Qr (rotámetro)	116
XX	h_1 contra Δh (placa de orificio)	119
XXI	Error contra Δh (placa de orificio)	121
XXII	h_1 contra Δh (tubo Venturí)	124
XXIII	Error contra Δh (tubo Venturí).	126

SÍMBOLO	SIGNIFICADO
A	Área de sección transversal
B	Ancho de vertedero
C_d	Coefficiente de descarga
C_t	Coefficiente de tubo
C_p	Calor específico de un fluido a presión contante
D	Diámetro de tubería
D_f	Diámetro del flotador
e_v	Energía cinética específica
Q	flujo
Q_m	flujo másico
Q_v	flujo volumétrico
Q_t	Caudal teórico
Q_r	Caudal real
Q_{af}	Caudal de aforo
f_b	Factor de corrección por geometría del flotador
f_g	Factor de corrección por geometría del flotador
g	Aceleración debida a la gravedad
h	Altura o carga
h_l	Pérdida de carga
k	Valor de ajuste
K_c	Relación de calores específicos
K_r	Coefficiente de flujo
L	Longitud
L_w	Longitud de cresta de un vertedero
M	Masa
M_f	Masa del flotador

P	Presión
P_{tot}	Presión total
P_{din}	Presión dinámica
P_{est}	Presión estática
Re_D	Número de Reynolds en la tubería
U	Energía específica
V	Volumen
v	Velocidad
W	Peso
β	Relación de diámetros
ρ	Densidad
ρ_f	Densidad del flotador
γ	Peso específico del fluido
GPM	Galones por minuto

GLOSARIO

Fluido	Sustancia incapaz de resistir fuerzas o esfuerzos de corte sin desplazarse.
Caudal	Volumen de un fluido que pasa en la unidad de tiempo a través de una sección dada.
Presión	Fuerza de compresión normal por unidad de área que actúa sobre una superficie sumergida en el fluido.
Viscosidad	Propiedad de los fluidos que causa fricción. Además, la viscosidad es una medida de la resistencia del fluido al corte cuando el fluido está en movimiento.
Número de Reynolds	Parámetro adimensional que relaciona las fuerzas de inercia y las fuerzas viscosas. Relaciona la velocidad del fluido y la viscosidad cinemática del fluido.
Placa de orificio	Elemento primario para la medición de flujo más sencillo, es una lámina plana circular con un orificio concéntrico, excéntrico o segmentado y se fabrica de acero inoxidable.

- Vertedero** Estructura hidráulica destinada a permitir el paso, libre o controlado, del agua en los escurrimientos superficiales.
- Tubo Venturí** Pieza de tubería con una disminución gradual de su diámetro hasta una sección estrecha, llamada garganta, ésta produce una disminución de la presión hidrostática, la cual es utilizada para calcular el caudal a través de una tubería.

RESUMEN

En el capítulo uno se describen los conceptos fundamentales de los diferentes tipos de flujo. Estos conceptos servirán para conocer las propiedades fundamentales que tiene un fluido. Para el presente tema el fluido a estudiar es el agua. Dentro de los conceptos estudiados se puede mencionar: el flujo volumétrico, másico, en peso, leyes básicas de los fluidos y los factores que afectan la medición del caudal.

En el capítulo dos se desarrollan los temas de los diferentes medidores de flujo, en éstos se hace mención a las características principales de cada medidor, su operación e instalación; así como los coeficientes de descarga, ventajas y desventajas de cada medidor. También se hace referencia a los medidores mecánicos, partes y componentes, dispositivos de medidas, etc.

En el capítulo tres se desarrolla la descripción del ensayo de los medidores de flujo, se estima la desviación estándar de los datos de laboratorio, la calibración de la placa de orificio, tubo Venturí y rotámetro, así como las pérdidas de carga, número de Reynolds y el error que cada medidor genera. Además se elaboró una guía para la práctica de laboratorio.

OBJETIVOS

General

Disponer de un sistema de tuberías, con instalación de cuatro medidores de flujo, para prácticas del laboratorio de Mecánica de Fluidos e Hidráulica.

Específicos

- Armar un circuito que contenga cuatro medidores de flujo.
- Describir el funcionamiento del medidor mecánico, placa de orificio, venturímetro y rotámetro.
- Realizar la calibración de los siguientes medidores de flujo: medidor mecánico, placa de orificio, venturí y rotámetro.
- Determinar el rango de aplicación de cada medidor de flujo.
- Determinar el grado de sensibilidad de cada medidor de flujo.
- Comparar la exactitud en el valor del caudal volumétrico, medido con un medidor mecánico, una placa de orificio, un venturímetro y un rotámetro.
- Desarrollar un instructivo de práctica para la realización del ensayo sobre medidores de flujo.

INTRODUCCIÓN

El método común para transportar fluidos de un punto a otro es impulsarlo a través de un sistema de tuberías. Las tuberías de sección circular son las más frecuentes, ya que permiten soportar mayores presiones, además tienen mayor sección transversal para el mismo perímetro exterior que cualquier otra forma geométrica.

La medición de flujo es una de las tareas esenciales en las industrias para controlar los procesos de producción, como se observará en este trabajo, el flujo tiene muchas aplicaciones y los instrumentos diseñados para cuantificarlo son muy variados debido a que los fluidos varían mucho en características físicas y químicas, la selección de un adecuado medidor de flujo debe ser cuidadosa para que éste cumpla eficientemente su función.

Los medidores de flujo son equipos que permiten la medición del caudal volumétrico y velocidad, se dividen en diversos tipos, de acuerdo con su morfología y su funcionalidad. En general, algunos se basan en la conservación de la energía, para realizar un balance global de energía para determinar el flujo másico del fluido.

No obstante, no cualquier equipo que cumpla con la descripción anterior es un medidor de flujo, puesto que es necesario una sustentación teórica, o bien una repetitividad mínima, para que se pueda considerar que el equipo es útil.

Un aspecto importante de los medidores de flujo es el caudal que circula por ellos, ya que la velocidad será el parámetro para determinar las pérdidas por fricción que se generan en el sistema de tuberías.

1. MEDICIÓN DE FLUJO

1.1 Medición de flujo

El funcionamiento de algunos medidores de flujo se encuentra afectado por las propiedades y condiciones del fluido. Por ejemplo, las diferencias entre un flujo líquido o gaseoso. Otros factores que pueden ser importantes son la densidad, viscosidad, temperatura y material del conducto. Los desechos y los fluidos multifásicos requieren de medidores especiales.

La medición de flujo es una función importante para la operación de sistemas hidráulicos. Se refiere a la capacidad de medir la velocidad, el flujo volumétrico y el flujo másico o en peso de cualquier líquido o gas.

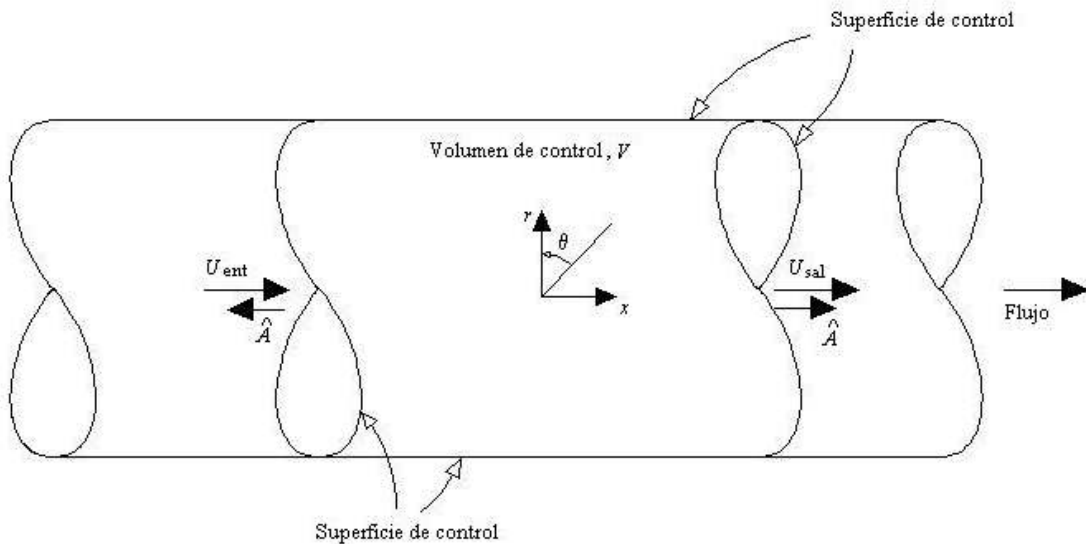
1.2 Tipos de flujo

La clasificación de los flujos obedece a la variable de interés en una situación dada. Esas variables pueden referirse al fluido y/o flujo mismo, y entre ellas se pueden mencionar las siguientes:

1.2.1 Flujo volumétrico

El flujo volumétrico, caudal o gasto a través de una tubería, ducto u otro sistema de flujo, puede describirse mediante el uso de un volumen de control; un volumen en el espacio seleccionado con cuidado por el cual pasa un fluido. La cantidad de fluido que pasa a través de este volumen de control en un tiempo dado determinará el gasto. Una delimitación geométrica de un volumen de control se llama superficie de control. Este volumen de control se muestra en la figura 1 y consiste de un volumen definido dentro de un tubo.

Figura 1: Concepto de volumen de control cuando se analiza un fluido a través de una tubería



La velocidad de un fluido en un punto, puede describirse mediante el uso de un vector de velocidad de tres dimensiones, dado en coordenadas cilíndricas por:

$$v = v(x, r, \theta) = u \hat{e}_x + v \hat{e}_r + w \hat{e}_\theta \quad \text{Ec. 1}$$

donde u , v y w son magnitudes escalares de velocidad, y $\hat{e}_x, \hat{e}_r, \hat{e}_\theta$ son vectores unitarios en cada una de las direcciones del componente x, r, θ , respectivamente.

La cantidad de fluido de densidad (ρ); que pasa a través del volumen de control de volumen (V); en cualquier instante de tiempo depende de la cantidad de fluido que cruza las superficies de control. Esto puede expresarse al examinar el flujo de masa que entra, sale y permanece dentro del volumen de control en cualquier instante. La conservación de la masa establece que la masa acumulada dentro del volumen de control, más el flujo neto de masa que entra y sale de ese volumen a través de cualquiera de sus superficies de control es cero. Esto se expresa mediante:

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_{cv} \rho dV + \oint_{cv} \rho v \cdot \tilde{n} dA = 0 \quad \text{Ec. 2}$$

donde \tilde{n} es normal hacia fuera desde una superficie de control de área A .

Existe una situación de flujo permanente, cuando la suma del flujo de masa, entrando al volumen de control, a través de todas las superficies es igual a la suma del flujo de masa saliendo de él. Para flujos permanentes, la ecuación puede simplificarse a:

$$Q_{m_{ent}} = Q_{m_{salida}} \quad \text{Ec. 3}$$

donde Q_m se define como el flujo másico a través de cualquier área A

$$Q_m = \int \int_A \rho v \cdot \tilde{n} dA \quad \text{Ec. 4}$$

Si la velocidad másica promedio a través de la superficie de control, $\rho v_{promedio}$ se conoce, entonces la ecuación es:

$$Q_m = (\rho v_{promedio}) A \quad \text{Ec. 5}$$

donde $\rho v_{promedio}$ es la velocidad promedio sobre la superficie de control. El gasto másico tiene las dimensiones de masa por unidad de tiempo (es decir, kg/s).

Como regla general, los fluidos isotérmicos de líquidos pueden considerarse incompresibles (es decir, con densidad constante). Esto también puede suponerse para los flujos isotérmicos de gas, los que se mueven a velocidades menores de 0.3 veces la velocidad del sonido en ese fluido ($Mach < 0.3$). En estos flujos, la ecuación puede reducirse a:

$$Q_{vent} = Q_{vsal} \quad \text{Ec. 6}$$

donde Q_v se define como el gasto volumétrico, que se expresa como:

$$Q_v = \int \int_A v \cdot \tilde{n} dA \quad \text{Ec. 7}$$

Por ejemplo, la velocidad en una superficie de contacto localizada en una posición axial x en una tubería, puede describirse mediante el único componente $u(R, \theta)$. En términos prácticos, el conocimiento de $u(R, \theta)$ en x en un flujo permanente e incompresible, sería suficiente para estimar la velocidad promedio, y obtener el gasto volumétrico a través de la superficie de contacto.

En una tubería de sección transversal circular, el gasto volumétrico en la posición x se encuentra mediante la expresión:

$$Q_v = \int_0^R \int_0^{2\pi} u(R, \theta) R d\theta dR \quad \text{Ec. 8}$$

donde R es el radio de la tubería.

Si se conoce la velocidad promedio v_{prom} sobre una superficie de control, entonces el gasto volumétrico puede encontrarse fácilmente mediante:

$$Q_v = v_{prom} A \quad \text{Ec. 9}$$

La importancia del análisis anterior, es que indica que los métodos para determinar el gasto dependen de la velocidad másica promedio $\rho v_{promedio}$ para estimar el gasto másico o a la velocidad promedio, $v_{promedio}$ para estimar el gasto volumétrico.

1.2.2 Flujo másico

Se puede describir como la masa de fluido que circula en una sección por unidad de tiempo.

El flujo másico se puede relacionar con el flujo volumétrico por medio de la ecuación:

$$m = \int_A \rho V dA \quad \text{Ec. 10}$$

$$M = \rho \cdot Q \quad \text{Ec. 11}$$

donde ρ es la densidad del fluido. Entonces las unidades de M, en el sistema si:

$$M = \rho \cdot Q = \frac{kg_m}{m^3} \cdot \frac{m^3}{s} = \frac{kg_m}{s}$$

1.2.3 Flujo en peso

El flujo en peso (W), es el peso del fluido que circula en una sección por unidad de tiempo.

El flujo en peso se relaciona con el flujo volumétrico por medio de la ecuación:

$$W = \gamma \cdot Q \quad \text{Ec. 12}$$

donde γ es el peso específico del fluido. Entonces las unidades de W, en el sistema si:

$$W = \gamma \cdot Q = \frac{N}{m^3} \cdot \frac{m^3}{s} = \frac{N}{s}$$

1.3 Leyes básicas en el movimiento de los fluidos

Las leyes y ecuaciones básicas que permiten predecir el comportamiento del fluido son las leyes de conservación de masa, la ecuación de continuidad, teorema de conservación de la energía, ecuación de la cantidad de movimiento, etc. Es muy importante conocer estas ecuaciones y lo que representan para resolver aplicaciones del flujo de fluidos, así como para utilizar el medidor de flujo más conveniente por presión diferencial.

1.3.1 Ley de conservación de masa

La ley de conservación de masa establece que el cambio de masa por unidad de tiempo en el interior de un sistema permanece constante, en otra forma de ecuación $dm/dt = 0$.

Normalmente se expresa el segundo principio de Newton del movimiento para un sistema de la forma:

$$\sum F = \frac{d}{dt}(mv) \quad \text{Ec. 13}$$

Se debe recordar que m es la masa constante del sistema. $\sum F$ es la resultante de todas las fuerzas externas que actúan sobre el sistema, incluyendo las fuerzas másicas tales como la gravedad y v es la velocidad del centro de gravedad del sistema.

1.3.2. Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad se desarrolla a partir del principio general de la conservación de la masa, al afirmar que la masa dentro de un sistema permanece constante con el tiempo, es decir:

$$\frac{dm}{dt} = 0 \quad \text{Ec. 14}$$

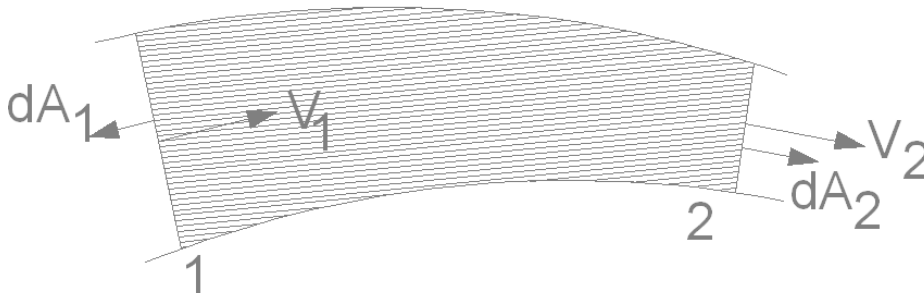
Se puede mencionar que el caudal neto entrante en masa es igual a la velocidad de variación con el tiempo de la masa interior al volumen de una sección. Para un flujo permanente se determina la siguiente ecuación.

$$\int_{cv} \rho v \cdot dA = 0 \quad \text{Ec.15}$$

Considerando un tubo de corriente como volumen de la sección, al integrarlo en la ecuación anterior es cero sobre la superficie del tubo de corriente, quedando solo las áreas de los extremos

$$\rho_2 \cdot v_2 \cdot A_2 - \rho_1 \cdot v_1 \cdot A_1 = 0 \quad \text{Ec. 16}$$

Figura 2. Ecuación de continuidad



Para un flujo permanente, la masa de un fluido que atraviesa cualquier sección transversal es constante, aun cuando esta sección transversal cambie. Dado que la masa de un fluido que atraviesa una sección transversal por unidad de tiempo es ρvA , se tiene que la ecuación de continuidad para cualquier flujo es la siguiente:

$$M_1 = M_2 \quad \text{Ec. 17}$$

$$\rho_1 \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot v_2 \cdot A_2 \quad \text{Ec. 18}$$

Siendo m la masa que atraviesa por segundo una sección. Si se puede considerar constante la densidad sobre la sección recta de una serie de tubos de corriente adyacentes, entonces:

$$M = \rho_1 \cdot v_1 \cdot A_1 = \rho_2 \cdot v_2 \cdot A_2 \quad \text{Ec. 19}$$

donde v_1, v_2 representan las velocidades medias sobre las secciones rectas. La velocidad media sobre una sección recta viene dada por:

$$V = \frac{1}{A} \int_A v dA \quad \text{Ec. 20}$$

Definiendo el caudal Q como el volumen a través de una sección recta por unidad de tiempo, se tendrá:

$$Q = v \cdot A \quad \text{Ec.21}$$

Por lo que el flujo másico se podrá expresar por:

$$m = Q_1 \rho_1 = Q_2 \rho_2 \quad \text{Ec. 22}$$

Por un flujo permanente e incomprensible:

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad \text{Ec. 23}$$

Que es una forma útil de la ecuación de continuidad.

La densidad puede variar con el tiempo, dependiendo de las condiciones de presión y temperatura del fluido, sin embargo, para un fluido incomprensible $\rho_1 = \rho_2$, de esta forma para un líquido el cual es considerado incomprensible, la ecuación de continuidad puede expresarse como:

$$Q_v = v_1 \cdot A_1 = v_2 \cdot A_2 = v_3 \cdot A_3 = \text{constante}$$

1.3.3 Ecuación de la cantidad de movimiento lineal

La fuerza resultante que actúa en un volumen de control es igual a la rapidez con que aumenta la cantidad de movimiento dentro de él, más el flujo neto que sale del mismo volumen de control.

$$F = \rho Q \Delta V \quad \text{Ec. 24}$$

donde:

F = Fuerza que actúa sobre el fluido.

ΔV = Cambio de velocidad

1.4 Primer principio de la termodinámica

1.4.1 Ecuación de Bernoulli:

El primer principio de la termodinámica o principio de la conservación de la energía en forma diferencial, puede enunciarse de la siguiente forma:

$$dQ = du + \frac{1}{E_e} Pdv + \frac{1}{E_e} v dP + \frac{1}{E_e} de_v + \frac{1}{E_e} de_z + \frac{1}{E_e} dW \quad \text{Ec. 25}$$

donde:

dQ = Calor absoluto (+) o cedido por el fluido (-) en Kg.

U = Energía interna específica

P = Presión

V = Volumen específico

e_v = Energía cinética específica = $\frac{V^2}{2g}$ donde:

V = velocidad

G = Constante gravitacional.

e_z = Energía geodésica específica = z

W = Trabajo realizado por el fluido (+) o absorbido por el fluido (-) en Kg

E = Equivalente mecánico del calor = 427 Kgm/Kcal

Todos los términos de la ecuación son; energía por unidad de peso, o energías específicas, expresadas en Kcal/Kg. Multiplicando por E se obtiene el primer principio de la termodinámica, expresado en unidades mecánicas.

$$E_e dQ = Edu + Pdv + vdP + de_v + de_v + de_z + dW \quad \text{Ec. 26}$$

Aplicando la ecuación al flujo de un fluido ideal en la tubería:

$$dW = 0 \quad (\text{el fluido no realiza ni absorbe trabajo})$$

$$dQ = 0 \quad (\text{el fluido no absorbe ni cede calor en cantidades apreciables})$$

La termodinámica enseña que, si no hay rozamiento y el proceso (el flujo en la tubería para el presente caso) puede considerarse irreversible, lo cual es lo que sucede precisamente en el flujo ideal, $E_e du + Pdv = E_e dQ$, pero como $dQ = 0$, se tiene que $E_e du = Pdv = 0$,

$$e_v = \frac{V^2}{2g}$$

$$e_z = z$$

$$v = 1/\gamma, \quad \text{donde } \gamma = \text{Peso específico del fluido}$$

Por lo tanto la ecuación se transforma en:

$$\frac{1}{\gamma} dP + d\left(\frac{V^2}{2g}\right) + dz = 0 \quad \text{Ec. 27}$$

e integrando entre dos puntos cualquiera 1 y 2, de la figura No. 3 se obtiene:

$$\frac{P_1}{\gamma} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad \text{Ec. 28}$$

Qué es la ecuación de Bernoulli para un tubo de corriente; y cómo $\gamma = \rho g$, la ecuación puede escribirse también como:

$$\frac{P_1}{\rho g} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad \text{Ec. 29}$$

donde:

$$\frac{P}{\rho g} = \text{Energía de presión.}$$

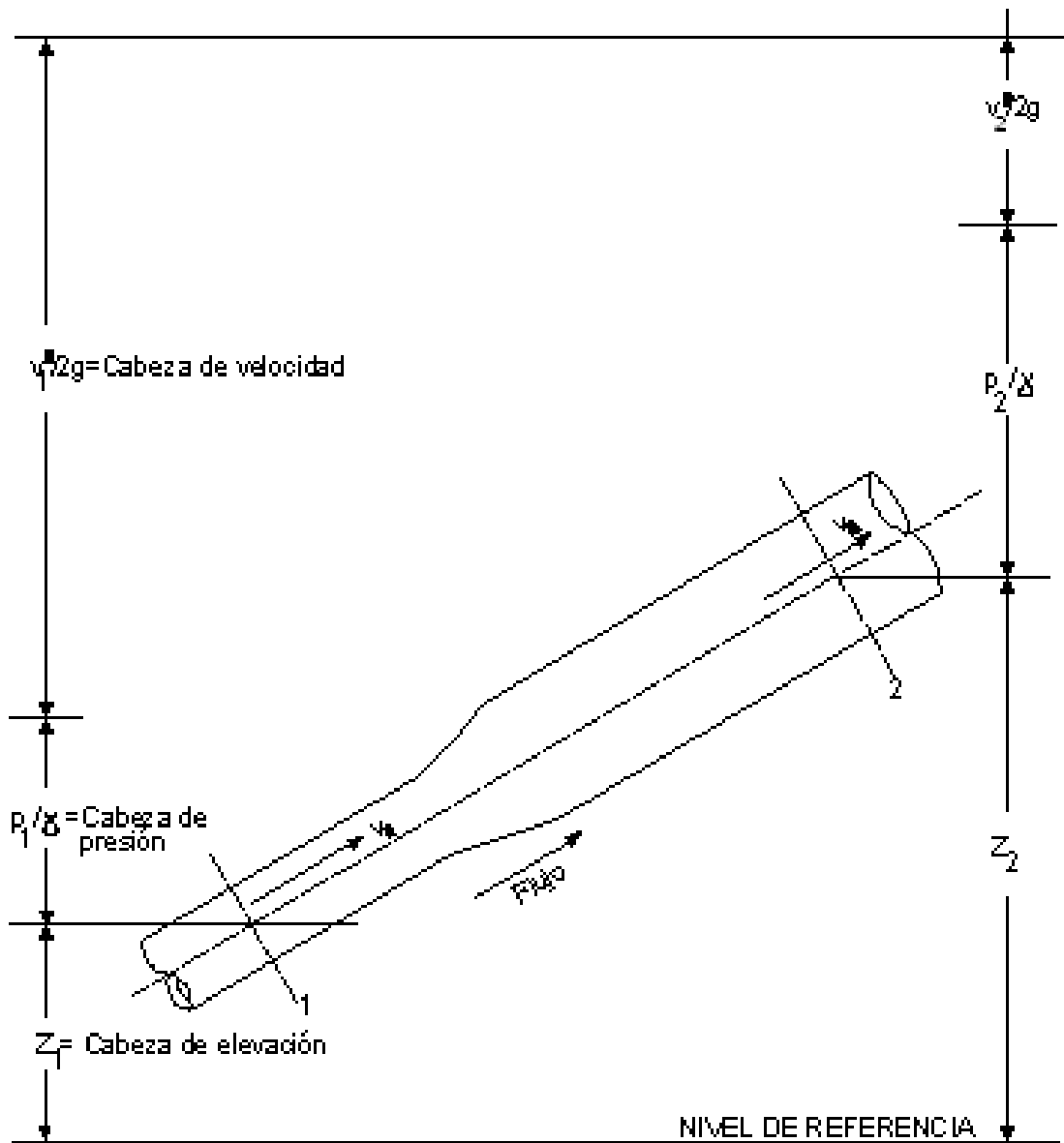
$$z = \text{Energía de posición.}$$

$$\frac{V^2}{2g} = \text{Energía de cinética.}$$

$V_1, V_2 =$ Velocidades medias del fluido en las secciones 1 y 2.

Cada término de la ecuación de Bernoulli es el resultado de dividir una expresión de la energía entre el peso de un elemento del fluido. Por consiguiente, es apropiado referirse a las formas resultantes como la energía poseída por el fluido por unidad de peso de fluido que fluye en el sistema. Las unidades de cada término pueden ser newton-metro por newton (N*m/N).

Figura 3. Descripción de la ecuación de Bernoulli



1.4.2 Formas de flujo

El flujo a través de un tubo o ducto puede caracterizarse como laminar, turbulento o algo intermedio llamado transicional. En mediciones de flujo, esta característica del flujo puede establecerse según el número de Reynolds, definido por:

$$\text{Re}_D = \frac{vD}{\nu} = \frac{4q_v}{\pi D\nu} \quad \text{Ec. 30}$$

Dónde ν es la viscosidad cinemática del flujo, y D el diámetro de la tubería circular o D_h diámetro hidráulico para las tuberías no circulares. En tuberías se encuentran flujos turbulentos si $\text{Re}_D \geq 4000$; y flujos laminares si $\text{Re}_D \leq 2000$, en el diseño del sistema de flujo debe evitarse la operación en régimen de flujo transicional, $2000 < \text{Re}_D < 4000$.

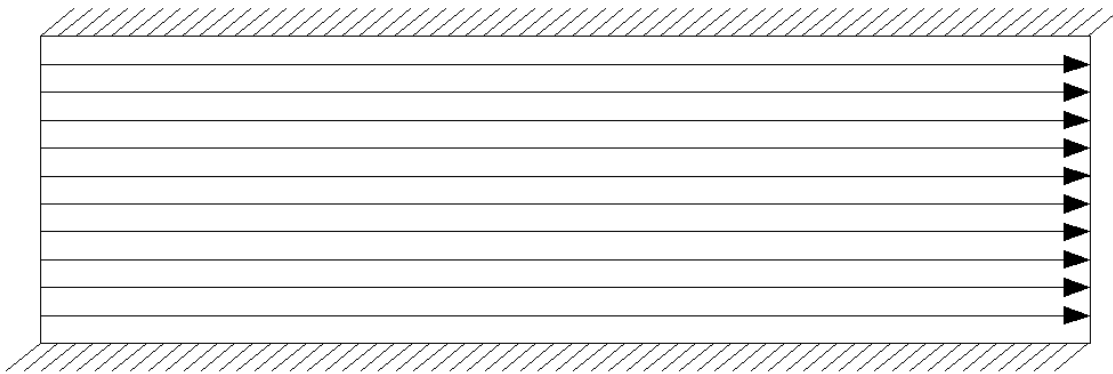
1.4.2.1 Flujo laminar

Cuando se tiene un flujo laminar el fluido parece desplazarse en forma de varias capas, una sobre la otra. Debido a la viscosidad del fluido, se crea una tensión de corte entre las capas del fluido. La energía se pierde del fluido mediante la acción de vencer a las fuerzas de fricción producidas por la tensión de corte.

El perfil de velocidades es una curva suave, y el fluido se mueve a lo largo de líneas de corriente de aspecto alisado. El fluido se desplaza como si

fueran “láminas” que viajan a diferentes velocidades. Existe muy poca mezcla entre estas láminas.

Figura 4. Esquema de flujo laminar



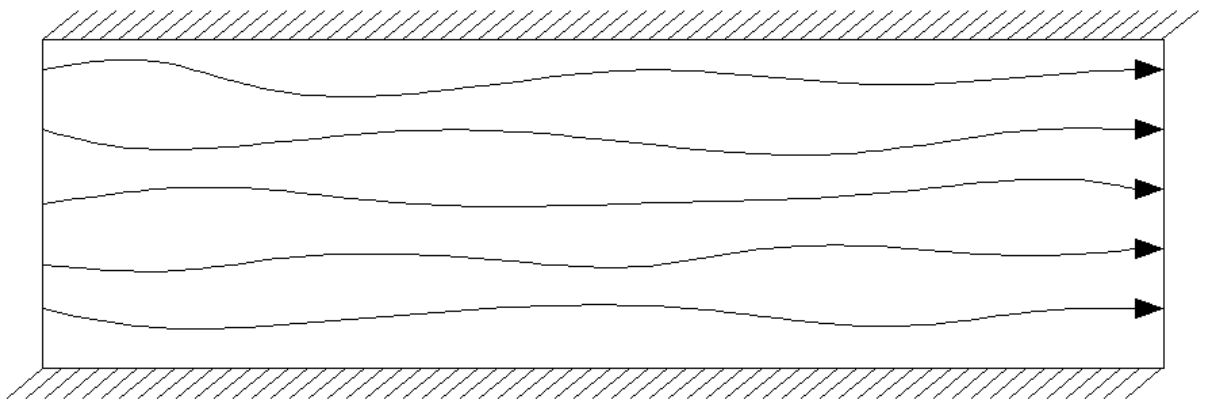
1.4.2.2 Flujo turbulento

En un flujo turbulento las partículas se mueven sobre trayectorias completamente erráticas, sin seguir un orden establecido. 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, de acuerdo con una ley aleatoria, aun cuando el flujo general sea permanente. Esto se explica por el hecho de que la permanencia respecto del tiempo, se refiere a los valores medios de dichas componentes en un intervalo grande. Las componentes transversales de la velocidad en cada punto originan un mezclado intenso de partículas, que consume parte de la energía del movimiento por efecto de fricción interna y que también, en cierto modo, es resultado de los efectos viscosos del fluido.

El flujo laminar o viscoso de un fluido, se presenta en forma de láminas o placas, en oposición al flujo turbulento, en el cual los componentes de velocidad

tienen fluctuaciones al azar que se imponen sobre sus valores medios. Cuando se introduce una corriente de humo o tinta en un flujo laminar, trazará una línea delgada que está compuesta siempre por las mismas partículas del fluido. En un flujo turbulento, la línea se confunde rápidamente y se mezcla con las partículas del fluido formando gran cantidad de nubes y filamentos que se van dispersando. Es el flujo que más se presenta en la práctica.

Figura 5. Esquema de flujo turbulento



1.4.2.3 Flujo permanente

Por flujo permanente se entiende, aquel en el cual los componentes de velocidad y las propiedades termodinámicas en cualquier punto del espacio no cambian con el tiempo.

En general, las zonas de esfuerzo cortante, se producen cerca de la pared (capa límite); o en otras superficies de discontinuidad. Normalmente, fuera de estas zonas, el flujo es irrotacional (no viscoso). Se puede decir que un flujo permanente será cuando las características de un punto permanecen

constantes para cualquier instante; o bien, si las variaciones en ellas son muy pequeñas con respecto a sus valores medio y éstos no varían con el tiempo.

El flujo permanente es más simple de analizar que el no permanente, por la complejidad que adiciona el tiempo como variable independiente.

1.5 Presión en un fluido

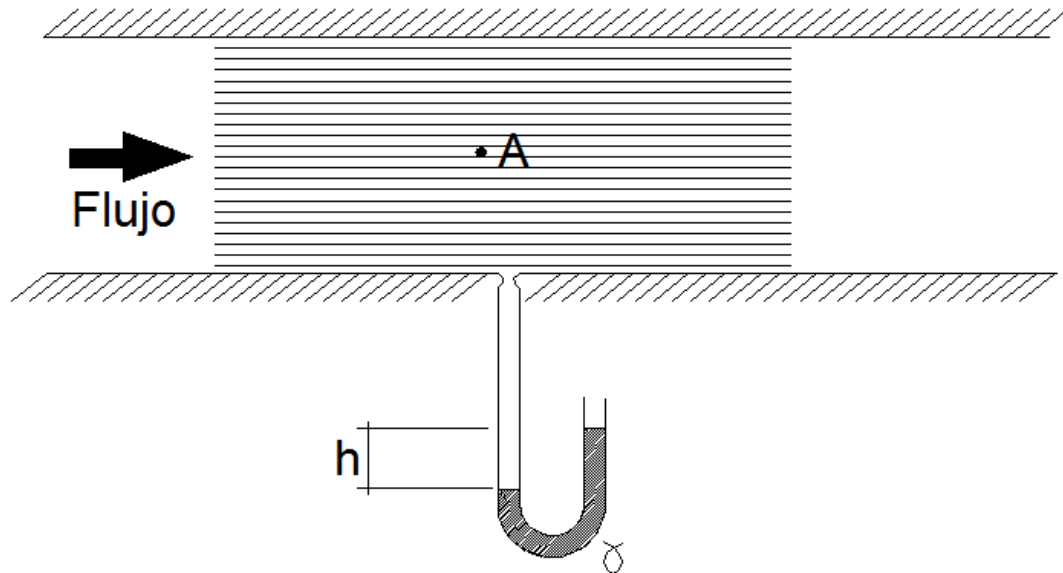
La presión en un fluido en reposo se define como: la fuerza de compresión normal por unidad de área (esfuerzo normal), que actúa sobre una superficie sumergida en el fluido. Cuando el fluido se mueve, pueden existir esfuerzos de corte; sin embargo, la presión continúa siendo isotrópica y se define como se hizo anteriormente, pero debe medirse como el esfuerzo normal sobre un área que se mueve al tiempo con el fluido:

$$P = \lim_{A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} = \frac{dF}{dA} \quad \text{Ec. 31}$$

1.5.1 Presión estática

La presión estática medida en un fluido en movimiento es igual a su presión, siempre que la velocidad no quede afectada por la misma medición.

Figura 6. Medición de la presión estática



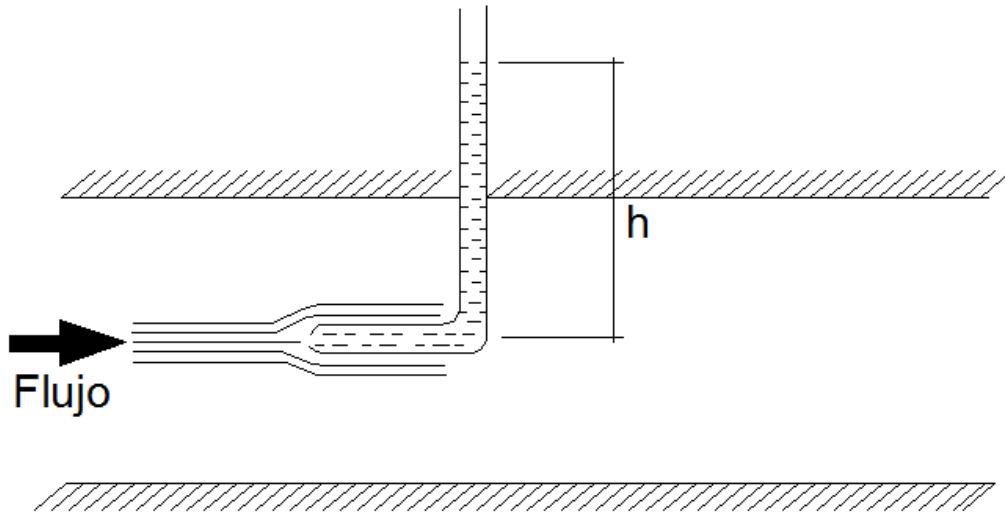
$$P_A = \gamma h$$

1.5.2 Presión dinámica

Es la presión que se obtiene, al medirla en forma paralelamente y contra la corriente del flujo, básicamente es la diferencia entre la presión total y la presión estática.

$$P_{\text{din}} = P_{\text{tot}} - P_{\text{est}} \quad \text{Ec. 32}$$

Figura 7. Medición de la presión dinámica



1.6 Factores que afectan la medición de caudales

1.6.1 Presión disponible

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

1.6.2 Exactitud requerida

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

1.6.3 Material

Un aspecto importante a tomar en cuenta en la medición de caudales, es el tipo de material que se usará, ya que de esto dependerán las pérdidas que habrá en el sistema. Un ejemplo importante son los diámetros de tubería que se usarán y el material con el que estén elaborados, de esto dependerá la rugosidad de cada material, una característica primordial en la medición de caudales.

1.6.4 Tipo de flujo

Los fluidos, como todos los materiales, tienen propiedades físicas que permiten caracterizar y cuantificar su comportamiento así como distinguirlos entre sí. Una propiedad importante de los fluidos es la rugosidad ya que ésta es

una fuerza en contra de la dirección del flujo y dependerá del tipo de flujo con el que se trabaje, agua, gas, etc. Algunas de estas propiedades son exclusivas de los fluidos y otras típicas de todas las sustancias.

1.6.5 Sensibilidad

La sensibilidad de un medidor es la capacidad de detectar pequeños cambios del caudal y se relaciona con el error de medición. Algunos técnicos y fabricantes de medidores lo expresan en unidades porcentuales del caudal nominal y otros en unidades de tipo absoluto.

2 MEDIDORES DE FLUJO EN TUBERÍAS A PRESIÓN:

2.1 Definición

Un medidor de flujo es un dispositivo que permite obtener, generalmente por medio de una sola medición, el volumen de fluido que pasa por unidad de tiempo a través de determinada sección transversal.

La selección de un dispositivo para medir gastos se ve afectada por la exactitud requerida, el costo, la complejidad del diseño, la facilidad de la lectura o la interpretación de los resultados, y la duración, en general, se prefiere seleccionar el dispositivo más simple y barato, para la aproximación deseada.

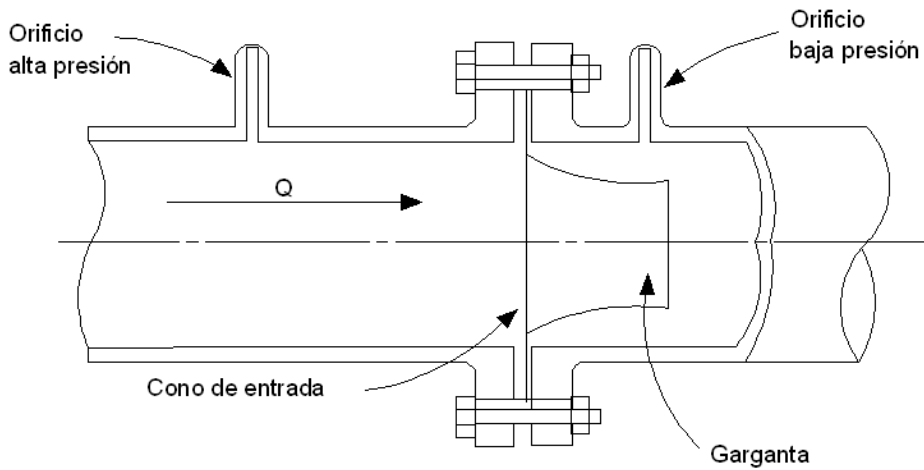
2.2 Tipos de medidores de flujo

2.2.1 Tobera

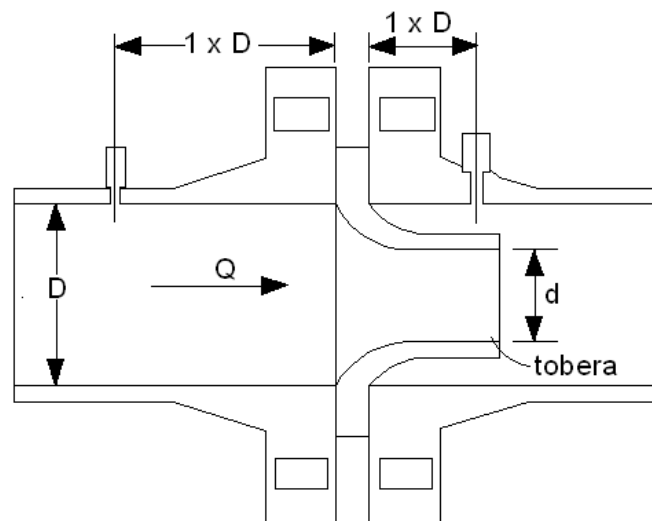
La tobera puede considerarse como una variación del tubo Venturí. La abertura de la tobera es una restricción elíptica, tal como se muestra en la figura 8. Se trata de un dispositivo con una entrada perfilada por una garganta cilíndrica. La toma de alta presión se realiza en la pared de la tubería, a una distancia D de la entrada, mientras que la de baja presión suele colocarse a la salida, donde la sección del flujo es mínima. Esta toma se realiza directamente en la pared de la tubería y suele estar a una distancia igual a $0.5D$ de la placa. También se hacen toberas en ángulo.

Figura 8. Detalles de tobera

a) Partes que integran un medidor de tobera



b) Detalle de boquilla de tobera



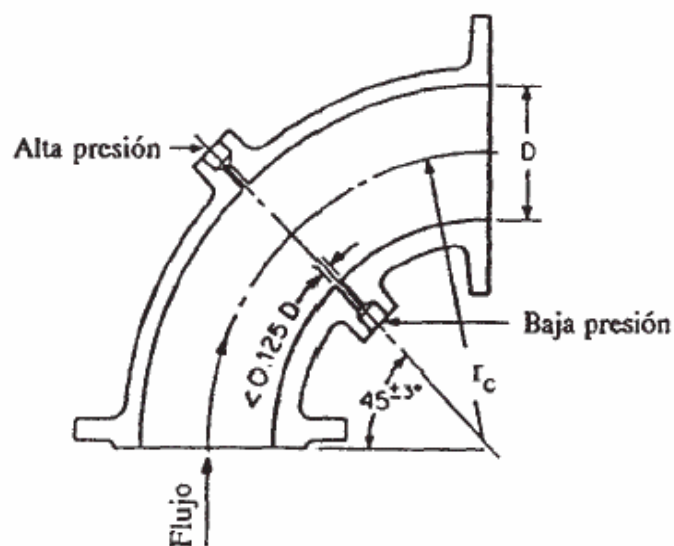
La tomas de presión se localizan aproximadamente $\frac{1}{2} D$ aguas abajo y $1 D$ aguas arriba; donde D es el diámetro de la tubería. La tobera se utiliza principalmente cuando la turbulencia es alta ($Re > 50,000$), tal como flujo de

vapor a altas temperaturas. La caída de presión que se produce en la tobera es mayor que en un tubo Venturí pero menor que en una placa de orificio.

2.2.2 Codos

Es una herramienta de las más sencillas para la medida del caudal. En el interior y exterior del codo se abren orificios piezométricos que se conectan a un manómetro diferencial. A causa de la fuerza centrífuga que se desarrolla en la parte curvada, la diferencia de presiones está relacionada con el caudal. Este accesorio ha de ser precedido por un trozo de corriente rectilínea y en calma, y para obtener medidas de suficiente exactitud deben calibrarse de antemano. Como la mayoría de las tuberías presentan algún codo, éste puede usarse para medir el caudal, consiguiéndose, si se ha hecho un calibrado previo, resultados tan aceptables como con el tubo Venturí o la tobera.

Figura 9 Codo y su toma de presión

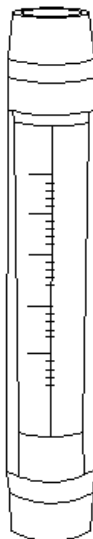


2.2.3 Flujómetro

Es un instrumento que mide la cantidad de fluido que pasa a través de la sección por unidad de tiempo. Por ejemplo, en cierta tubería puede haber un régimen de flujo de 100 galones de agua por minuto. Esto quiere decir que durante cada minuto que transcurre pasan 100 galones de agua. Si se considera el número de galones que van a pasar a partir de cierto momento, después de dos minutos 200 galones, etc. Si el régimen de flujo se mantiene con el mismo valor, después de cierto tiempo habrá pasado un número total de galones igual al régimen de flujo multiplicado por el tiempo transcurrido; por ejemplo, después de 15 minutos habrán pasado $100 \times 15 = 1.500$ galones.

Al contrario, dividiendo el número total de galones entre el tiempo, se obtiene el régimen de flujo. En el ejemplo anterior $1.500/15 = 100$ gal/min.

Figura 10. Flujómetro de área variable



2.2.4 Vertederos

Un vertedero es un dique o pared que intercepta la corriente de líquido, causando una elevación del nivel aguas arriba.

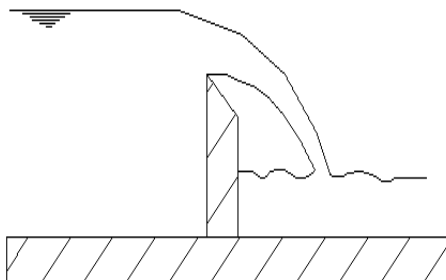
2.2.4.1 Tipos de vertederos

Existen dos clasificaciones fundamentales:

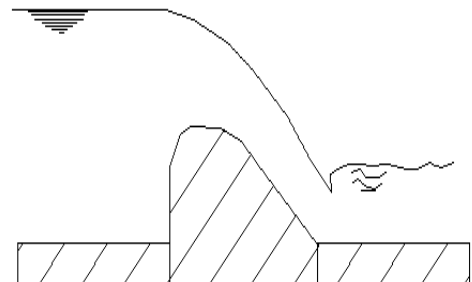
1. Vertederos de pared delgada,
2. Vertederos de pared gruesa.

Los de pared delgada se emplean para medir caudales con gran precisión y los de pared gruesa, como parte de una presa u otra estructura hidráulica para el control de nivel del líquido.

Figura 11. Tipos de vertederos



a) Vertedero pared delgada.



b) Vertedero pared gruesa.

2.2.4.2 Características

En éstos, la parte superior del vertedero que está en contacto con el chorro o lámina vertiente de líquido, suele ser una chapa de unos 5 mm, de espesor, de un material distinto al de la pared, como latón o acero inoxidable, biselado como se ve en el detalle de la figura. Técnicamente hablando, esta chapa es el vertedero y en ella se practican las diversas formas de las aberturas. Los vertederos de pared delgada, según la forma de las aberturas se clasifican en: rectangulares, triangulares, trapezoidales, parabólicos y otros.

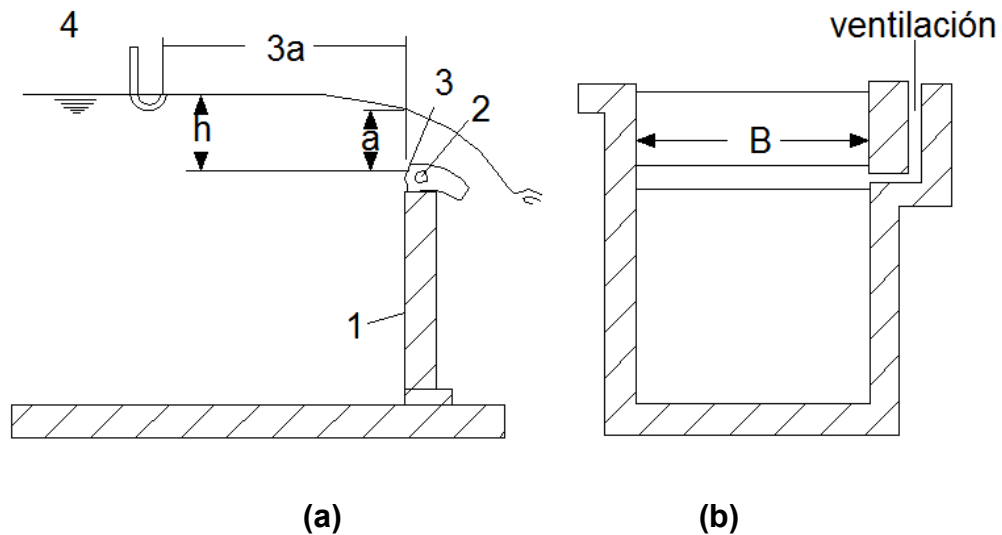
Estos vertederos se utilizan para medir el flujo de los líquidos en canales abiertos o en ductos que no fluyen llenos; o sea, en donde hay una superficie líquida libre.

En la figura 12 se muestra un vertedero rectangular sin contracción lateral. El dique aquí es sencillamente una pared rectangular de chapa, ladrillo, hormigón, tablonés de madera u otro material.

Requerimientos mínimos e identificación de partes de un vertedero:

1. Pared, la cual debe ser de superficie lisa, y aguas arriba de ésta el canal ha de tener sección uniforme.
2. Ventilación o comunicación con la atmósfera que debe tener todo vertedero.
3. Cresta del vertedero, que suele ser de bronce, acero inoxidable, etc. y que debe de tener aristas vivas.
4. Regleta graduada para la medición de h.

Figura 12. Partes de un vertedero. a) Corte longitudinal. b) Corte transversal de un vertedero sin contracción lateral



En los vertederos el caudal es función de la única variable h , lo que simplifica la medida, así como la adaptación del instrumento como medidor de flujo.

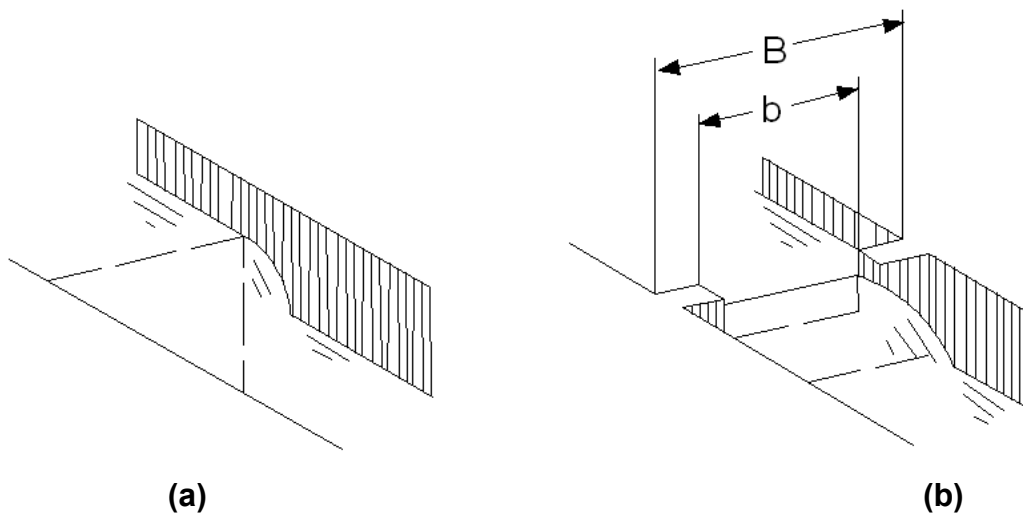
2.2.4.3 Vertedero rectangular

2.2.4.3.1 Características

Los vertederos rectangulares se clasifican en:

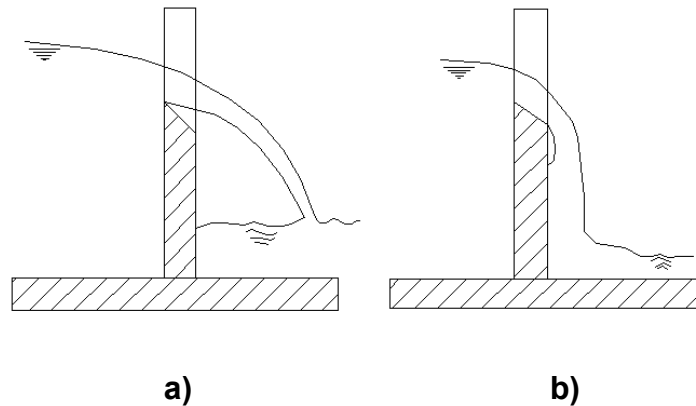
1. Vertederos sin contracción lateral, si el ancho de la abertura del vertedero es igual al ancho del canal.
2. Vertederos con contracción lateral, en caso contrario.

Figura 13. Vertedero rectangular. a) Sin contracción lateral. b) Con contracción lateral



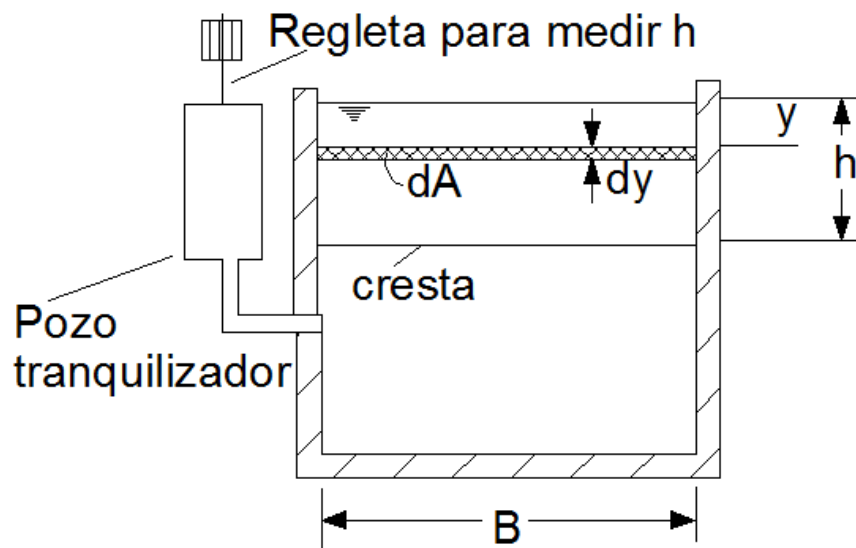
En los vertederos rectangulares, la exactitud de la medida solamente se puede garantizar si el vertedero está bien ventilado. La ventilación que se muestra en la figura 12, tiene por objeto introducir aire debajo de la lámina de agua, y evitar así que ésta tienda a pegarse a la pared del vertedero debido a la succión que allí se crea.

Figura 14. Forma de la vena líquida. a) Vertedero ventilado. b) Vertedero sin ventilación



Puesto que los vertederos han sido utilizados casi exclusivamente para medir flujos de agua sobre límites estrechos de temperaturas, los efectos de la tensión superficial y de la viscosidad no han sido bien establecidos en forma experimental.

Figura 15. Derivación de ecuación básica para vertederos rectangulares



En el vertedero sin contracción lateral $b = B$, donde $B =$ ancho del vertedero.

De la figura 15, el diferencial de área, es:

$$dA = bdy \quad \text{Ec. 34}$$

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre un punto 1 de la figura 14, en la estación de medida de altura de la lámina que ha de situarse a una distancia no menor de $3h$, donde h es la carga del vertedero, y en punto 2 situado en la lámina y en el plano mismo del vertedero, es:

$$V = \sqrt{2gy} \quad \text{Ec. 35}$$

El caudal diferencial teórico dQ_t será:

$$dQ = VdA \quad \text{Ec. 36}$$

$$dQ_t = Bdy \sqrt{2gy} \quad \text{Ec. 37}$$

ordenando términos convenientemente:

$$dQ_t = b\sqrt{2g} y^{1/2} dy \quad \text{Ec. 38}$$

el caudal teórico Q_t que fluye a través de todo el vertedero será:

$$Q_t = \sqrt{2g} b \int_0^h y^{1/2} dy \quad \text{Ec. 39}$$

Integrando se obtiene:

$$Q_t = \frac{2}{3} b \sqrt{2gh^3} \quad \text{Ec. 40}$$

El caudal real se obtiene multiplicando Q_r por un coeficiente de caudal C_q .

$$Q_r = C_t \frac{2}{3} b \sqrt{2gh^3} \quad \text{Ec. 41}$$

Para vertedero rectangular con contracciones laterales el caudal es:

$$Q_t = C_r \frac{2}{3} (b - 0.2h) \sqrt{2gh^3} \quad \text{Ec. 42}$$

La disminución de B en $0.2h$ es debido a que se ha establecido experimentalmente que en los vertederos con contracción lateral, por su forma, la lámina disminuye en $0.1h$ por lado.

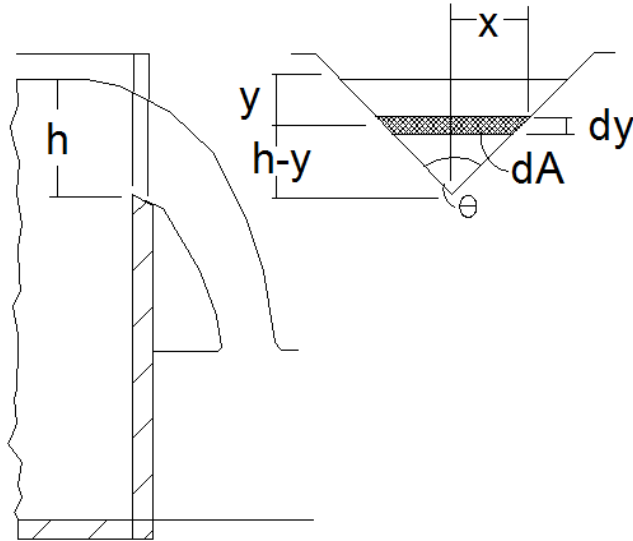
Los vertederos rectangulares se adaptan para medir caudales desde 6 lt/seg. hasta $10 \text{ m}^3/\text{seg}$.

2.2.4.4 Vertedero triangular

2.2.4.4.1 Características

En este tipo de vertedero la abertura tiene una forma de V , la cual por lo regular, es de 60° ó 90° , pero puede tener otro valor.

Figura 16. Derivación de ecuación básica para vertederos triangulares



Procediendo análogamente al vertedero rectangular, se obtiene:

$$dQ_t = \sqrt{2gy} dA \quad \text{Ec. 43}$$

Refiriéndose a la figura se obtiene:

$$dA = 2x dy \quad \text{Ec. 44}$$

$$Tg \frac{\theta}{2} = \frac{x}{h-y} \quad \text{Ec. 45}$$

donde

$$x = T_g \frac{\theta}{2} (h-y) \quad \text{Ec. 46}$$

Sustituyendo valores se obtiene:

$$Q_t = 2\sqrt{2g}T_g \frac{\theta}{2} \int_0^h (h-y)y^{1/2} dy \quad \text{Ec. 47}$$

efectuando y ordenando términos convenientemente:

$$Q_t = \frac{8}{15} T_g \frac{\theta}{2} h \sqrt{2gh^3} \quad \text{Ec. 48}$$

Para obtener el caudal real, se multiplica la ecuación por el coeficiente de caudal C_q , y operando términos semejantes se obtiene finalmente:

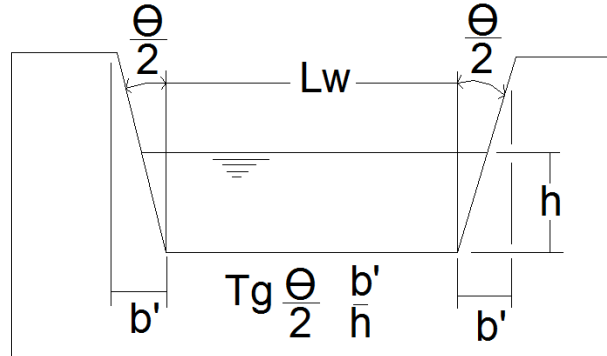
$$Q_r = C_q \frac{8}{15} T_g \frac{\theta}{2} h \sqrt{2gh^5} \quad \text{Ec. 49}$$

Se puede utilizar donde se necesite la medición de caudales variables, ya que debido a la forma de su abertura posee amplios rangos de medición, se pueden utilizar con pendientes 20:1 hasta 60:1. Se pueden efectuar mediciones inferiores a 6 lt/seg.

2.2.4.5 Vertedero trapezoidal

El gasto en un vertedero trapezoidal, se considera igual a la suma de los gastos de un vertedero rectangular y otro triangular.

Figura 17. Derivación de ecuación básica para vertederos trapezoidales



$$Q_t = \frac{2}{3} \sqrt{2gh^3} + \frac{8}{15} b' \sqrt{2gh^5} \quad \text{Ec. 50}$$

Introduciendo coeficientes, la fórmula para el gasto es:

$$Q_r = C_1 \frac{1}{2} L_w \sqrt{2gh^3} + C_2 \frac{8}{15} b' \sqrt{2gh^5} \quad \text{Ec. 51}$$

No hay datos experimentales para determinar C1 y C2, por consiguiente el vertedero de este tipo usado es el llamado Vertedero de Cipolletti que posee ciertas características definidas.

2.2.4.6 Consideraciones generales sobre la instalación de los vertederos

El tipo de vertedero elegido para una situación dada deberá ser el que mejor se adapte a las condiciones particulares. De ser posible, debe emplearse un vertedero rectangular sin contracciones laterales o un vertedero triangular. Las características de los vertederos de Cipolletti y de los rectangulares con contracciones laterales no han sido investigadas experimentalmente y no

pueden, por lo tanto, emplearse con el mismo grado de seguridad que los otros tipos.

En cualquier instalación deben evitarse velocidades excesivas en corriente arriba. En general la velocidad máxima no debe exceder de 0.30 m/s. Si se desea que las mediciones se mantengan dentro de una exactitud de $\pm 3\%$.

Un vertedero no funciona bien si su vertiente no se ventila, lo cual es principalmente una cuestión del nivel que se mantiene en el canal receptor. Si el líquido se eleva, de tal manera que el espacio libre es insuficiente para la ventilación, será imposible efectuar mediciones precisas. Cuando el flujo desciende tanto que no se ventila, será que es atraída hacia la orilla del vertedero por atracción capilar y el dispositivo tampoco funcionará eficientemente. En estos casos se recomienda el uso del vertedero triangular, debido a que con él se pueden manejar flujos relativamente pequeños.

Si el líquido que se mide contiene material en suspensión, el vertedero debe limpiarse periódicamente, ya que los materiales depositados originan errores en la medición del gasto.

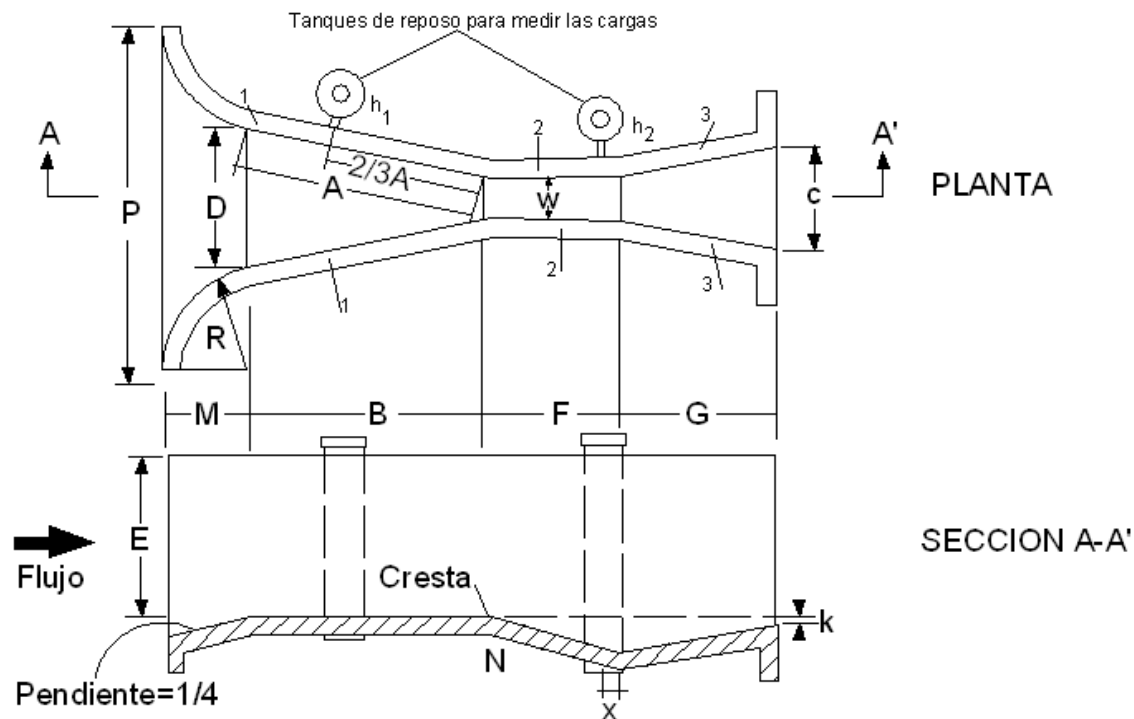
Se recomienda calibrar siempre los vertederos de cualquier tipo, antes de usarse definitivamente.

2.2.5 Canal Parshall

2.2.5.1 Características

Está constituido por tres partes fundamentales: La entrada, la garganta y la salida. La entrada está formada por dos paredes verticales simétricas y convergentes, y de un fondo que es horizontal. La garganta, está formada por dos paredes también verticales y paralelas, y el fondo es inclinado hacia abajo, con una pendiente de 0.375:1 (N/F). La salida por dos paredes divergentes (3). Hay que hacer notar que tanto el fondo como las paredes son planos. A la distancia entre las paredes de la garganta se la llama tamaño del medidor (W).

Figura 18. Diagrama y dimensiones de un canal Parshall



Tiene la estructura dos pozos amortiguadores que sirven para medir con precisión las cargas h_1 y h_2 , antes y después de la cresta respectivamente. Están colocados en los lados de la estructura y comunicados a ella por tubería que se conecta a puntos bien definidos de la entrada y de la garganta. Las cargas h_1 y h_2 son a partir de la cota de la cresta, y por lo tanto el cero de las

escalas está al nivel del piso de la entrada. Dichas escalas se pueden colocar o dibujar directamente sobre las paredes de la estructura cuando es pequeña (de unos 0.15 m) y se desea suprimir las cámaras de reposo. Este tipo de medidor también se construye de lámina de acero y hierro estructural.

2.2.5.2 Operación y cálculo del gasto en los canales Parshall

Los muros convergentes de la entrada guían suavemente los filetes de la vena líquida hasta la cresta, que es propiamente la sección de control, en donde debido al cambio brusco de la pendiente del piso en la garganta el agua escurre con un mínimo de energía.

Al entrar el agua en el medidor, debido a que la sección va reduciéndose, su velocidad va en continuo aumento, pues al llegar a la cresta del medidor se precipita siguiendo el piso descendente de la garganta, hasta que al salir de ella empieza a perder velocidad y como ésta es menor en el canal aguas abajo, resulta que debe producirse un salto hidráulico cerca del extremo inferior de la garganta. La localización de este salto es variable con el gasto que pasa por el medidor, pues para un gasto muy grande o muy pequeño, el salto se localizará más lejos o más cerca de la garganta, consecuentemente con lo cual la carga h_2 variará haciéndose más pequeña o aumentando tendiendo a ser igual a h_1 .

La ecuación general para el cálculo del gasto es:

$$Q = m (h_1)^n \quad \text{Ec. 52}$$

En donde los valores de m y n varían con el tamaño del medidor.

2.2.5.3 Grado de sumersión

Se le llama grado de sumersión S , a la relación h_2/h_1 . Cuando el medidor trabaja con sumersión, la fórmula correspondiente a descarga libre de un gasto mayor al real, por lo tanto es necesario aplicar una corrección sustractiva a la fórmula, quedando como expresión general del gasto:

$$Q = m(h_1)^n - C_s \quad \text{Ec. 53}$$

donde C_s es una función de W , h_1 y S , que se obtiene experimentalmente.

2.2.5.4 Selección e instalación de los canales Parshall

Desde el punto de vista económico, el menor de los medidores con la capacidad requerida será el más favorable, por otra parte, un medidor demasiado grande resultará impreciso toda vez que en éste, a una variación pequeña en la carga corresponde una variación considerable en el gasto, sin embargo, hay otras consideraciones que hacen que en la mayoría de los casos, el medidor que se instala no sea el más pequeño, ya que la fuerte velocidad que produce a la salida es tanto mayor cuanto menor es el tamaño del medidor, la cual puede ser perjudicial en el proceso de que se trate.

Los canales Parshall están diseñados para usarse en condiciones de gasto moderado y deben colocarse de manera que no afecten las estructuras de control, recodos en la alineación de canales u otros dispositivos que produzcan turbulencia, ondas o flujos desiguales.

Es aconsejable, siempre que sea posible, que el Parshall opere en condiciones de flujo libre, ya que de esta forma sólo se necesita un punto de medición de nivel. La cuidadosa selección, tanto del tamaño como de la localización del Parshall, generalmente evita la operación en flujo sumergido; pero si esto es imposible, existen en el mercado sistemas de instrumentos de computación analógica, los cuales calculan el flujo Instantáneo a partir de las dos señales de nivel h_1 y h_2 .

Estos canales se recomiendan cuando hay arena, cascajo u otros sólidos pesados presentes en la corriente cuyo flujo se desea medir.

2.2.6 Medidor de flujo por presión diferencial

El principio de funcionamiento de los medidores de flujo por presión diferencial es el de aprovechar una caída de presión en el flujo debido a un aumento en su velocidad

2.2.6.1 Placa de orificio

La placa de orificio es uno de los dispositivos de medición más antiguos, fue diseñado para usarse en gases, no obstante se ha aplicado ampliamente y con gran éxito para medir el gasto de agua en tuberías.

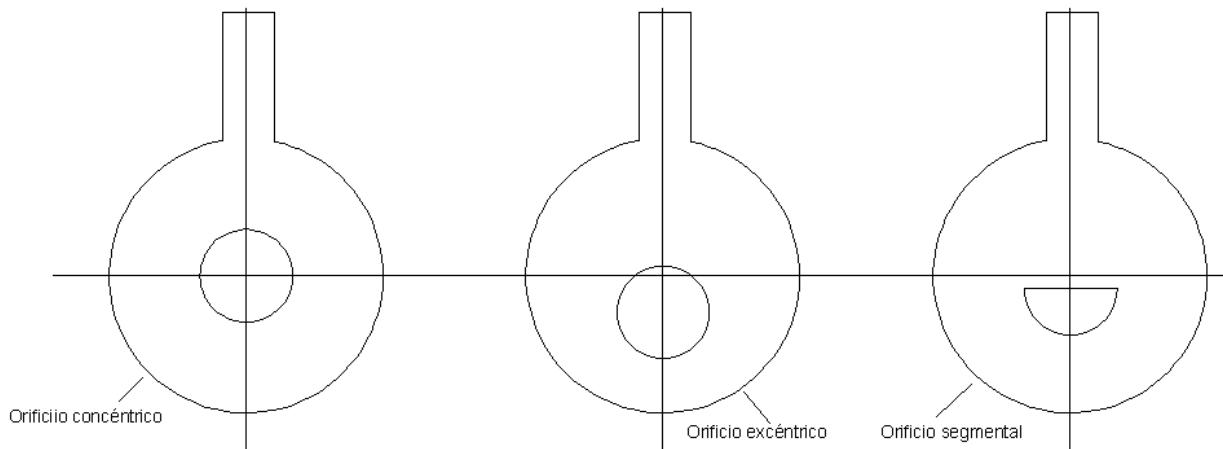
En 1991, se reunieron ingenieros de muchos países para establecer las características geométricas, reglas para la instalación y operación de este

dispositivo. Como resultado se obtuvo una norma internacional válida en todo el mundo, ésta es la Norma ISO 5167-1.

2.2.6.1.1 Características

Un medidor de orificio es un dispositivo sumamente sencillo. Consiste en una placa plana con un orificio perforado, ya sea concéntricamente o excéntricamente dependiendo del tipo.

Figura 19. Tipos de orificio de placa de orificio



La placa convencional es la concéntrica. Se trata de una pieza de metal delgada, con la suficiente resistencia para no pandearse bajo las presiones diferenciales que tiene que soportar estando en servicio. El espesor de estas placas es de 1/16 de pulgada, para tamaños de tubería hasta de 4 pulgadas de diámetro; y de 1/8 de pulgada, para tubería hasta de 16 pulgadas de diámetro.

Para diámetros de tubería mayores de 16 pulgadas de diámetro se utilizan de 1/4 de pulgada de espesor.

El espesor del borde del orificio no debe ser mayor de 1/8 de pulgada para aberturas mayores de 1/2 pulgada de diámetro y no mayor de 1/16 de pulgada para aberturas menores que 1/2 pulgada de diámetro.

Cuando se necesitan espesores mayores para soportar las presiones de aplicación dada, los espesores de la pared en la abertura del orificio se pueden reducir biselando la cara de corriente abajo, a un ángulo de 45 grados o mayor, para obtener el espesor apropiado.

2.2.6.1.2 Operación e instalación

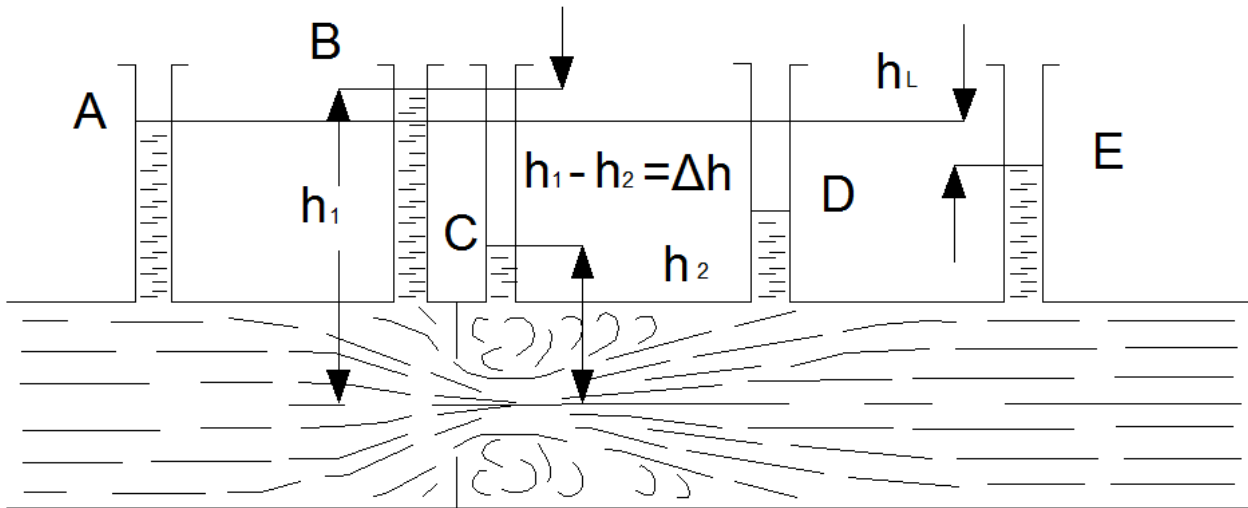
Las placas de orificio casi siempre se montan en acoples de brida que se atornillan juntas. Las tomas de presión corriente arriba y corriente abajo casi siempre se montan en las bridas. Estas tomas de presión van conectadas a un medidor de presiones diferenciales, similar al tubo Venturi.

La toma de alta presión se encuentra en el lado corriente arriba y la de baja presión va en el lado corriente abajo. Esta diferencia de presión se obtiene debido a dos efectos:

- a) El cambio de energía cinética originado por un cambio en la velocidad, que a su vez es causado por un cambio en el área de flujo.
- b) La pérdida permanente de presión, debida a la fricción por la forma de la superficie.

Es importante comprender que en cualquier tubería por la cual circula agua, la presión aumenta cuando la velocidad disminuye y la presión disminuye cuando la velocidad aumenta.

Figura 20. La placa de orificio origina que la velocidad aumente y por lo tanto la presión disminuye



Si se toma en consideración que el agua circula por una tubería de acero sin que nada la detenga, en este caso la velocidad de un punto de la tubería a otro no cambia.

Pero la placa de orificio (punto C) insertada en la tubería, origina que el agua choque con la placa y disminuya su velocidad.

Debido a la reducción de la velocidad, la presión justo antes del orificio (punto B) es un poco mayor que la presión de operación en la línea de conducción aguas arriba (punto A).

Al pasar el agua por el orificio, para compensar la disminución del área, la velocidad aumenta y la presión disminuye, llegando a su menor valor cuando la velocidad es máxima.

Aguas abajo de este punto, el flujo se dispersa, disminuye la velocidad y se presenta un aumento de la presión en el punto D.

Después de la placa la velocidad se recupera porque el agua circula en toda la tubería (punto E).

Siendo h_1 la presión aguas arriba de la placa de orificio h_2 la presión aguas abajo, la diferencia entre ambas ($h_1 - h_2$) se conoce como la presión diferencial, la cual se simboliza por Δh .

2.2.6.1.3 Requerimientos de instalación física

A. Diámetros mínimo y máximo

Para poder emplear la placa orificio, el diámetro mínimo de la tubería debe de ser de 2 pulg. y el máximo de 50 pulg. Lo anterior no representa problema, ya que los diámetros más comunes son de 6, 8, 10 y 12 pulg.

B. Condiciones de operación

Es necesario que en las instalaciones se verifique lo siguiente:

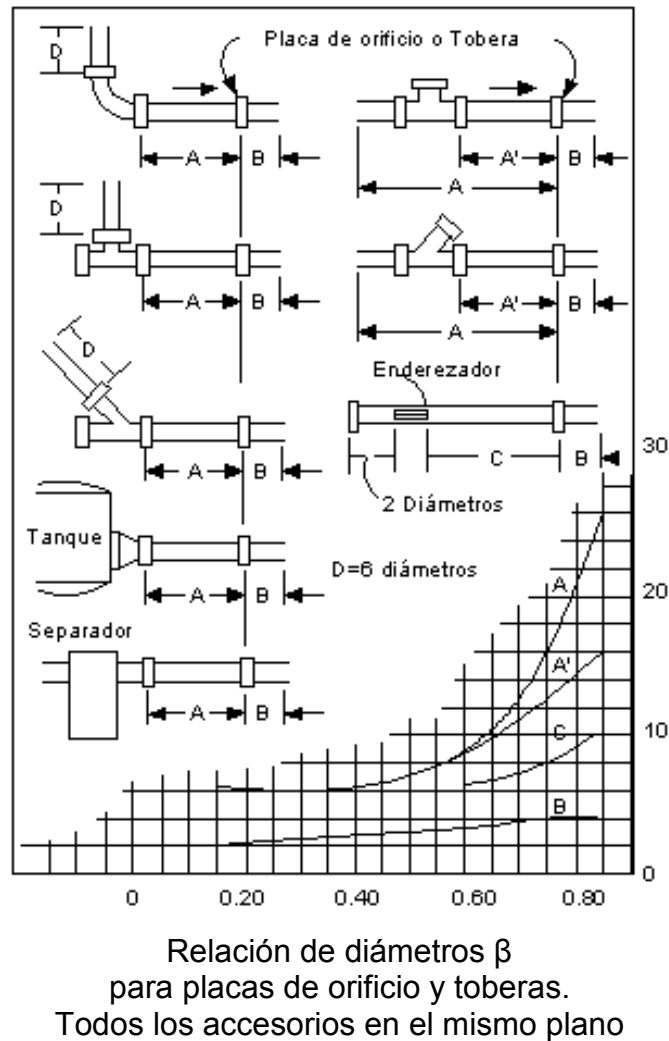
- Que la tubería sea circular.
- Que la tubería sea horizontal.
- Que el agua circule a tubo lleno.
- Que el diámetro antes y después de la placa sea el mismo.
- Que el interior de la tubería se encuentre limpio y libre de incrustaciones, al menos 10 diámetros aguas arriba de la placa y 4 diámetros después de la misma.

C. ¿Cómo asegurarse de que el agua antes de la placa orificio circula de manera uniforme?

Conociendo la relación de diámetros β , es posible saber qué longitud de tramo recto de tubería aguas arriba (A) y aguas abajo (B) se requiere.

En la figura 21, se reproducen diferentes condiciones de instalación y a partir de la relación de diámetros, se muestra la longitud necesaria del tramo recto para que se establezca un flujo uniforme.

Figura 21. Relación para que se establezca flujo uniforme



D. Especificaciones técnicas de instalación

El dispositivo primario, es decir, la placa de orificio, es fijado a la tubería entre un par de bridas con sus respectivos empaques. Mientras que los dispositivos secundarios, es decir, las tomas de presión, se colocan antes y después de la placa.

La presión diferencial Δh , se mide con un manómetro diferencial.

E. Dimensiones recomendadas para la placa de orificio

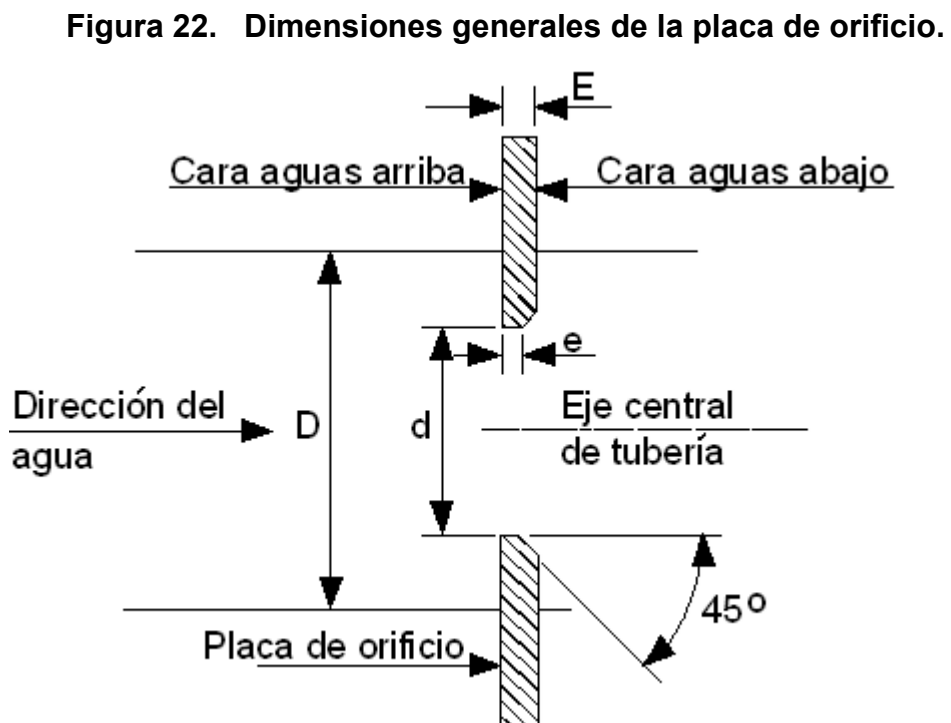
En la figura 22 se puede ver la sección transversal de una placa orificio y sus características geométricas, se observan dimensiones como:

D = diámetro de la tubería

d = diámetro del orificio

E = espesor de la placa

e = espesor del orificio



La tabla I muestra los valores mínimo y máximo de los espesores e y E, en función del diámetro de la tubería que se utilice. También, el valor mínimo y

máximo del diámetro del orificio y de los valores de la relación de diámetros β (d/D).

Tabla I. Dimensiones recomendadas para los elementos primarios

Dimensión	Mínimo	Máximo
e	0,005D	0,02D
E	0,005D	0,05D
d	1/2 pulg	38 pulg
d/D	0,20	0,75

Al aplicar el criterio expuesto en la tabla anterior para diferentes diámetros de tubería, se obtiene la tabla siguiente:

Tabla II. Dimensiones extremas para los elementos primarios

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

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

F. Distancia para colocar las tomas de presión

Existen tres posiciones de instalación, la tabla siguiente muestra las distancias requeridas aguas arriba (L_1) y aguas abajo (L_2) para cada tipo de instalación.

Tabla III. Posiciones de las tomas de presión

Tipo de instalación	L_1	L_2
D-D/2	D	D/2
A una pulg	1 pulg	
En los bordes	Cero	

Figura 23. Tomas de presión a D-D/2

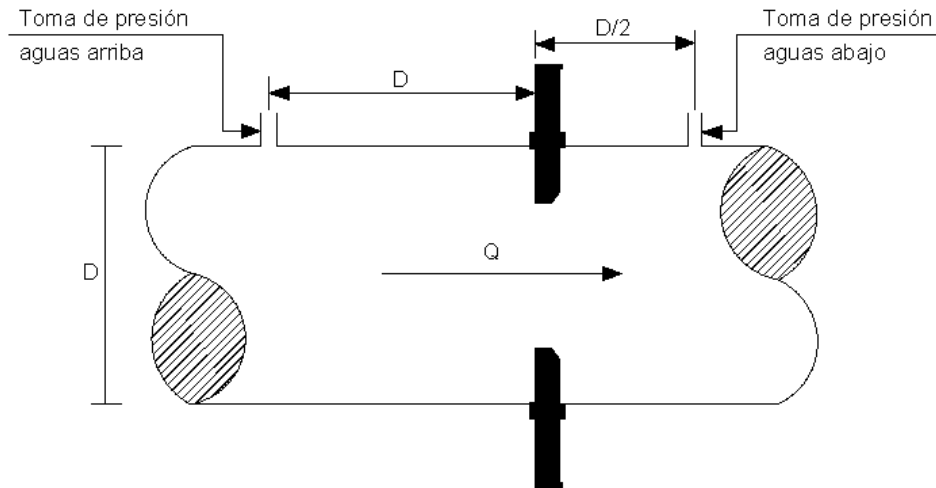


Figura 24. Tomas de presión a 1 pulgada

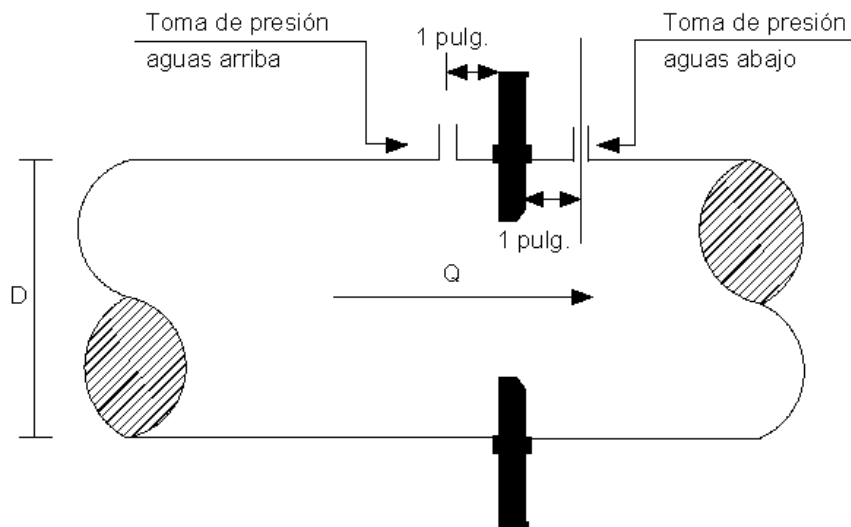
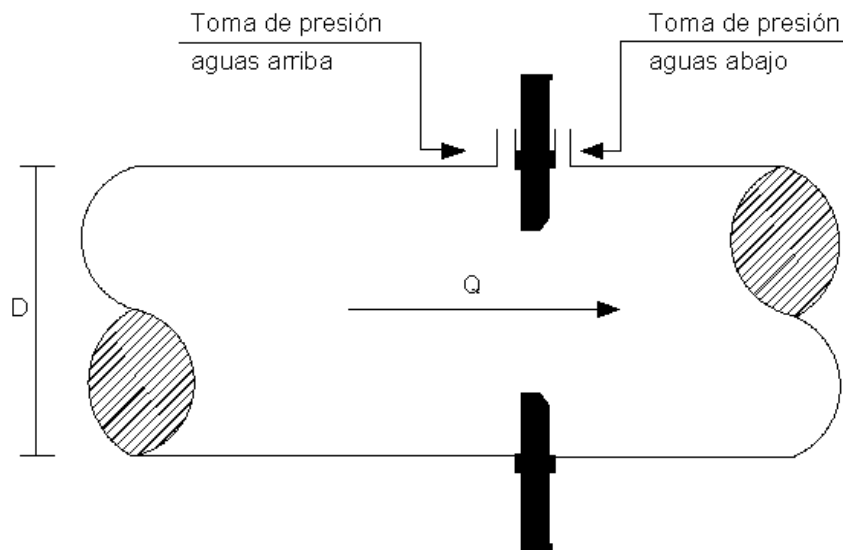


Figura 25. Tomas de presión en los bordes



2.2.6.1.4 Mantenimiento

La placa de orificio es usada en la medición de líquidos limpios y no es aplicable a fluidos con altas concentraciones de sólidos en suspensión, debido a la tendencia de los sólidos a acumularse aguas arriba de la placa, ocasionando que se presenten variaciones en los coeficientes de descarga y por lo tanto, una medición imprecisa del gasto.

Antes de realizar cualquier acción de mantenimiento, es conveniente realizar un aforo para evaluar el coeficiente de descarga C_D , si el valor del coeficiente ha cambiado se deberá efectuar una limpieza general, poniendo especial atención en los sólidos sedimentados en la placa de orificio.

Resulta importante que las tomas de presión se encuentren libres de sedimentos, para que su funcionamiento sea el adecuado, por lo cual su limpieza debe ser periódica.

En lo que respecta al sistema electrónico, éste no se ve afectado por vibraciones o desajustes y su mantenimiento es mínimo, se limita a inspecciones visuales.

2.2.6.1.5 Coeficiente de descarga C_d

El coeficiente de descarga C_d , se define como la razón de flujo real Q respecto al flujo ideal o teórico Q_t , o sea:

$$C_d = \frac{Q_r}{Q_t} \quad \text{Ec. 54}$$

Otra forma para calcular el coeficiente de descarga C_d , es la siguiente:

$$C_d = 0.5959 + 0.0312 \cdot \beta^{2.10} - 0.1840 \cdot \beta^8 + 0.0029 \cdot \beta^{2.50} \left(\frac{10^6}{R_e} \right)^{0.75} + \frac{0.09 \cdot L_1 \cdot \beta^4}{1 - \beta^4} - 0.0337 \cdot L_2 \cdot \beta^3 \quad \text{Ec. 55}$$

En esta expresión $L_1=l_1/D$ y $L_2=l_2/D$, los valores para cada tipo de instalación, se muestran en la tabla IV.

Tabla IV. Tipo de instalación

Tipo de instalación	L₁	L₂
D-D/2	1.00	0.50
A una pulg	25.40 / D*	
En los bordes	0.00	

D en mm

2.2.6.1.6 Factor de expansión

La ecuación del factor de expansión teórico no debe usarse para orificios así como tampoco la de la razón de presión crítica; ya que para un fluido compresible, en lo que respecta a la situación de vena contracta, es distinto de un incompresible. El fluido compresible no se restringe, según deja la garganta del orificio, siendo libre de expandirse transversal y longitudinalmente al punto de flujo con área mínima. Así la contracción de un chorro será menor para un fluido compresible que para un líquido.

La ecuación del factor de expansión para orificios concéntricos usada es:

$$Y = 1 - \left(0.41 + 0.35\beta^4 \right) \left(\frac{\Delta P_2 / P_1}{k_c} \right) \quad \text{Ec. 56}$$

En donde:

K_c = Relación de calores específicos del fluido a 100°C y a la presión de 1 Atm.

2.2.6.1.7 Ventajas y desventajas

Ventajas

- Pocas restricciones de instalación.
- Confiabilidad y simplicidad en el diseño.
- Bajo costo.
- Fácil manejo.
- Sin piezas móviles.
- Buena precisión ($\pm 1\%$).

Desventajas

- Rango limitado de medición.
- No apto para flujos con partículas en suspensión.
- Requiere verificación continua.
- Deterioro con el tiempo.
- Alta pérdida de carga.
- Requiere longitud de tramo recto aguas arriba.
- Sensible a la turbulencia aguas arriba.

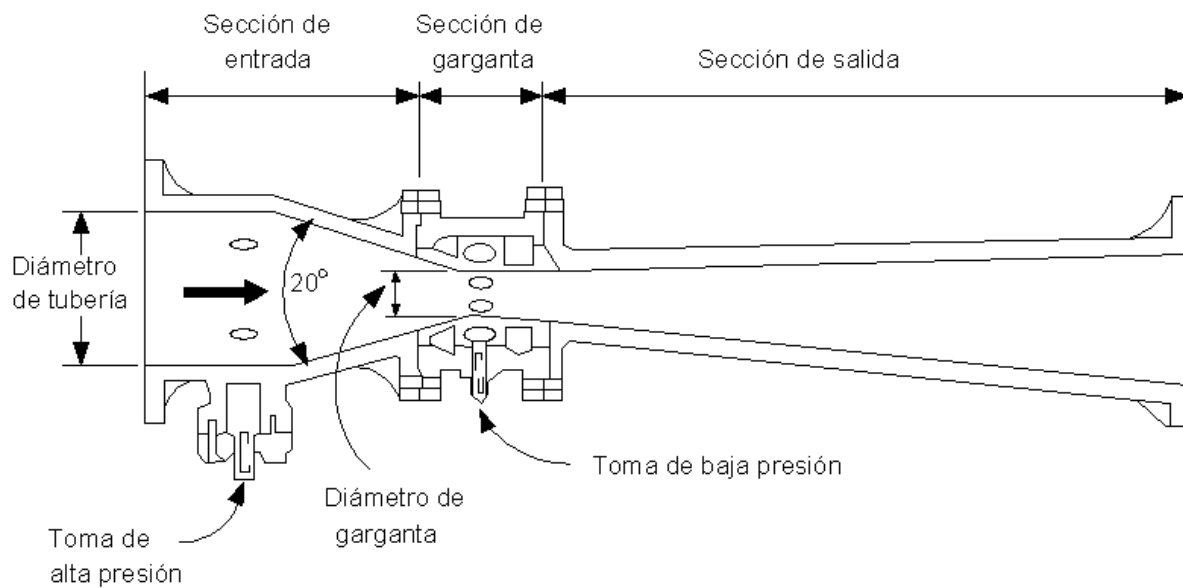
2.2.6.2. Tubo Venturí

2.2.6.2.1 Características

Este tipo de dispositivo se usa para medir flujos que contienen sólidos en suspensión. También se puede usar para líquidos cuando se necesita una restricción mínima y en los casos en que se requiere la mayor exactitud posible para la medición de flujo por presión diferencial, la cual oscila entre $\pm 0.5\%$.

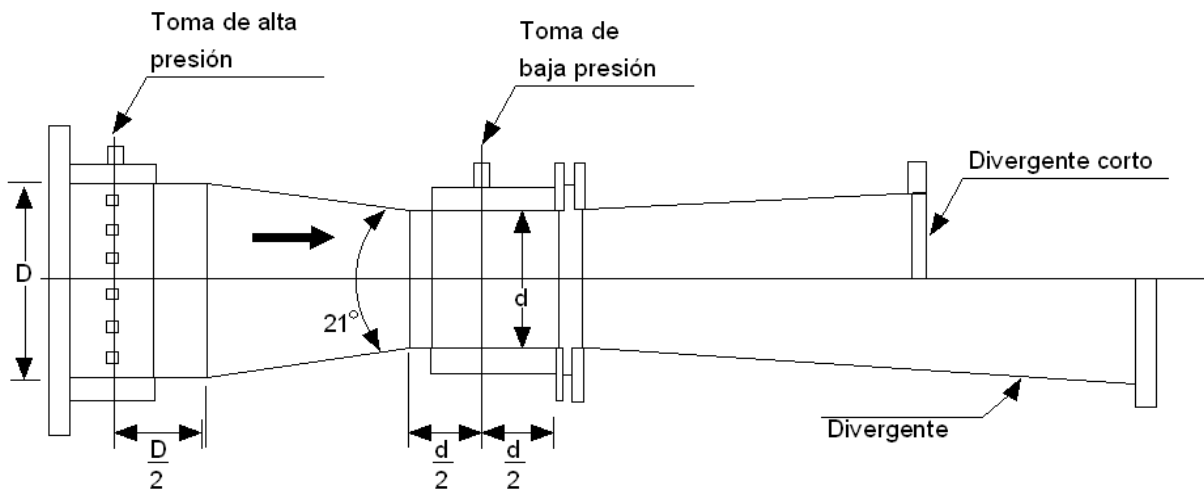
En la figura 26 se muestra un tubo Venturí típico, el cual consiste en una entrada cilíndrica cuyo diámetro es idéntico o muy parecido al diámetro interno de la tubería a que se conecta, un cono convergente, garganta y cono divergente.

Figura 26. Sección transversal del tubo Venturí



La entrada convergente tiene incluido un ángulo de 20° y el cono divergente un ángulo de 7 a 8° . El propósito del cono divergente es reducir la pérdida total de presión del medidor. La presión se mide por una serie de orificios en la entrada y en la garganta.

Figura 27. Dimensiones constructivas del tubo Venturí



El tubo Venturí se compone de tres secciones.

- Entrada
- Garganta
- Salida

La sección de entrada tiene un diámetro inicial igual al diámetro de la tubería y una sección cónica convergente que termina con un diámetro igual al de la garganta; la salida consiste en una sección cónica divergente que concluye con el diámetro de la tubería.

Es esencial que el flujo entrando al tubo Venturí sea uniforme. Por lo tanto, un largo tramo continuo con tubería recta aguas arriba y aguas abajo de la Idealización del tubo Venturí es deseable para mejorar la precisión en la

medición del flujo. Los requerimientos de tubería recta dependen del accesorio aguas arriba del medidor.

El tubo Venturí clásico puede construirse de cualquier material, incluso de plástico. En la figura 27 se aprecian las dimensiones de un tubo Venturí y la ubicación de las tomas de presión.

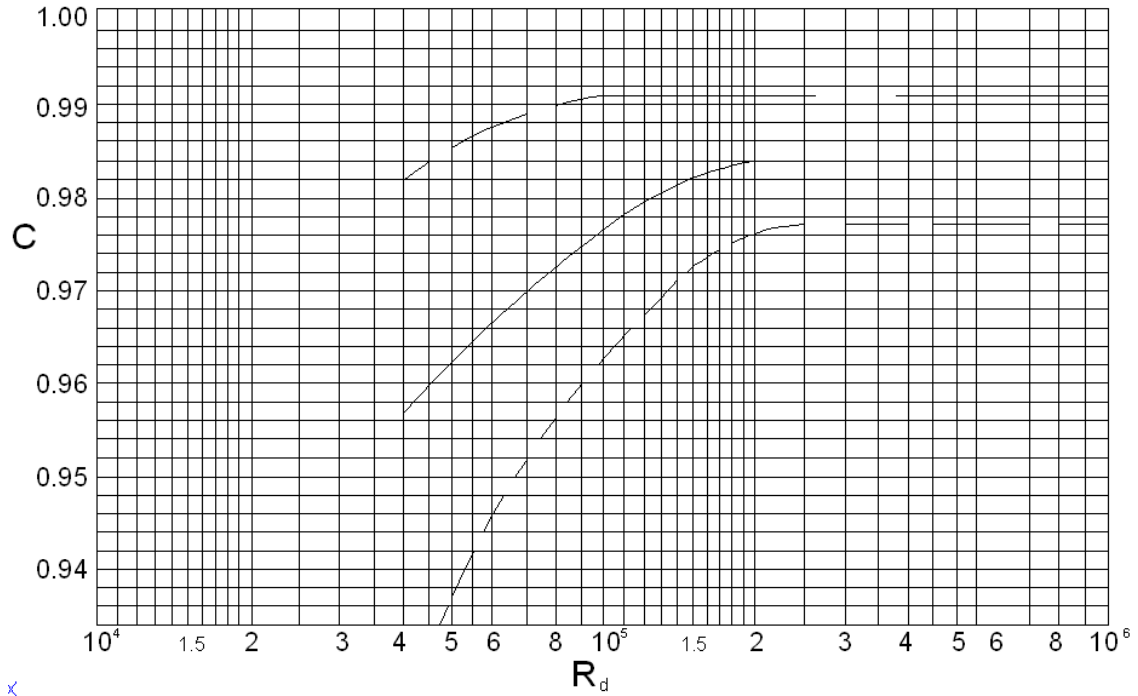
Cuando el tubo Venturí es pequeño (diámetros de 2 a 10 pulgadas) el medidor puede fabricarse mediante una pieza fundida. Para tamaños más grandes (diámetros de 8 a 48 pulgadas), su construcción se facilita mediante la soldadura de piezas separadas.

Bajo condiciones ideales un tubo Venturí puede tener un error $\pm 0.50\%$ de la lectura, pero comúnmente los errores alcanzan valores del ± 1.0 o $\pm 2.0\%$ por ciento.

2.2.6.2.2 Coeficiente de descarga C_d

En la figura 28 se encuentran los coeficientes de descarga para tubos Venturí. Cada fabricante proporciona gráficas similares a éstas para la determinación del coeficiente.

Figura 28. Coeficiente de descarga de tubo Venturí en función de R_d



La tolerancia límite está marcada por las líneas punteadas.

2.2.6.2.3 Factor de expansión para tubos Venturí

El factor de expansión se calcula basándose en el supuesto de la expansión de un gas ideal, carente de rozamiento, en una expansión adiabática o isoentrópica desde la garganta de la restricción, lo que da por resultado:

$$Y = \left[\frac{r^{2/k_c} \left(1 - r \frac{k_c - 1}{k_c} \right) (1 - B^4)}{(1 - r)(k_c - 1)(1 - B^4 r^{2/k_c})} \right]^{1/2} \quad \text{Ec. 57}$$

Donde:

K_c = Relación de calores específicos

R = P_2/P_1

2.2.6.2.4 Tubo Venturí de inserción

Es una variante del tubo Venturí común y corriente que se puede colocar dentro de una tubería para medir altas presiones a un costo mucho menor que el que representaría la adquisición de un tubo Venturi normal.

Cuenta con todas las características deseables del tubo Venturi estándar para mediciones de flujo. Este tubo Venturí se introduce en la tubería y se sujeta con un anillo robusto, que es parte integral del tubo. La conexión de baja presión se hace en la parte que contiene el anillo de presión de la garganta. La conexión de alta presión se hace a través de la pared de la tubería, aproximadamente a una distancia igual a un diámetro de tubería corriente arriba a partir del cono de entrada.

2.2.6.2.5 Aplicación y selección de las placas de orificio y tubo Venturí

Para seleccionar el dispositivo diferencial apropiado para una selección específica, primeramente debén establecerse algunos lineamientos básicos, El primer paso es dividir los fluidos que van a medirse en limpios y con sólidos en suspensión, Cualquiera de los dispositivos primarios que se describen se pueden usar para gases bastantes sucios, tales como los de un digestor, Los fluidos sucios pueden medirse con bastante precisión, sólo con los dispositivos Venturí que no tienden a obstruirse. En general los líquidos sucios o con partículas en suspensión pueden medirse con los tubos Venturí ya sean cortos o largos.

El segundo factor a tomar en cuenta en la selección es su costo de operación en términos de la pérdida de carga permanente, la cual se predice mediante la relación β .

2.2.6.2.6 Instalación del tubo Venturí

Deberá montarse en la tubería de tal forma que en una distancia equivalente a por lo menos 10 diámetros de tubo corriente arriba y 3 diámetros de tubo corriente abajo, no existan codos u otros accesorios.

2.2.6.2.7 Ventajas y desventajas del tubo Venturí:

Ventajas

- Precisión.
- No obstruye el flujo.
- Con pérdida de carga baja.
- Poco efecto si se tienen sólidos en movimiento.
- Confiable y simplicidad de diseño.
- Operación estable.
- Resistente.
- Calibración sencilla.
- No tiene partes móviles.
- Su mantenimiento no necesita interrumpir el flujo.

Desventajas

- Rango de operación limitado.
- Requerimientos de longitud en su instalación, comparado con otros medidores.
- Es más costosa que la placa de orificio.
- El Venturí está diseñado para instalaciones permanentes.
- El Venturi debe ser cuidadosamente diseñado.

2.2.6.3 Medidor tipo dall

2.2.6.3.1 Características

En 1887 fueron desarrolladas un número de variaciones conforme al tubo medidor Venturí corto, entre las recientes introducciones de aparatos Venturí está el tubo dall, desarrollado en Inglaterra.

El tubo dall consiste en un cuerpo cilíndrico bridado, diseñado con una pequeña entrada recta, la cual termina abruptamente con una reducción de diámetro, continúa con una reducción cónica, una pequeña garganta y una sección divergente a la salida.

El tubo dall se usa para líneas de corriente con velocidad alta, obteniéndose un amplio rango de presiones diferenciales, mayor que el obtenido por el medidor Venturí estándar. Los orificios de presión están localizados en la entrada y en la salida de la garganta.

Dado que es mucho más reducido que el Venturí, tiene menos restricciones en su instalación. No se recomienda para fluidos con una carga de sedimentos de importancia.

2.2.6.3.2 Coeficiente de descarga C_d

El coeficiente de descarga del tubo dall estará dado por la figura 28 que está en función del número de Reynolds.

2.2.6.3.3 Instalación

La instalación del tubo dall será la misma que el medidor Venturí.

2.2.6.3.4 Ventajas y desventajas

Ventajas

- Precisión
- No obstruye el flujo
- Con pérdida de carga baja.
- Confiable y simple en su diseño.
- Operación estable.
- Resistente
- Calibración sencilla.
- No tiene partes móviles.
- Su mantenimiento no exige interrupción del flujo.

Desventajas

- Rango de operación limitado.

- Requerimientos de longitud en su instalación, comparado con otros medidores.
- Alto costo.

2.2.7 De área variable

Un medidor de área variable es aquel en el cual la pérdida de presión es constante. Esta pérdida de presión se mantiene constante gracias a la variación del área de flujo. La lectura del flujo depende de la variación de esta área.

La corriente de fluido pasa a través de un obstáculo, que es el que varía el área de flujo, en forma tal que se mantiene una diferencia de presión constante. El medidor más usado de esta clasificación es el Rotámetro.

2.2.7.1 Rotámetro

2.2.7.1.1 Características

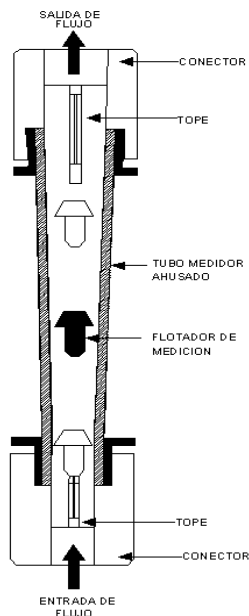
Se compone de dos partes fundamentales, como se observa en la figura 29, las cuales son:

- Un tubo ahusado de vidrio o de metal colocado verticalmente dentro de un sistema de tubería para líquidos o gases, insertando el extremo grande en la parte superior.

- Un flotador medidor que puede moverse libremente en sentido vertical dentro del tubo, el cual es de una densidad mayor que la del fluido, para evitar que éste flote por sí solo.

El fluido entra en el fondo del tubo y al fluir hacia arriba, ejerce una fuerza sobre el flotador y lo arrastra. Conforme el flotador asciende hacia el extremo más amplio del tubo, se abre un pasaje anular entre la pared interna del tubo y la periferia del flotador. Esto forma una abertura concéntrica a través de la cual pasa el fluido. Cuando la fuerza hacia arriba sobre el flotador es igual a la fuerza gravitacional que actúa hacia abajo sobre el mismo, éste se detiene en algún punto dentro del tubo y el flotador entonces descansa en equilibrio dinámico. Un aumento adicional en la velocidad de flujo hará que el flotador ascienda todavía más dentro del tubo y una reducción en el flujo hará que descienda a un nivel inferior.

Figura 29. Corte esquemático de un rotámetro



El flujo es indicado por la posición del flotador sobre una escala graduada o puede detectarse magnéticamente y su valor transmitido a una localización remota.

En aplicaciones donde la posición del flotador no pueda ser observada, cuando se mida el flujo de un fluido opaco, o cuando un tubo metálico sea necesario por las elevadas presiones de operación, la posición del flotador se utiliza para regular una señal eléctrica o neumática para propósitos de indicación, registro, transmisión, integración o control de flujo.

2.2.7.1.2 Aplicaciones del rotámetro

Su aplicación es particularmente apropiada para:

- Flujos pequeños; hasta de 300 GPM de agua a 1200 SCFM de aire.
- Cuando se requiere una respuesta lineal al flujo.
- Medición con una exactitud hasta de 0.5% del flujo instantáneo.
- Cuando se necesite transmitir la señal de flujo, ya sea neumática o electrónicamente.
- Manejar fluidos viscosos o fluidos que requieran una camisa de vapor.
- Manejar flujos a grandes presiones, hasta de 6,000 PSI.
- Manejar en algunos casos, fluidos corrosivos.

- Evitar el efecto de la tubería.

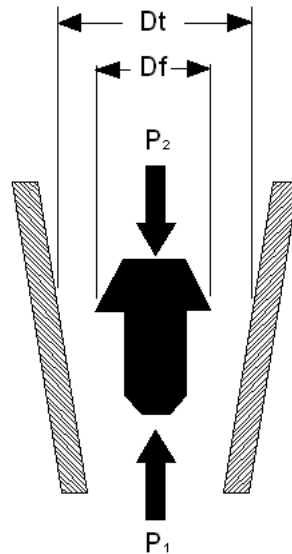
2.2.7.1.3 Derivación de la ecuación básica de flujo para rotámetros

En el equilibrio dinámico, la suma de las fuerzas que actúan verticalmente sobre el flotador, serán iguales a cero.

$$\sum_{y=1}^n Fy = 0$$

Ec. 58

Figura 29. Fuerzas en el flotador



Al considerar las fuerzas que actúan arriba con signo positivo y las que actúan hacia abajo con signo negativo.

La fuerza neta que se ejerce sobre el área del flotador es:

$$+ P_1 \frac{(\pi D_f^2)}{4} - P_2 \frac{(\pi D_f^2)}{4} \quad \text{Ec. 59}$$

donde:

D_f = Diámetro del flotador

P_1, P_2 = Presión en el punto 1 y 2 respectivamente.

La fuerza debida al peso del flotador es:

$$- V_f \rho_f \frac{g}{g_c} \quad \text{Ec. 60}$$

donde:

V_f = Volumen del flotador

ρ_f = Densidad del flotador

g = Aceleración debida a la gravedad

g_c = Factor de conversión de la ley de Newton.

La fuerza de empuje es igual al peso del fluido desalojado, o sea:

$$+ V_f \rho \frac{g}{g_c} \quad \text{Ec. 61}$$

donde:

ρ = Densidad del fluido.

Sumando las ecuaciones, y ordenando términos se obtiene:

$$P_1 - P_2 = \frac{4v_f}{D_f^2} (\rho_f - \rho) \frac{g}{g_c} \quad \text{Ec. 62}$$

La ecuación de Torricelli para la velocidad del fluido en el espacio anular de flujo es:

$$V = C \sqrt{2gh} \quad \text{Ec. 63}$$

La altura hidrostática es:

$$h = \frac{P_1 - P_2}{\rho} \frac{g_c}{g} \quad \text{Ec. 64}$$

La ecuación de continuidad establece que:

$$Q = AV \quad \text{Ec. 21}$$

donde:

A = área de flujo, para el caso de Rotámetro

$$A = \frac{\pi}{4} (D_t^2 - D_f^2) \quad \text{Ec. 65}$$

Combinando las ecuaciones; ordenando términos y simplificando se obtiene:

$$Q = \frac{C(D_t^2 - D_f^2)}{D_f} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sqrt{g v_f \frac{(\rho_f - \rho)}{\rho}} \quad \text{Ec. 66}$$

Llamando conicidad del tubo a:

$$\beta = D_t / D_f \quad \text{Ec. 67}$$

En donde:

$$D_t = \beta D_f \quad \text{Ec. 68}$$

Sustituyendo y operando convenientemente se obtiene:

$$Q = C(\beta^2 - 1) D_f \sqrt{\frac{\pi}{2}} \sqrt{g v_f \frac{(\rho_f - \rho)}{\rho}} \quad \text{Ec. 69}$$

La casa Fischer & Porter, fabricante de Rotámetros define el coeficiente de flujo K_r para éstos como:

$$K_r = C(\beta^2 - 1) D_f \sqrt{\frac{\pi}{2}} \quad \text{Ec. 70}$$

Sustituyendo se obtiene:

$$Q = K_r D_f \sqrt{g v_f \frac{(\rho_f - \rho)}{\rho}} \quad \text{Ec. 71}$$

Se sabe que:

$$v = \frac{M}{\rho} \quad \text{Ec. 72}$$

donde:

V = Volumen

M = Masa

De lo cual se obtiene:

$$v_f = \frac{M_f}{\rho_f} \quad \text{Ec. 73}$$

donde

M_f = Masa del flotador

Sustituyendo se obtiene:

$$Q = K_r D_f \sqrt{\frac{g M_f}{\rho_f} \frac{(\rho_f - \rho)}{\rho}} \quad \text{Ec. 74}$$

La fuerza de sustentación se define como:

$$F = g M_f \frac{(\rho_f - \rho)}{\rho_f} \quad \text{Ec. 75}$$

Sustituyendo, se obtiene:

$$Q = K_r D_f \sqrt{\frac{F}{\rho}} \quad \text{Ec. 76}$$

Esta es la ecuación de flujo para Rotámetros, la cual indica que el flujo es directamente proporcional al valor del parámetro de flujo K, el cual varía primordialmente con la elevación del flotador en el tubo.

Para cada tipo de flotador existen factores de corrección de flujo f_g y f_b los cuales modifican la ecuación de flujo así:

$$Q = K_r f_b f_g D_f \sqrt{\frac{F}{\rho}} \quad \text{Ec. 77}$$

2.2.7.1.4 Operación e Instalación del Rotámetro

Debido a que en estos medidores la gravedad actuante en el flotador es uno de los factores principales para indicar el valor del flujo, se deben de montar verticalmente, incluso en una instalación de tubería horizontal.

Existe un efecto mínimo en la distribución de flujo debido a codos, válvulas, ángulos y otros accesorios corriente arriba, el cual para efectos de medición es prácticamente despreciable, y por lo cual no necesariamente debe de existir una longitud de tubería recta libre de accesorios corriente arriba del medidor. Sin embargo, se deben de tener muy en cuenta las especificaciones de instalación dadas por el fabricante, para cada tipo de rotámetros y aplicación específica.

Las garantías de precisión de un medidor de área variable son de tipo general, lo cual significa que se trata de la garantía del grado de precisión con que el dispositivo de presentación final indica el gasto real dentro de las tuberías. El fabricante está en posibilidad de facilitar las certificaciones de la precisión de cada medidor en lo individual. Estas certificaciones indican la precisión de todos los puntos en la escala y se puede expresar como un porcentaje del gasto instantáneo, en lugar del máximo.

Los medidores de área variable son particularmente adecuados para flujos pequeños y se pueden usar para medir con precisión gastos menores de $0.1 \text{ cm}^3/\text{min}$, de líquido; y $1.0 \text{ cm}^3/\text{min}$ de gas. El tamaño de estos medidores se debe determinar correctamente para el servicio al que se desea aplicar, los fabricantes de estos medidores disponen de gráficas de corrección y selección de tamaños, y éstas se basan en el conocimiento de las densidades, viscosidades y temperatura real del fluido que se va a medir.

2.2.7.1.5 Ventajas y desventajas de los Rotámetros

Son los medidores más económicos para flujos pequeños de líquidos y gases, en líneas de tubería hasta de 2 pulgadas de diámetro. Se utilizan ampliamente para manejar fluidos que no contengan partículas en suspensión y donde la configuración del sistema garantiza una buena visibilidad para la lectura, si ésta se hace directamente sobre la escala del instrumento. Esta desventaja de visibilidad puede evitarse por uno de los varios métodos de lectura remota, pero éstos aumentan el costo del medidor.

Se deben de aplicar correcciones cuando se mide un flujo de fluido de diferente densidad para la cual el instrumento viene calibrado. Cada fabricante

tiene una serie de curvas para la corrección de acuerdo a la gravedad específica, presión y temperatura del gas.

Debido a que estos medidores deben mantenerse en posición vertical durante su operación, y que las aceleraciones verticales a que puede someterse el medidor afectan el valor aparente de g, no deben emplearse en equipos que requieran mediciones mientras están en movimiento.

El tubo vertical del medidor también está sujeto a la presión estática y a cualquier aumento de presión del sistema; por lo cual debe utilizarse el tubo de metal para presiones elevadas de operación.

Resulta caro en los tamaños grandes, por lo que se usan frecuentemente en instalaciones con diámetros de tubos menores de 2 pulgadas.

2.2.8 Medidores mecánicos

2.2.8.1 Características

Los diversos tipos y tamaños de medidores domiciliarios, actualmente producidos se distinguen por cualidades específicas de tamaño, capacidad, precisión, etc., que son las características definidoras del diseño, fabricación, selección y control de los aparatos.

2.2.8.1.1 Capacidad nominal

Es el volumen de agua que debe pasar por un medidor en cierta unidad de tiempo determinada, con una pérdida de carga entre sus orificios de entrada y de salida igual a un valor convencional fijado por las especificaciones adoptadas.

De modo general, el valor de la pérdida de carga es de 10 metros (33 pies) de columna de agua, o de 15 libras por pulgada cuadrada, para los medidores empleados en las conexiones domiciliarias de uso doméstico.

Para expresar la capacidad nominal se emplean como unidades metros cúbicos por hora (m^3/h), en el sistema métrico y de galones por minutos (GPM), en el sistema inglés. En el sistema decimal son muy usadas series como 2, 3, 5, 7, 10, 20, etc. m^3/h ; en el inglés, 20, 30, 50, 100, 160, 300, etc. GPM.

2.2.8.1.2 Capacidad real

Es el volumen de agua que realmente pasa por un medidor en la unidad de tiempo, con una pérdida de carga entre sus orificios de entrada y de salida, de igual valor al convencional fijado para establecer la capacidad nominal. Por ejemplo, un medidor de $3m^3/h$ de capacidad nominal que con 10 metros de pérdida de carga deja pasar $4m^3/h$, tiene una capacidad real de $4m^3/h$.

Puede considerarse, por tanto, que la capacidad nominal se refiere a un tipo de medidor y la real a un aparato determinado. La nominal es el gasto que debe pasar, mientras que la real es el gasto que pasa efectivamente.

2.2.8.1.3 Gastos admisibles

Son los volúmenes de agua que pueden pasar por el medidor en un tiempo determinado sin afectar sus propiedades mecánicas y de medición. Esos límites de gasto suelen ser expresados en función de la capacidad nominal de acuerdo con la duración de los flujos; en la práctica pueden considerarse como valores que definen la capacidad real de los medidores.

2.2.8.1.4 Gasto instantáneo

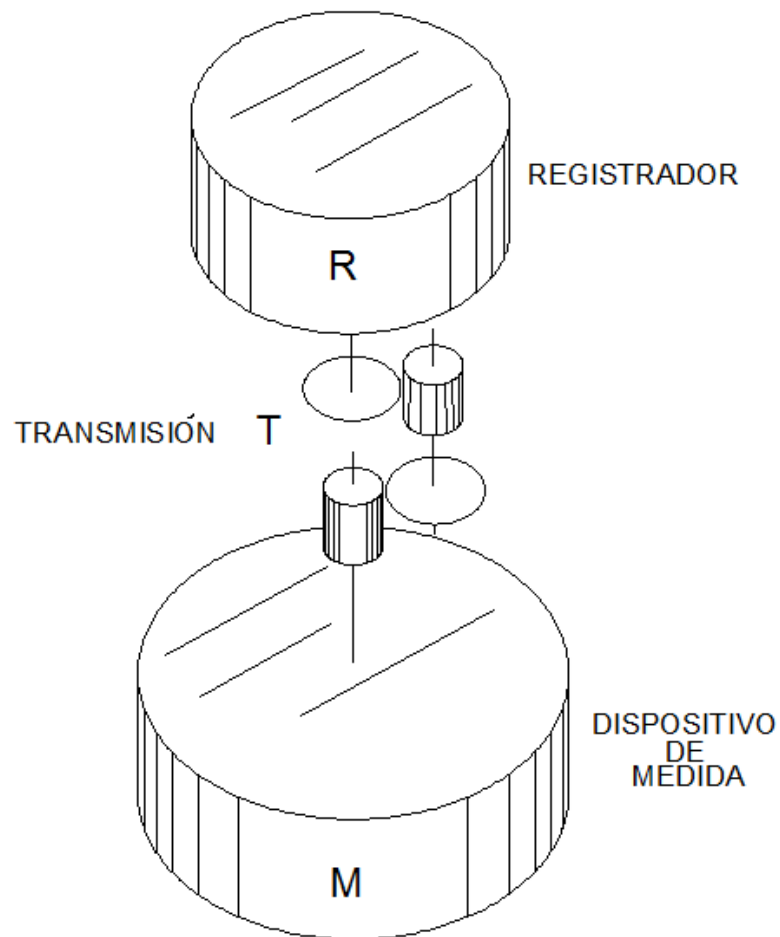
Gasto que puede pasar por un medidor muy pocas veces por día y por periodos de sólo algunos minutos de duración.

Las características normalizadas de acuerdo con las especificaciones adoptadas, se refieren a propiedades: dimensionales y de capacidad, hidráulicas y de medición.

2.2.8.2 Partes y componentes

Los medidores comúnmente empleados son definidos fundamentalmente por las características de sus tres elementos componentes esenciales:

Figura 30. Medidor mecánico



Un dispositivo de medida (M) (cámara de medición), el cual mediante un determinado sistema, produce continuamente un movimiento en función de la cantidad de agua que pasa por el medidor.

Una transmisión (T), constituida por un tren de engranajes que transmite a un registrador el movimiento producido en el dispositivo de medida.

Un registrador (R), que registra acumulativamente los consumos determinados por el dispositivo de medida y transmitidos por el tren reductor.

Las tres partes componentes determinan el tipo del medidor. No siempre se las encuentra perfectamente diferenciadas; cada uno de los fabricantes las integra de acuerdo con sus principios y diseños específicos.

2.2.8.3 Dispositivos de medida

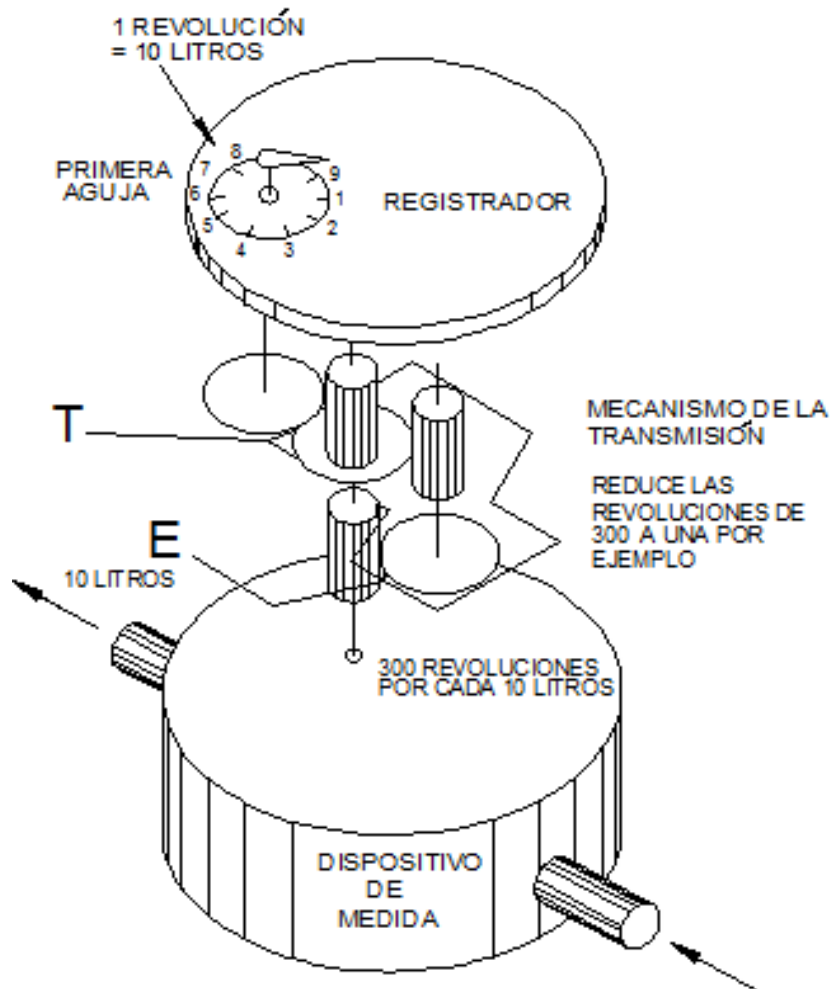
Los dispositivos de medida se han constituido según dos principios de medición de líquidos: el volumétrico y el inferencial. El primero da origen a los medidores denominados de "desplazamiento positivo", o "volumétricos"; el segundo, a los denominados "inferenciales", o de "velocidad".

2.2.8.4 Transmisión mecánica

La transmisión mecánica está constituida por un conjunto de dos piñones situados el uno dentro del agua y el otro en la zona seca, ligados por un eje que atraviesa la placa separadora de las dos zonas, la húmeda y la seca. El orificio

correspondiente va sellado por una empaquetadura para impedir el paso del agua por el contorno del eje. Los medidores de transmisión mecánica se caracterizan, en general, por tener el tren de engranajes dentro del agua.

Figura 32. Mecanismo de transmisión

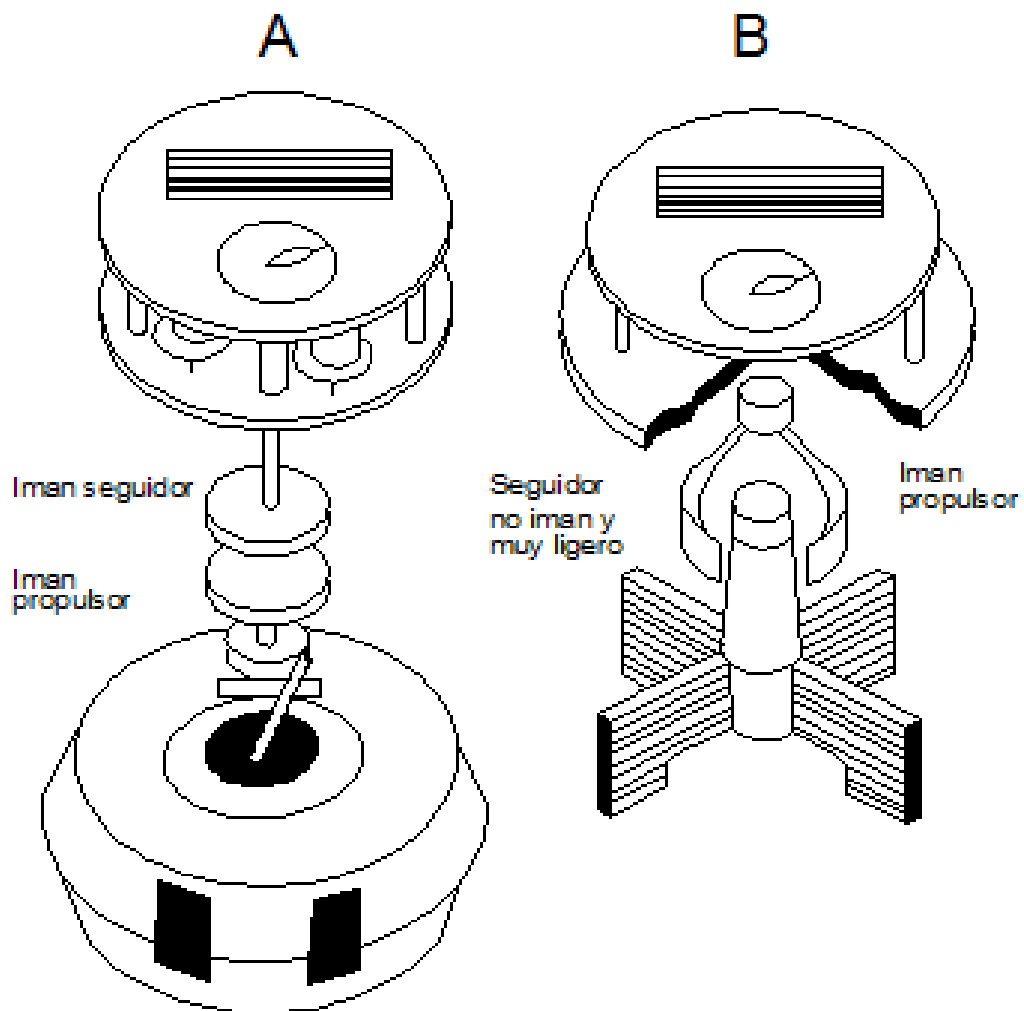


2.2.8.5 Transmisión magnética

La transmisión magnética consiste fundamentalmente en un acople entre dos de sus puntos hecho mediante un conjunto simple o complejo de imanes

permanentes, que permite pasar el movimiento de los elementos situados dentro del agua a los que están fuera a través de una lámina separadora, no magnética, sin necesidad de un orificio que los comunique. Está constituida por dos elementos, uno de los cuales, el que va en la zona mojada, es siempre un imán permanente.

Figura 33. Acoples magnéticos



En los medidores volumétricos, el acople magnético puede estar formado por piezas relativamente grandes.

Los medidores de velocidad, como dan un número grande de revoluciones, requieren piezas livianas en el acople.

3. ENSAYO DE LABORATORIO: MEDIDORES DE FLUJO EN TUBERÍAS A PRESIÓN

3.1 Descripción del ensayo

1. Encender la bomba y enviar directamente el flujo en donde estará ubicado la placa de orificio y el tubo Venturí.
2. Conectar el manómetro a los racores (tomas de presión) de la placa de orificio, tubo Venturí y purgar el aire dentro de las mangueras.
3. Abrir la válvula que regula el agua a través del rotámetro, para obtener diferentes valores medidos de caudal.
4. Tomar las diferencias de alturas en los meniscos del manómetro, en centímetros de mercurio.
5. Tomar la lectura del flujo en el rotámetro, en metros cúbicos por hora ($m^3/hora$).
6. Tomar tres tiempos para medir el caudal que circula por la tubería.

3.2 Datos de laboratorio

En el presente ensayo se procedió haciendo un aforo volumétrico a través de una tubería de 2" de diámetro, de hierro fundido, con una toma de tres tiempos y corroborando el error de la toma con la siguiente ecuación:

$$E = \frac{t_{\max} - t_{\min}}{t_{\max}} * 100\%$$

Si el error es menor o igual a 2% está dentro de lo permisible y se puede utilizar, de lo contrario se deberá repetir la toma de tiempos.

Tabla V. Datos de aforo

No.	V	Tiempos (s)			Error	Chequeo
	(L)	t1	t2	t3	%	Error
1	20	62,48	63,18	62,67	1,11	utilizar
2	20	53,63	52,75	52,73	1,68	utilizar
3	20	45,11	45,00	45,87	1,90	utilizar
4	20	39,36	38,74	39,18	1,58	utilizar
5	20	38,25	38,35	38,95	1,80	utilizar
6	20	33,55	34,17	33,49	1,99	utilizar
7	20	32,11	32,50	32,14	1,20	utilizar
8	20	27,30	27,55	27,82	1,87	utilizar
9	20	26,48	26,10	26,50	1,51	utilizar
10	20	23,50	23,96	23,62	1,92	utilizar
11	20	22,13	21,95	22,25	1,35	utilizar
12	20	21,48	21,23	21,26	1,16	utilizar
13	20	19,80	20,20	19,85	1,98	utilizar
14	20	19,51	19,75	19,87	1,81	utilizar
15	20	18,68	19,00	18,66	1,79	utilizar
16	20	16,55	16,40	16,36	1,15	utilizar

17	20	15,85	15,60	15,70	1,58	utilizar
18	20	14,91	14,66	14,95	1,94	utilizar
19	20	14,74	14,48	14,55	1,76	utilizar
20	20	13,25	13,01	13,27	1,96	utilizar
21	20	12,85	12,61	12,86	1,94	utilizar
22	32	20,70	20,80	20,59	1,01	utilizar
23	32	20,75	20,50	20,77	1,30	utilizar
24	32	19,69	19,55	19,65	0,71	utilizar
25	32	19,29	19,36	19,22	0,72	utilizar
26	32	18,11	18,00	18,36	1,96	utilizar
27	32	17,40	17,12	17,44	1,83	utilizar
28	32	16,60	16,36	16,46	1,45	utilizar
29	32	15,88	15,80	15,95	0,94	utilizar
30	32	16,17	16,2	16,5	2,00	utilizar
31	32	15,80	15,50	15,65	1,90	utilizar
32	32	14,95	14,75	15,05	1,99	utilizar
33	32	14,10	14,38	14,27	1,95	utilizar
34	32	13,63	13,60	13,85	1,81	utilizar
35	32	13,60	13,55	13,56	0,37	utilizar
36	32	13,25	13,35	13,25	0,75	utilizar
37	32	13,20	13,17	13,05	1,14	utilizar
38	32	12,87	12,76	12,65	1,71	utilizar
39	32	12,31	12,38	12,19	1,53	utilizar
40	32	12,12	11,98	12,15	1,40	utilizar
41	32	11,90	11,67	11,75	1,93	utilizar
42	32	11,30	11,32	11,50	1,74	utilizar
43	32	11,00	11,10	11,20	1,79	utilizar
44	32	10,80	10,60	10,65	1,85	utilizar
45	32	9,98	9,90	9,80	1,80	utilizar
46	32	9,60	9,50	9,69	1,96	utilizar

3.3 Desviación estándar en toma de datos

En la toma de datos es necesario graficar varios caudales que pasan por la tubería y registrar la presión diferencial que se genera por dicho gasto. El ajuste de los datos consiste en determinar un valor k , que permita que una función $Q = f(\Delta h)$ represente de la mejor forma posible los pares medidos.

$$k = \frac{\sum(Q * \sqrt{\Delta h})}{\sum(\sqrt{\Delta h})}$$

Para el ensayo se procederá a emplear mínimos cuadrados para encontrar la desviación estándar de los datos.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(Q - k * \sqrt{\Delta h})^2}{n - 1}}$$

Donde n es el número de pruebas. Para la obtención de la desviación es útil realizar los cálculos en forma tabular:

A). Desviación estándar de la placa de orificio. De la tabla VI se procederá a calcular el valor de k y la desviación estándar de la placa de orificio:

$$k = \frac{\sum(64.613)}{\sum(26.29)}$$

$$k = 2.45$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{0.371}{46 - 1}}$$

$$\sigma = 0.09$$

B). Desviación estándar tubo Venturí. De la tabla VII se procederá a sacar el valor de k y la desviación estándar del tubo Venturí:

$$k = \frac{\sum(66.719)}{\sum(28.01)}$$

$$k = 2.38$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{0.37}{46-1}}$$

$$\sigma = 0.09$$

C). Desviación estándar de rotámetro. Para encontrar la desviación estándar del rotámetro se procederá con las siguientes fórmulas:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(X - \bar{X})^2}{N}}$$

$$\sigma_{Rotámetro} = \sqrt{\frac{\sum(X_{AFORO} - \bar{X}_{AFORO})^2}{N}} - \sqrt{\frac{\sum(X_{ROTAMETRO} - \bar{X}_{ROTAMETRO})^2}{N}}$$

$$\sigma_{Rotámetro} = \sqrt{\frac{\sum(32.594)^2}{46}} - \sqrt{\frac{\sum(31.751)^2}{46}}$$

$$\sigma_{Rotámetro} = 0.12$$

Tabla VI. Desviación estándar placa de orificio

No.	V (L)	Placa de orificio		Tiempo(s)		
		Po (cm-hg)	Pf (cm-hg)	t1	t2	t3
1	20	22,15	22,00	62,48	63,18	62,67
2	20	22,10	21,95	53,63	52,75	52,73
3	20	22,05	21,90	45,11	45,00	45,87
4	20	22,10	21,85	39,36	38,74	39,18
5	20	22,15	21,80	38,25	38,35	38,95
6	20	22,20	21,75	33,55	34,17	33,49
7	20	22,40	21,90	32,11	32,50	32,14
8	20	22,40	21,85	27,30	27,55	27,82
9	20	22,50	21,80	26,48	26,10	26,50
10	20	22,55	21,75	23,50	23,96	23,62
11	20	22,60	21,70	22,13	21,95	22,25
12	20	22,65	21,60	21,48	21,23	21,26
13	20	22,70	21,60	19,80	20,20	19,85
14	20	22,80	21,50	19,51	19,75	19,87
15	20	22,85	21,40	18,68	19,00	18,66
16	20	22,95	21,30	16,55	16,40	16,36
17	20	23,00	21,20	15,85	15,60	15,70
18	20	23,10	21,15	14,91	14,66	14,95
19	20	23,30	21,10	14,74	14,48	14,55
20	20	23,40	21,00	13,25	13,01	13,27
21	20	23,50	20,90	12,85	12,61	12,86
22	32	23,65	20,70	20,70	20,80	20,59
23	32	23,85	20,60	20,75	20,50	20,77
24	32	24,00	20,40	19,69	19,55	19,65
25	32	24,10	20,30	19,29	19,36	19,22
26	32	24,30	20,10	18,11	18,00	18,36
27	32	24,50	20,00	17,40	17,12	17,44
28	32	24,60	19,80	16,60	16,36	16,46
29	32	24,90	19,60	15,88	15,80	15,95
30	32	25,00	19,40	16,17	16,20	16,50
31	32	25,10	19,30	15,80	15,50	15,65
32	32	25,35	19,10	14,95	14,75	15,05
33	32	25,50	19,00	14,10	14,38	14,27
34	32	25,55	18,80	13,63	13,60	13,85
35	32	25,80	18,70	13,60	13,55	13,56
36	32	25,90	18,50	13,25	13,35	13,25
37	32	26,00	18,35	13,20	13,17	13,05
38	32	26,20	18,20	12,87	12,76	12,65
39	32	26,40	18,00	12,31	12,38	12,19
40	32	26,50	17,80	12,12	11,98	12,15
41	32	26,70	17,60	11,90	11,67	11,75
42	32	26,70	17,40	11,30	11,32	11,50
43	32	27,00	17,20	11,00	11,10	11,20
44	32	27,10	17,00	10,80	10,60	10,65
45	32	27,50	16,70	9,98	9,90	9,80
46	32	27,70	16,50	9,60	9,50	9,69

No.	Δh m.c.a.	Aforo Q (L/S)	$\sqrt{\Delta h}$	$Qx\sqrt{\Delta h}$	$kx\sqrt{\Delta h}$	$Q - kx\sqrt{\Delta h}$	$(Q - kx\sqrt{\Delta h})^2$
1	0,02	0,319	0,143	0,046	0,351	-0,032	0,001
2	0,02	0,377	0,143	0,054	0,351	0,026	0,001
3	0,02	0,441	0,143	0,063	0,351	0,090	0,008
4	0,03	0,512	0,184	0,094	0,453	0,058	0,003
5	0,05	0,519	0,218	0,113	0,536	-0,017	0,000
6	0,06	0,593	0,247	0,147	0,608	-0,015	0,000
7	0,07	0,620	0,261	0,162	0,641	-0,021	0,000
8	0,07	0,726	0,273	0,198	0,672	0,054	0,003
9	0,10	0,759	0,309	0,234	0,758	0,000	0,000
10	0,11	0,844	0,330	0,278	0,811	0,033	0,001
11	0,12	0,905	0,350	0,316	0,860	0,045	0,002
12	0,14	0,938	0,378	0,354	0,929	0,009	0,000
13	0,15	1,003	0,387	0,388	0,951	0,052	0,003
14	0,18	1,015	0,420	0,427	1,033	-0,019	0,000
15	0,20	1,065	0,444	0,473	1,091	-0,026	0,001
16	0,22	1,217	0,474	0,576	1,164	0,053	0,003
17	0,24	1,273	0,495	0,630	1,216	0,056	0,003
18	0,27	1,348	0,515	0,694	1,266	0,082	0,007
19	0,30	1,371	0,547	0,750	1,344	0,026	0,001
20	0,33	1,518	0,571	0,867	1,404	0,114	0,013
21	0,35	1,566	0,595	0,931	1,462	0,104	0,011
22	0,40	1,546	0,633	0,979	1,557	-0,011	0,000
23	0,44	1,548	0,665	1,029	1,634	-0,086	0,007
24	0,49	1,630	0,700	1,141	1,720	-0,090	0,008
25	0,52	1,659	0,719	1,193	1,767	-0,108	0,012
26	0,57	1,762	0,756	1,332	1,858	-0,095	0,009
27	0,61	1,848	0,782	1,445	1,923	-0,075	0,006
28	0,65	1,943	0,808	1,569	1,986	-0,043	0,002
29	0,72	2,016	0,849	1,711	2,087	-0,071	0,005
30	0,76	1,964	0,873	1,714	2,145	-0,181	0,033
31	0,79	2,045	0,888	1,816	2,183	-0,138	0,019
32	0,85	2,145	0,922	1,978	2,266	-0,121	0,015
33	0,88	2,246	0,940	2,111	2,311	-0,065	0,004
34	0,92	2,337	0,958	2,239	2,355	-0,018	0,000
35	0,97	2,358	0,983	2,317	2,415	-0,057	0,003
36	1,01	2,409	1,003	2,417	2,466	-0,057	0,003
37	1,04	2,435	1,020	2,484	2,507	-0,072	0,005
38	1,09	2,508	1,043	2,616	2,564	-0,056	0,003
39	1,14	2,603	1,069	2,782	2,627	-0,024	0,001
40	1,18	2,648	1,088	2,881	2,673	-0,025	0,001
41	1,24	2,718	1,112	3,024	2,734	-0,016	0,000
42	1,26	2,814	1,125	3,164	2,764	0,049	0,002
43	1,33	2,883	1,154	3,328	2,837	0,045	0,002
44	1,37	2,995	1,172	3,511	2,881	0,115	0,013
45	1,47	3,235	1,212	3,920	2,979	0,256	0,065
46	1,52	3,334	1,234	4,115	3,033	0,301	0,091
$\Sigma =$	26,29		$\Sigma =$	64,613		$\Sigma =$	0,371

Tabla VII. Desviación estándar del tubo Venturí

No.	V (L)	Tubo Venturí		Tiempos (s)			Tiempo promedio
		Po (cm-hg)	Pf (cm-hg)	t1	t2	t3	
1	20	22,10	22,00	62,48	63,18	62,67	62,777
2	20	22,10	22,00	53,63	52,75	52,73	53,037
3	20	22,15	22,00	45,11	45,00	45,87	45,327
4	20	22,20	22,00	39,36	38,74	39,18	39,093
5	20	22,20	22,00	38,25	38,35	38,95	38,517
6	20	22,25	21,90	33,55	34,17	33,49	33,737
7	20	22,30	21,85	32,11	32,50	32,14	32,250
8	20	22,30	21,80	27,30	27,55	27,82	27,557
9	20	22,40	21,75	26,48	26,10	26,50	26,360
10	20	22,45	21,70	23,50	23,96	23,62	23,693
11	20	22,50	21,60	22,13	21,95	22,25	22,110
12	20	22,60	21,60	21,48	21,23	21,26	21,323
13	20	22,70	21,50	19,80	20,20	19,85	19,950
14	20	22,80	21,40	19,51	19,75	19,87	19,710
15	20	22,90	21,30	18,68	19,00	18,66	18,780
16	20	23,00	21,20	16,55	16,40	16,36	16,437
17	20	23,10	21,10	15,85	15,60	15,70	15,717
18	20	23,20	21,00	14,91	14,66	14,95	14,840
19	20	23,30	21,00	14,74	14,48	14,55	14,590
20	20	23,50	20,80	13,25	13,01	13,27	13,177
21	20	23,50	20,70	12,85	12,61	12,86	12,773
22	32	23,70	20,50	20,70	20,80	20,59	20,697
23	32	23,75	20,40	20,75	20,50	20,77	20,673
24	32	23,90	20,30	19,69	19,55	19,65	19,630
25	32	24,10	20,10	19,29	19,36	19,22	19,290
26	32	24,20	20,00	18,11	18,00	18,36	18,157
27	32	24,40	19,80	17,40	17,12	17,44	17,320
28	32	24,50	19,70	16,60	16,36	16,46	16,473
29	32	24,70	19,50	15,88	15,80	15,95	15,877
30	32	24,80	19,40	16,17	16,20	16,50	16,290
31	32	25,10	19,15	15,80	15,50	15,65	15,650
32	32	25,30	19,00	14,95	14,75	15,05	14,917
33	32	25,40	18,80	14,10	14,38	14,27	14,250
34	32	25,50	18,70	13,63	13,60	13,85	13,693
35	32	25,80	18,50	13,60	13,55	13,56	13,570
36	32	25,90	18,20	13,25	13,35	13,25	13,283
37	32	26,20	18,00	13,20	13,17	13,05	13,140
38	32	26,40	17,80	12,87	12,76	12,65	12,760
39	32	26,70	17,60	12,31	12,38	12,19	12,293
40	32	26,90	17,30	12,12	11,98	12,15	12,083
41	32	27,10	17,10	11,90	11,67	11,75	11,773
42	32	27,40	16,90	11,30	11,32	11,50	11,373
43	32	27,70	16,60	11,00	11,10	11,20	11,100
44	32	27,90	16,30	10,80	10,60	10,65	10,683
45	32	28,30	16,00	9,98	9,90	9,80	9,893
46	32	28,40	15,80	9,60	9,50	9,69	9,597

No.	Δh m.c.a.	Aforo Q(L/S)	$\sqrt{\Delta h}$	$Qx\sqrt{\Delta h}$	$kx\sqrt{\Delta h}$	$Q - kx\sqrt{\Delta h}$	$(Q - kx\sqrt{\Delta h})^2$
1	0,01	0,319	0,117	0,037	0,278	0,041	0,002
2	0,01	0,377	0,117	0,044	0,278	0,099	0,010
3	0,02	0,441	0,143	0,063	0,340	0,101	0,010
4	0,03	0,512	0,165	0,084	0,393	0,119	0,014
5	0,03	0,519	0,165	0,086	0,393	0,126	0,016
6	0,05	0,593	0,218	0,129	0,520	0,073	0,005
7	0,06	0,620	0,247	0,153	0,589	0,031	0,001
8	0,07	0,726	0,261	0,189	0,621	0,105	0,011
9	0,09	0,759	0,297	0,226	0,708	0,050	0,003
10	0,10	0,844	0,319	0,270	0,761	0,083	0,007
11	0,12	0,905	0,350	0,316	0,833	0,071	0,005
12	0,14	0,938	0,369	0,346	0,878	0,059	0,004
13	0,16	1,003	0,404	0,405	0,962	0,040	0,002
14	0,19	1,015	0,436	0,443	1,039	-0,025	0,001
15	0,22	1,065	0,466	0,497	1,111	-0,046	0,002
16	0,24	1,217	0,495	0,602	1,179	0,038	0,001
17	0,27	1,273	0,522	0,664	1,242	0,030	0,001
18	0,30	1,348	0,547	0,737	1,303	0,045	0,002
19	0,31	1,371	0,559	0,767	1,332	0,039	0,001
20	0,37	1,518	0,606	0,920	1,443	0,074	0,006
21	0,38	1,566	0,617	0,966	1,470	0,096	0,009
22	0,44	1,546	0,660	1,020	1,571	-0,025	0,001
23	0,46	1,548	0,675	1,045	1,608	-0,060	0,004
24	0,49	1,630	0,700	1,141	1,667	-0,037	0,001
25	0,54	1,659	0,738	1,224	1,757	-0,098	0,010
26	0,57	1,762	0,756	1,332	1,800	-0,038	0,001
27	0,63	1,848	0,791	1,461	1,884	-0,036	0,001
28	0,65	1,943	0,808	1,569	1,925	0,018	0,000
29	0,71	2,016	0,841	1,695	2,003	0,012	0,000
30	0,73	1,964	0,857	1,683	2,041	-0,077	0,006
31	0,81	2,045	0,900	1,839	2,143	-0,098	0,010
32	0,86	2,145	0,926	1,986	2,205	-0,060	0,004
33	0,90	2,246	0,947	2,128	2,257	-0,011	0,000
34	0,92	2,337	0,962	2,247	2,291	0,046	0,002
35	0,99	2,358	0,996	2,350	2,373	-0,015	0,000
36	1,05	2,409	1,023	2,465	2,438	-0,029	0,001
37	1,12	2,435	1,056	2,572	2,516	-0,080	0,006
38	1,17	2,508	1,081	2,712	2,576	-0,068	0,005
39	1,24	2,603	1,112	2,896	2,650	-0,047	0,002
40	1,31	2,648	1,143	3,026	2,722	-0,074	0,005
41	1,36	2,718	1,166	3,170	2,778	-0,060	0,004
42	1,43	2,814	1,195	3,362	2,847	-0,033	0,001
43	1,51	2,883	1,229	3,542	2,927	-0,044	0,002
44	1,58	2,995	1,256	3,762	2,992	0,003	0,000
45	1,67	3,235	1,293	4,183	3,081	0,154	0,024
46	1,71	3,334	1,309	4,365	3,118	0,216	0,047
$\Sigma =$	28,01		$\Sigma =$	66,719		$\Sigma =$	0,249

Tabla VIII. Desviación estándar del rotámetro

No.	V (L)	Tiempo promedio	Aforo Q (L/S)	Caudal m ³ /H	Caudal Qr (L/S)	Aforo Q (L/S)	Aforo $\bar{X} - \bar{X}$	Rotámetro $\bar{X} - \bar{X}$
1	20	62,777	0,319	1,000	0,300	0,319	1,346	1,315
2	20	53,037	0,377	1,200	0,360	0,377	1,287	1,255
3	20	45,327	0,441	1,400	0,420	0,441	1,223	1,195
4	20	39,093	0,512	1,600	0,480	0,512	1,153	1,135
5	20	38,517	0,519	1,800	0,540	0,519	1,145	1,075
6	20	33,737	0,593	2,000	0,600	0,593	1,071	1,015
7	20	32,250	0,620	2,200	0,660	0,620	1,044	0,955
8	20	27,557	0,726	2,400	0,720	0,726	0,938	0,895
9	20	26,360	0,759	2,600	0,780	0,759	0,905	0,835
10	20	23,693	0,844	2,800	0,840	0,844	0,820	0,775
11	20	22,110	0,905	3,000	0,900	0,905	0,760	0,715
12	20	21,323	0,938	3,200	0,960	0,938	0,726	0,655
13	20	19,950	1,003	3,400	1,020	1,003	0,662	0,595
14	20	19,710	1,015	3,600	1,080	1,015	0,650	0,535
15	20	18,780	1,065	3,800	1,140	1,065	0,599	0,475
16	20	16,437	1,217	4,000	1,200	1,217	0,447	0,415
17	20	15,717	1,273	4,200	1,260	1,273	0,392	0,355
18	20	14,840	1,348	4,400	1,320	1,348	0,317	0,295
19	20	14,590	1,371	4,600	1,380	1,371	0,293	0,235
20	20	13,177	1,518	4,800	1,440	1,518	0,146	0,175
21	20	12,773	1,566	5,000	1,500	1,566	0,098	0,115
22	32	20,697	1,546	5,200	1,560	1,546	0,118	0,055
23	32	20,673	1,548	5,400	1,620	1,548	0,116	0,005
24	32	19,630	1,630	5,600	1,680	1,630	0,034	0,065
25	32	19,290	1,659	5,800	1,740	1,659	0,005	0,125
26	32	18,157	1,762	6,000	1,800	1,762	0,098	0,185
27	32	17,320	1,848	6,200	1,860	1,848	0,183	0,245
28	32	16,473	1,943	6,400	1,920	1,943	0,278	0,305
29	32	15,877	2,016	6,600	1,980	2,016	0,351	0,365
30	32	16,290	1,964	6,800	2,040	1,964	0,300	0,425
31	32	15,650	2,045	7,000	2,100	2,045	0,381	0,485
32	32	14,917	2,145	7,200	2,160	2,145	0,481	0,545
33	32	14,250	2,246	7,400	2,220	2,246	0,581	0,605
34	32	13,693	2,337	7,600	2,280	2,337	0,673	0,665
35	32	13,570	2,358	7,800	2,340	2,358	0,694	0,725
36	32	13,283	2,409	8,000	2,400	2,409	0,745	0,785
37	32	13,140	2,435	8,200	2,460	2,435	0,771	0,845
38	32	12,760	2,508	8,400	2,520	2,508	0,844	0,905
39	32	12,293	2,603	8,600	2,580	2,603	0,939	0,965
40	32	12,083	2,648	8,800	2,640	2,648	0,984	1,025
41	32	11,773	2,718	9,000	2,700	2,718	1,054	1,085
42	32	11,373	2,814	9,200	2,760	2,814	1,149	1,145
43	32	11,100	2,883	9,400	2,820	2,883	1,219	1,205
44	32	10,683	2,995	9,600	2,880	2,995	1,331	1,265
45	32	9,893	3,235	9,800	2,940	3,235	1,570	1,325
46	32	9,597	3,334	10,000	3,000	3,334	1,670	1,385
					Promedio=1,615	Promedio=1,664	32,594	31,751

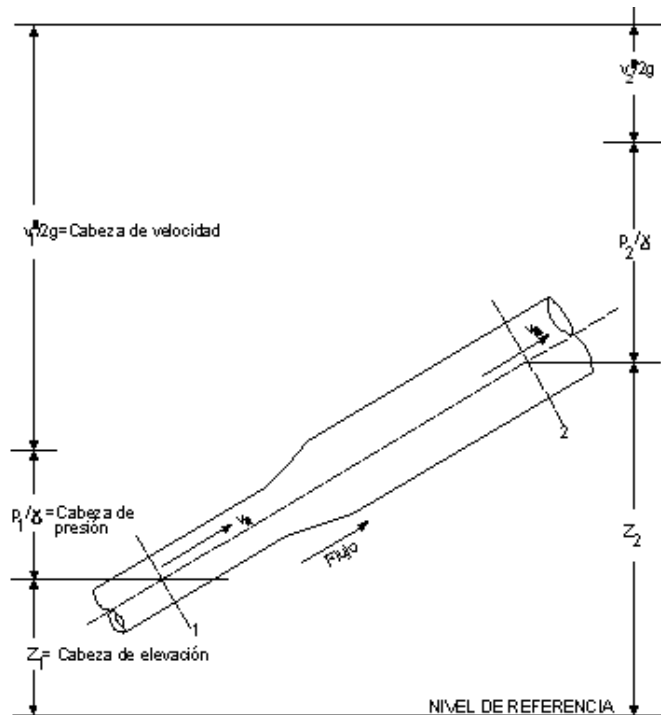
3.4 Calibración

Calibración es simplemente el procedimiento de comparación entre lo que indica un instrumento y lo que "debiera indicar", de acuerdo a un patrón de referencia con valor conocido. Es importante la calibración de un instrumento ya que es un parámetro con el cual se puede comparar el error que genera el equipo.

Para la calibración del equipo del laboratorio se procederá con los siguientes pasos:

1. Obtener el caudal de aforo de la toma de datos.
2. Medir la diferencia de presiones (Δh) de cada instrumento.
3. Obtener el caudal teórico de las siguientes ecuaciones

Aplicando Bernoulli entre 1 y 2 de la figura 3.



$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{Q^2}{2gA_1^2} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{Q^2}{2gA_2^2}$$

De la ecuación de continuidad se tiene que:

$$Q = V * A$$

$$V_1 = \frac{Q}{A_1}, \text{ y } V_2 = \frac{Q}{A_2},$$

Sustituyendo lo anterior y despreciando la pérdida por fricción h_f y simplificando, se tiene:

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma} = \frac{Q^2}{2g} \left[\frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2} \right]$$

$$Q_t = \sqrt{\frac{2g * \left(\frac{P_1 - P_2}{\gamma} \right)}{\frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2}}}$$

Dando los valores

Placa de orificio:

$$\phi_1 = 5.08cm \quad A_1 = \frac{\pi}{4} (5.08)^2 = 20.26cm^2$$

$$\phi_2 = 3.00cm \quad A_2 = \frac{\pi}{4} (3.00)^2 = 7.45cm^2$$

Tubo Venturí:

$$\phi_1 = 5.08cm \quad A_1 = \frac{\pi}{4} (5.08)^2 = 20.26cm^2$$

$$\phi_2 = 2.50cm \quad A_2 = \frac{\pi}{4} (2.50)^2 = 4.90cm^2$$

4. Graficar el caudal teórico contra el caudal real y obtener el valor del coeficiente de descarga (C_d) por mínimos cuadrados.
5. Comparar el coeficiente de descarga del inciso 3 y el calculado con la ecuación 55.

$$C_d = 0.5959 + 0.0312 \cdot \beta^{2.10} - 0.1840 \cdot \beta^8 + 0.0029 \cdot \beta^{2.50} \left(\frac{10^6}{R_e} \right)^{0.75} +$$

$$\frac{0.09 \cdot L_1 \cdot \beta^4}{1 - \beta^4} - 0.0337 \cdot L_2 \cdot \beta^3$$

Ec. 55

Tabla IX. Qaf contra Δh (placa de orificio)

No.	V (L)	Placa de orificio		Tiempo Promedio (s)	Δh cm (H ₂ O)	CAUDAL Qaf (L/S)
		Po (cm-hg)	Pf (cm-hg)			
1	20	22,15	22,00	62,777	2,04	0,319
2	20	22,10	21,95	53,037	2,04	0,377
3	20	22,05	21,90	45,327	2,04	0,441
4	20	22,10	21,85	39,093	3,40	0,512
5	20	22,15	21,80	38,517	4,76	0,519
6	20	22,20	21,75	33,737	6,12	0,593
7	20	22,40	21,90	32,250	6,80	0,620
8	20	22,40	21,85	27,557	7,48	0,726
9	20	22,50	21,80	26,360	9,52	0,759
10	20	22,55	21,75	23,693	10,88	0,844
11	20	22,60	21,70	22,110	12,24	0,905
12	20	22,65	21,60	21,323	14,28	0,938
13	20	22,70	21,60	19,950	14,96	1,003
14	20	22,80	21,50	19,710	17,68	1,015
15	20	22,85	21,40	18,780	19,72	1,065
16	20	22,95	21,30	16,437	22,44	1,217
17	20	23,00	21,20	15,717	24,48	1,273
18	20	23,10	21,15	14,840	26,52	1,348
19	20	23,30	21,10	14,590	29,92	1,371
20	20	23,40	21,00	13,177	32,64	1,518
21	20	23,50	20,90	12,773	35,36	1,566
22	32	23,65	20,70	20,697	40,12	1,546
23	32	23,85	20,60	20,673	44,20	1,548
24	32	24,00	20,40	19,630	48,96	1,630
25	32	24,10	20,30	19,290	51,68	1,659
26	32	24,30	20,10	18,157	57,12	1,762
27	32	24,50	20,00	17,320	61,20	1,848
28	32	24,60	19,80	16,473	65,28	1,943
29	32	24,90	19,60	15,877	72,08	2,016
30	32	25,00	19,40	16,290	76,16	1,964
31	32	25,10	19,30	15,650	78,88	2,045
32	32	25,35	19,10	14,917	85,00	2,145
33	32	25,50	19,00	14,250	88,40	2,246
34	32	25,55	18,80	13,693	91,80	2,337
35	32	25,80	18,70	13,570	96,56	2,358
36	32	25,90	18,50	13,283	100,64	2,409
37	32	26,00	18,35	13,140	104,04	2,435
38	32	26,20	18,20	12,760	108,80	2,508
39	32	26,40	18,00	12,293	114,24	2,603
40	32	26,50	17,80	12,083	118,32	2,648
41	32	26,70	17,60	11,773	123,76	2,718
42	32	26,70	17,40	11,373	126,48	2,814
43	32	27,00	17,20	11,100	133,28	2,883
44	32	27,10	17,00	10,683	137,36	2,995
45	32	27,50	16,70	9,893	146,88	3,235
46	32	27,70	16,50	9,597	152,32	3,334

Figura 34. Qaf contra Δh (placa de orificio)

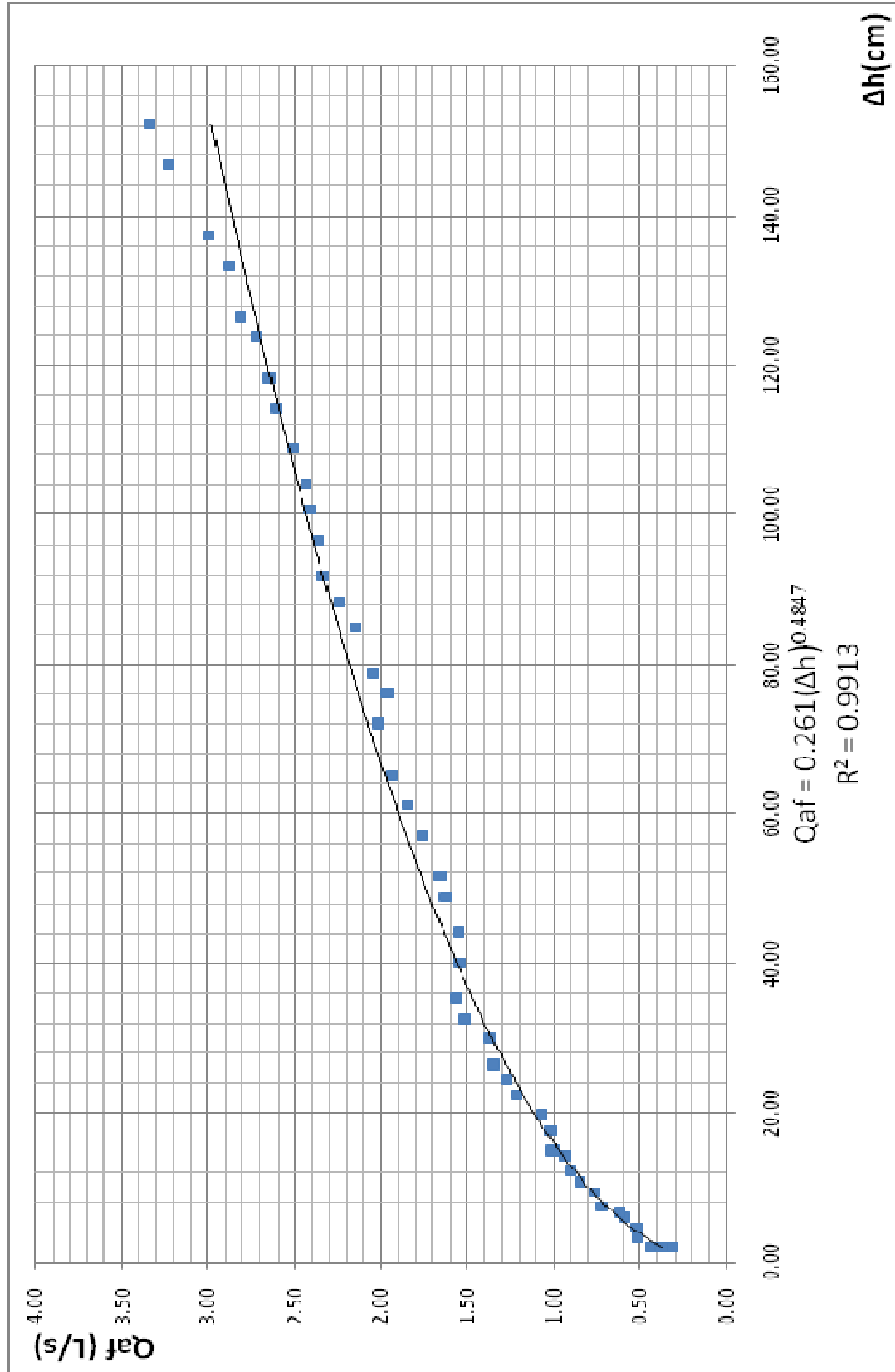


Tabla X. Qt contra Δh (placa de orificio)

No.	V (L)	Placa de orificio		Tiempo Promedio (s)	Δh cm (H ₂ O)	Caudal Qt(L/S)
		Po (cm-hg)	Pf (cm-hg)			
1	20	22,15	22,00	62,777	2,04	0,476
2	20	22,10	21,95	53,037	2,04	0,476
3	20	22,05	21,90	45,327	2,04	0,476
4	20	22,10	21,85	39,093	3,40	0,614
5	20	22,15	21,80	38,517	4,76	0,727
6	20	22,20	21,75	33,737	6,12	0,824
7	20	22,40	21,90	32,250	6,80	0,869
8	20	22,40	21,85	27,557	7,48	0,911
9	20	22,50	21,80	26,360	9,52	1,028
10	20	22,55	21,75	23,693	10,88	1,099
11	20	22,60	21,70	22,110	12,24	1,165
12	20	22,65	21,60	21,323	14,28	1,259
13	20	22,70	21,60	19,950	14,96	1,288
14	20	22,80	21,50	19,710	17,68	1,401
15	20	22,85	21,40	18,780	19,72	1,479
16	20	22,95	21,30	16,437	22,44	1,578
17	20	23,00	21,20	15,717	24,48	1,648
18	20	23,10	21,15	14,840	26,52	1,715
19	20	23,30	21,10	14,590	29,92	1,822
20	20	23,40	21,00	13,177	32,64	1,903
21	20	23,50	20,90	12,773	35,36	1,981
22	32	23,65	20,70	20,697	40,12	2,110
23	32	23,85	20,60	20,673	44,20	2,215
24	32	24,00	20,40	19,630	48,96	2,331
25	32	24,10	20,30	19,290	51,68	2,395
26	32	24,30	20,10	18,157	57,12	2,518
27	32	24,50	20,00	17,320	61,20	2,606
28	32	24,60	19,80	16,473	65,28	2,691
29	32	24,90	19,60	15,877	72,08	2,828
30	32	25,00	19,40	16,290	76,16	2,907
31	32	25,10	19,30	15,650	78,88	2,958
32	32	25,35	19,10	14,917	85,00	3,071
33	32	25,50	19,00	14,250	88,40	3,132
34	32	25,55	18,80	13,693	91,80	3,192
35	32	25,80	18,70	13,570	96,56	3,273
36	32	25,90	18,50	13,283	100,64	3,342
37	32	26,00	18,35	13,140	104,04	3,398
38	32	26,20	18,20	12,760	108,80	3,475
39	32	26,40	18,00	12,293	114,24	3,560
40	32	26,50	17,80	12,083	118,32	3,623
41	32	26,70	17,60	11,773	123,76	3,706
42	32	26,70	17,40	11,373	126,48	3,746
43	32	27,00	17,20	11,100	133,28	3,846
44	32	27,10	17,00	10,683	137,36	3,904
45	32	27,50	16,70	9,893	146,88	4,037
46	32	27,70	16,50	9,597	152,32	4,111

Figura 35. Qt contra Δh (placa de orificio)

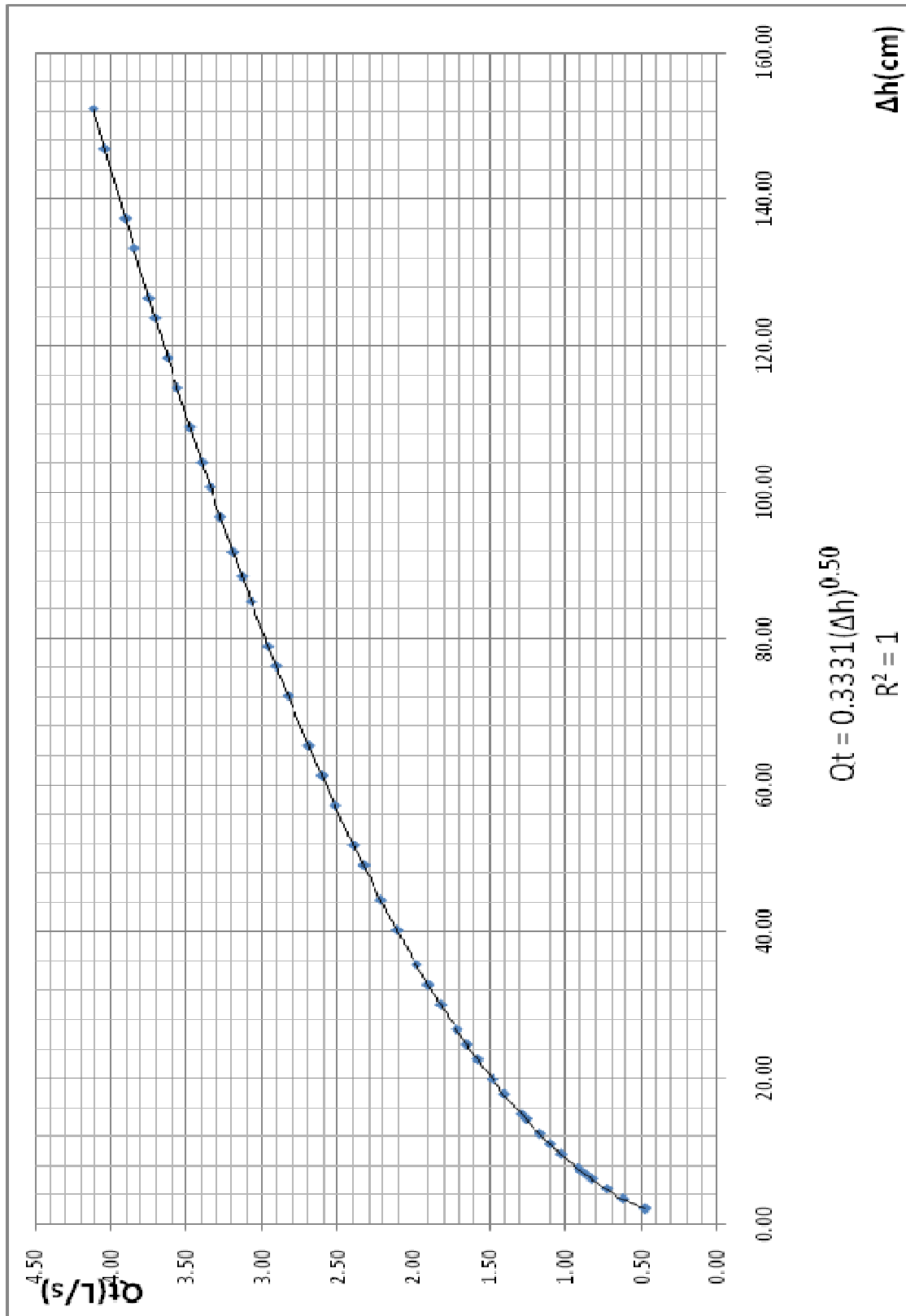


Tabla XI. Qaf contra Qt (placa de orificio)

No.	V (L)	$Q_i = 0.3331(\Delta h)^{0.5}$ (L/S)	$Q_{af} = 0.261(\Delta h)^{0.4847}$ (L/S)
1	20	0,476	0,369
2	20	0,476	0,369
3	20	0,476	0,369
4	20	0,614	0,472
5	20	0,727	0,556
6	20	0,824	0,628
7	20	0,869	0,661
8	20	0,911	0,692
9	20	1,028	0,778
10	20	1,099	0,830
11	20	1,165	0,879
12	20	1,259	0,947
13	20	1,288	0,969
14	20	1,401	1,050
15	20	1,479	1,107
16	20	1,578	1,179
17	20	1,648	1,230
18	20	1,715	1,278
19	20	1,822	1,355
20	20	1,903	1,414
21	20	1,981	1,470
22	32	2,110	1,562
23	32	2,215	1,637
24	32	2,331	1,721
25	32	2,395	1,766
26	32	2,517	1,854
27	32	2,606	1,917
28	32	2,691	1,978
29	32	2,828	2,076
30	32	2,907	2,132
31	32	2,958	2,168
32	32	3,071	2,248
33	32	3,132	2,291
34	32	3,192	2,334
35	32	3,273	2,392
36	32	3,342	2,440
37	32	3,398	2,480
38	32	3,474	2,534
39	32	3,560	2,595
40	32	3,623	2,639
41	32	3,706	2,697
42	32	3,746	2,726
43	32	3,846	2,796
44	32	3,904	2,837
45	32	4,037	2,931
46	32	4,111	2,983

Figura 36. Qr contra Qt (placa de orificio)

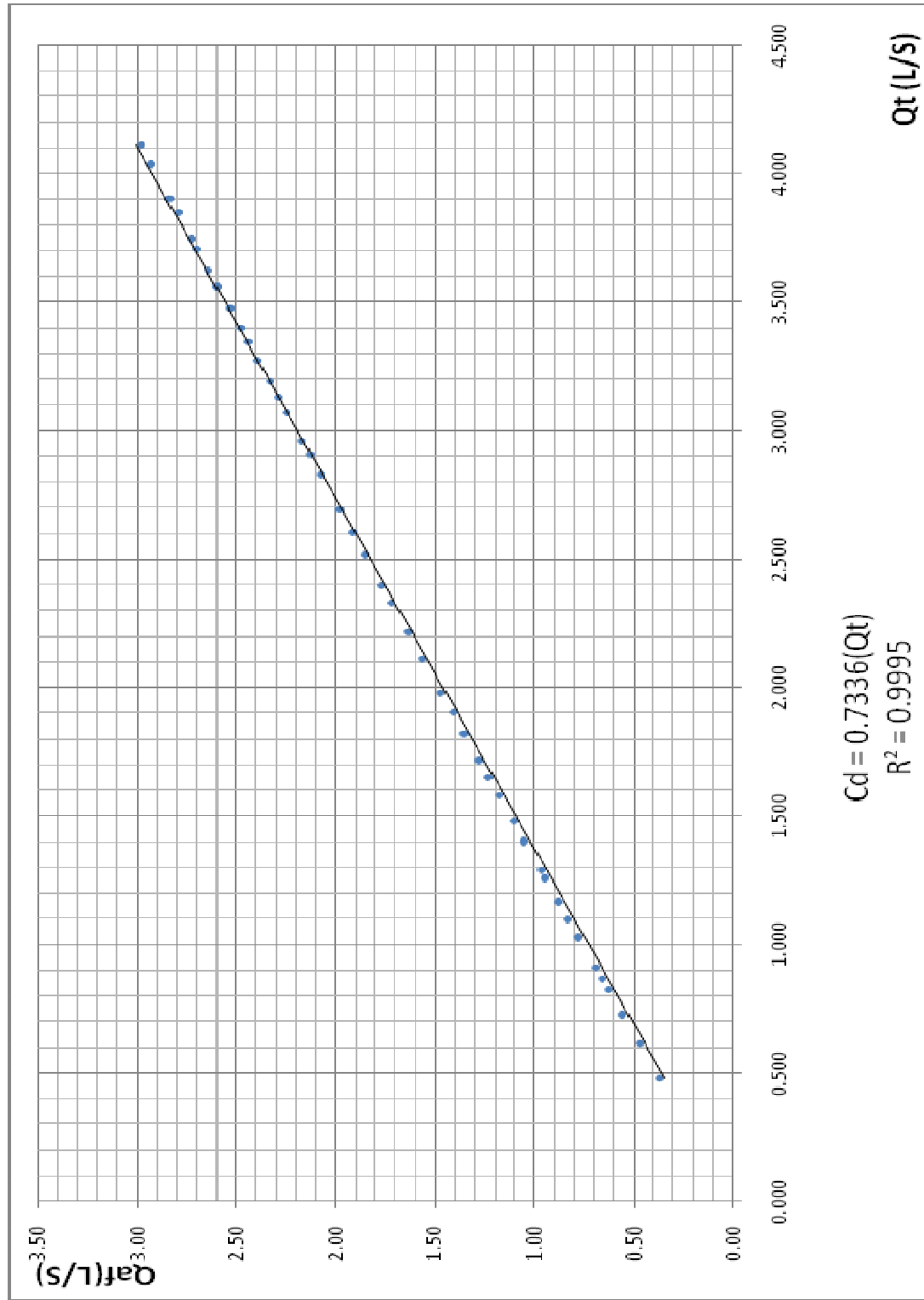


Tabla XII. Qt, Qaf y Qr contra Δh (placa de orificio)

No.	Δh cm (H ₂ O)	$Q_i = 0.3331(\Delta h)^{0.5}$ (L/S)	$Q_{af} = 0.261(\Delta h)^{0.4847}$ (L/S)	$Q_r = Cd * Q_t$ (L/S)
1	2,04	0,476	0,369	0,349
2	2,04	0,476	0,369	0,349
3	2,04	0,476	0,369	0,349
4	3,40	0,614	0,472	0,451
5	4,76	0,727	0,556	0,533
6	6,12	0,824	0,628	0,605
7	6,80	0,869	0,661	0,637
8	7,48	0,911	0,692	0,668
9	9,52	1,028	0,778	0,754
10	10,88	1,099	0,830	0,806
11	12,24	1,165	0,879	0,855
12	14,28	1,259	0,947	0,923
13	14,96	1,288	0,969	0,945
14	17,68	1,401	1,050	1,027
15	19,72	1,479	1,107	1,085
16	22,44	1,578	1,179	1,158
17	24,48	1,648	1,230	1,209
18	26,52	1,715	1,278	1,258
19	29,92	1,822	1,355	1,337
20	32,64	1,903	1,414	1,396
21	35,36	1,981	1,470	1,453
22	40,12	2,110	1,562	1,548
23	44,20	2,215	1,637	1,625
24	48,96	2,331	1,721	1,710
25	51,68	2,395	1,766	1,757
26	57,12	2,517	1,854	1,847
27	61,20	2,606	1,917	1,912
28	65,28	2,691	1,978	1,974
29	72,08	2,828	2,076	2,075
30	76,16	2,907	2,132	2,133
31	78,88	2,958	2,168	2,170
32	85,00	3,071	2,248	2,253
33	88,40	3,132	2,291	2,298
34	91,80	3,192	2,334	2,341
35	96,56	3,273	2,392	2,401
36	100,64	3,342	2,440	2,451
37	104,04	3,398	2,480	2,493
38	108,80	3,474	2,534	2,549
39	114,24	3,560	2,595	2,612
40	118,32	3,623	2,639	2,658
41	123,76	3,706	2,697	2,718
42	126,48	3,746	2,726	2,748
43	133,28	3,846	2,796	2,821
44	137,36	3,904	2,837	2,864
45	146,88	4,037	2,931	2,962
46	152,32	4,111	2,983	3,016

Figura 37. Qt, Qaf y Qr contra Δh (placa de orificio)

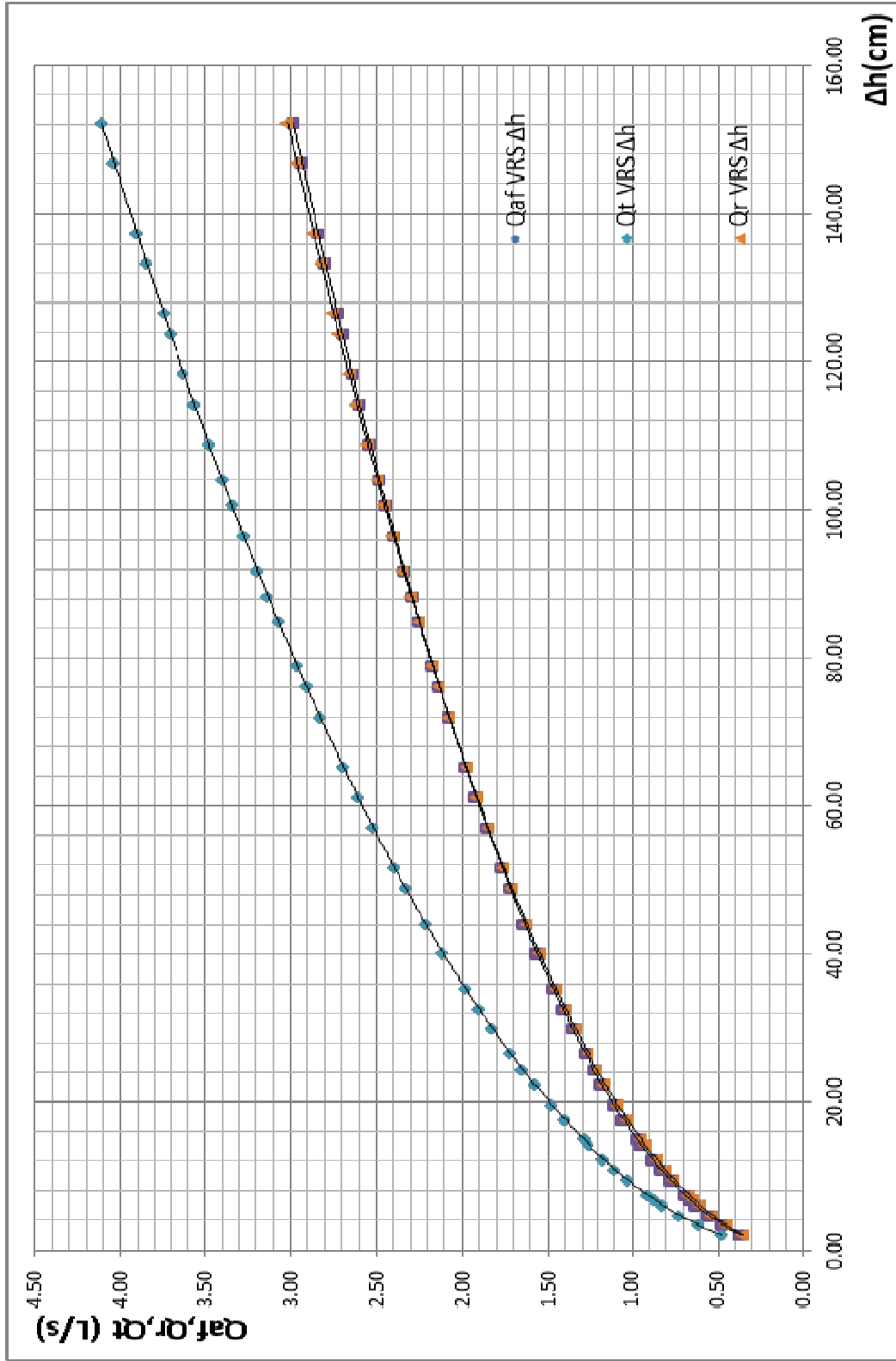


Tabla XIII. Cd contra Reynolds (placa de orificio)

No.	Número de Reynolds	$Cd = (Ec.55)$
1	13 256,211	0,6234
2	15 690,669	0,6210
3	18 359,629	0,6191
4	21 287,025	0,6174
5	21 605,732	0,6173
6	24 666,953	0,6160
7	25 804,055	0,6156
8	30 198,891	0,6142
9	31 569,832	0,6139
10	35 122,992	0,6131
11	37 638,207	0,6126
12	39 026,767	0,6124
13	41 713,321	0,6119
14	42 221,246	0,6118
15	44 312,075	0,6115
16	50 629,533	0,6108
17	52 948,935	0,6105
18	56 076,871	0,6102
19	57 037,749	0,6102
20	63 155,636	0,6097
21	65 149,851	0,6095
22	64 333,510	0,6096
23	64 406,122	0,6096
24	67 829,303	0,6093
25	69 024,843	0,6093
26	73 333,352	0,6090
27	76 875,821	0,6088
28	80 826,946	0,6086
29	83 864,532	0,6085
30	81 736,600	0,6086
31	85 079,183	0,6084
32	89 261,847	0,6083
33	93 437,840	0,6081
34	97 236,311	0,6080
35	98 120,060	0,6079
36	100 237,582	0,6079
37	101 330,991	0,6078
38	104 348,685	0,6077
39	108 309,861	0,6076
40	110 192,211	0,6076
41	113 093,648	0,6075
42	117 071,151	0,6074
43	119 953,984	0,6073
44	124 632,376	0,6072
45	134 584,490	0,6070
46	138 744,969	0,6069

Figura 38. Cd contra Reynolds (placa de orificio)

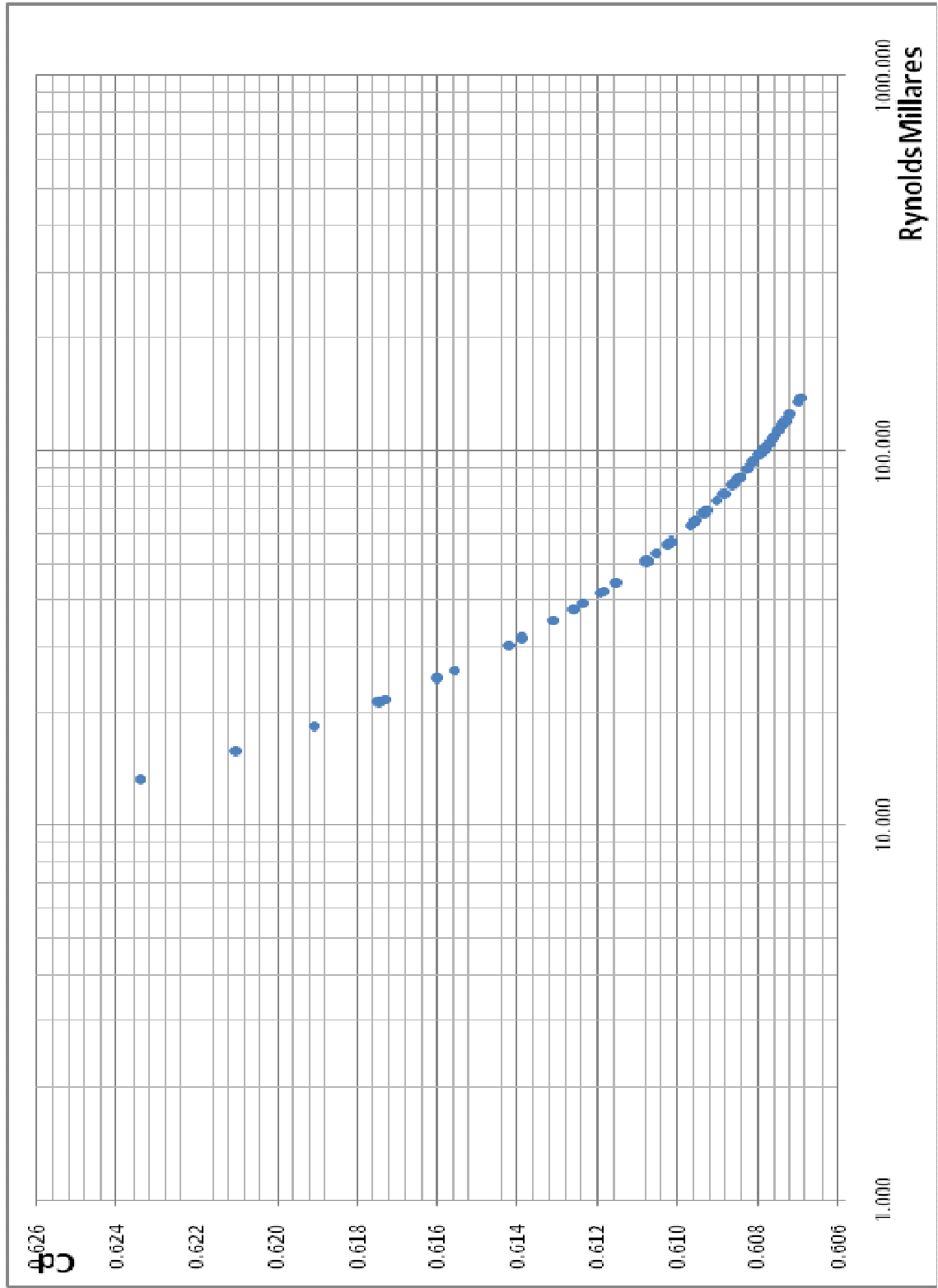


Tabla XIV. Qaf contra Δh (Tubo Venturí)

No.	V (L)	Tubo Venturí		Tiempo Promedio (s)	Δh cm (H ₂ O)	Caudal Qaf(L/S)
		Po (cm-hg)	Pf (cm-hg)			
1	20	22,10	22,00	62,777	1,36	0,319
2	20	22,10	22,00	53,037	1,36	0,377
3	20	22,15	22,00	45,327	2,04	0,441
4	20	22,20	22,00	39,093	2,72	0,512
5	20	22,20	22,00	38,517	2,72	0,519
6	20	22,25	21,90	33,737	4,76	0,593
7	20	22,30	21,85	32,250	6,12	0,620
8	20	22,30	21,80	27,557	6,80	0,726
9	20	22,40	21,75	26,360	8,84	0,759
10	20	22,45	21,70	23,693	10,20	0,844
11	20	22,50	21,60	22,110	12,24	0,905
12	20	22,60	21,60	21,323	13,60	0,938
13	20	22,70	21,50	19,950	16,32	1,003
14	20	22,80	21,40	19,710	19,04	1,015
15	20	22,90	21,30	18,780	21,76	1,065
16	20	23,00	21,20	16,437	24,48	1,217
17	20	23,10	21,10	15,717	27,20	1,273
18	20	23,20	21,00	14,840	29,92	1,348
19	20	23,30	21,00	14,590	31,28	1,371
20	20	23,50	20,80	13,177	36,72	1,518
21	20	23,50	20,70	12,773	38,08	1,566
22	32	23,70	20,50	20,697	43,52	1,546
23	32	23,75	20,40	20,673	45,56	1,548
24	32	23,90	20,30	19,630	48,96	1,630
25	32	24,10	20,10	19,290	54,40	1,659
26	32	24,20	20,00	18,157	57,12	1,762
27	32	24,40	19,80	17,320	62,56	1,848
28	32	24,50	19,70	16,473	65,28	1,943
29	32	24,70	19,50	15,877	70,72	2,016
30	32	24,80	19,40	16,290	73,44	1,964
31	32	25,10	19,15	15,650	80,92	2,045
32	32	25,30	19,00	14,917	85,68	2,145
33	32	25,40	18,80	14,250	89,76	2,246
34	32	25,50	18,70	13,693	92,48	2,337
35	32	25,80	18,50	13,570	99,28	2,358
36	32	25,90	18,20	13,283	104,72	2,409
37	32	26,20	18,00	13,140	111,52	2,435
38	32	26,40	17,80	12,760	116,96	2,508
39	32	26,70	17,60	12,293	123,76	2,603
40	32	26,90	17,30	12,083	130,56	2,648
41	32	27,10	17,10	11,773	136,00	2,718
42	32	27,40	16,90	11,373	142,80	2,814
43	32	27,70	16,60	11,100	150,96	2,883
44	32	27,90	16,30	10,683	157,76	2,995
45	32	28,30	16,00	9,893	167,28	3,235
46	32	28,40	15,80	9,597	171,36	3,334

Figura 39. Qaf contra Δh (Venturi)

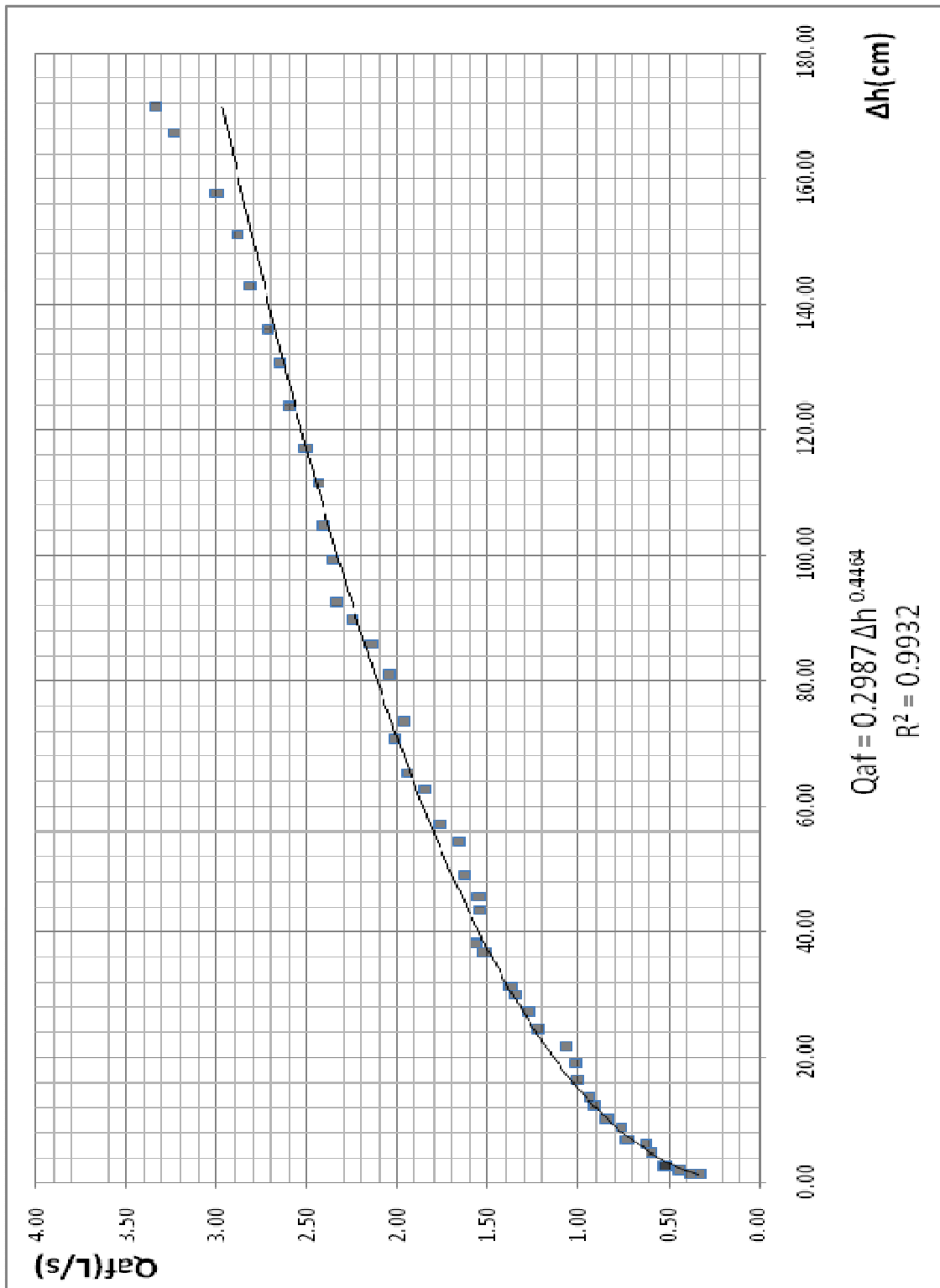


Tabla XV. Qt contra Δh (Tubo Venturi)

No.	V (L)	Tubo Venturi		Tiempo Promedio (s)	Δh cm (H ₂ O)	Caudal Qt(L/S)
		Po (cm-hg)	Pf (cm-hg)			
1	20	22,10	22,00	62,777	1,36	0,261
2	20	22,10	22,00	53,037	1,36	0,261
3	20	22,15	22,00	45,327	2,04	0,319
4	20	22,20	22,00	39,093	2,72	0,369
5	20	22,20	22,00	38,517	2,72	0,369
6	20	22,25	21,90	33,737	4,76	0,488
7	20	22,30	21,85	32,250	6,12	0,553
8	20	22,30	21,80	27,557	6,80	0,583
9	20	22,40	21,75	26,360	8,84	0,664
10	20	22,45	21,70	23,693	10,20	0,714
11	20	22,50	21,60	22,110	12,24	0,782
12	20	22,60	21,60	21,323	13,60	0,824
13	20	22,70	21,50	19,950	16,32	0,903
14	20	22,80	21,40	19,710	19,04	0,975
15	20	22,90	21,30	18,780	21,76	1,042
16	20	23,00	21,20	16,437	24,48	1,106
17	20	23,10	21,10	15,717	27,20	1,165
18	20	23,20	21,00	14,840	29,92	1,222
19	20	23,30	21,00	14,590	31,28	1,250
20	20	23,50	20,80	13,177	36,72	1,354
21	20	23,50	20,70	12,773	38,08	1,379
22	32	23,70	20,50	20,697	43,52	1,474
23	32	23,75	20,40	20,673	45,56	1,508
24	32	23,90	20,30	19,630	48,96	1,564
25	32	24,10	20,10	19,290	54,40	1,648
26	32	24,20	20,00	18,157	57,12	1,689
27	32	24,40	19,80	17,320	62,56	1,767
28	32	24,50	19,70	16,473	65,28	1,805
29	32	24,70	19,50	15,877	70,72	1,879
30	32	24,80	19,40	16,290	73,44	1,915
31	32	25,10	19,15	15,650	80,92	2,010
32	32	25,30	19,00	14,917	85,68	2,068
33	32	25,40	18,80	14,250	89,76	2,117
34	32	25,50	18,70	13,693	92,48	2,149
35	32	25,80	18,50	13,570	99,28	2,226
36	32	25,90	18,20	13,283	104,72	2,287
37	32	26,20	18,00	13,140	111,52	2,360
38	32	26,40	17,80	12,760	116,96	2,417
39	32	26,70	17,60	12,293	123,76	2,486
40	32	26,90	17,30	12,083	130,56	2,553
41	32	27,10	17,10	11,773	136,00	2,606
42	32	27,40	16,90	11,373	142,80	2,670
43	32	27,70	16,60	11,100	150,96	2,745
44	32	27,90	16,30	10,683	157,76	2,807
45	32	28,30	16,00	9,893	167,28	2,890
46	32	28,40	15,80	9,597	171,36	2,925

Figura 40. Qt contra Δh (Tubo Venturi)

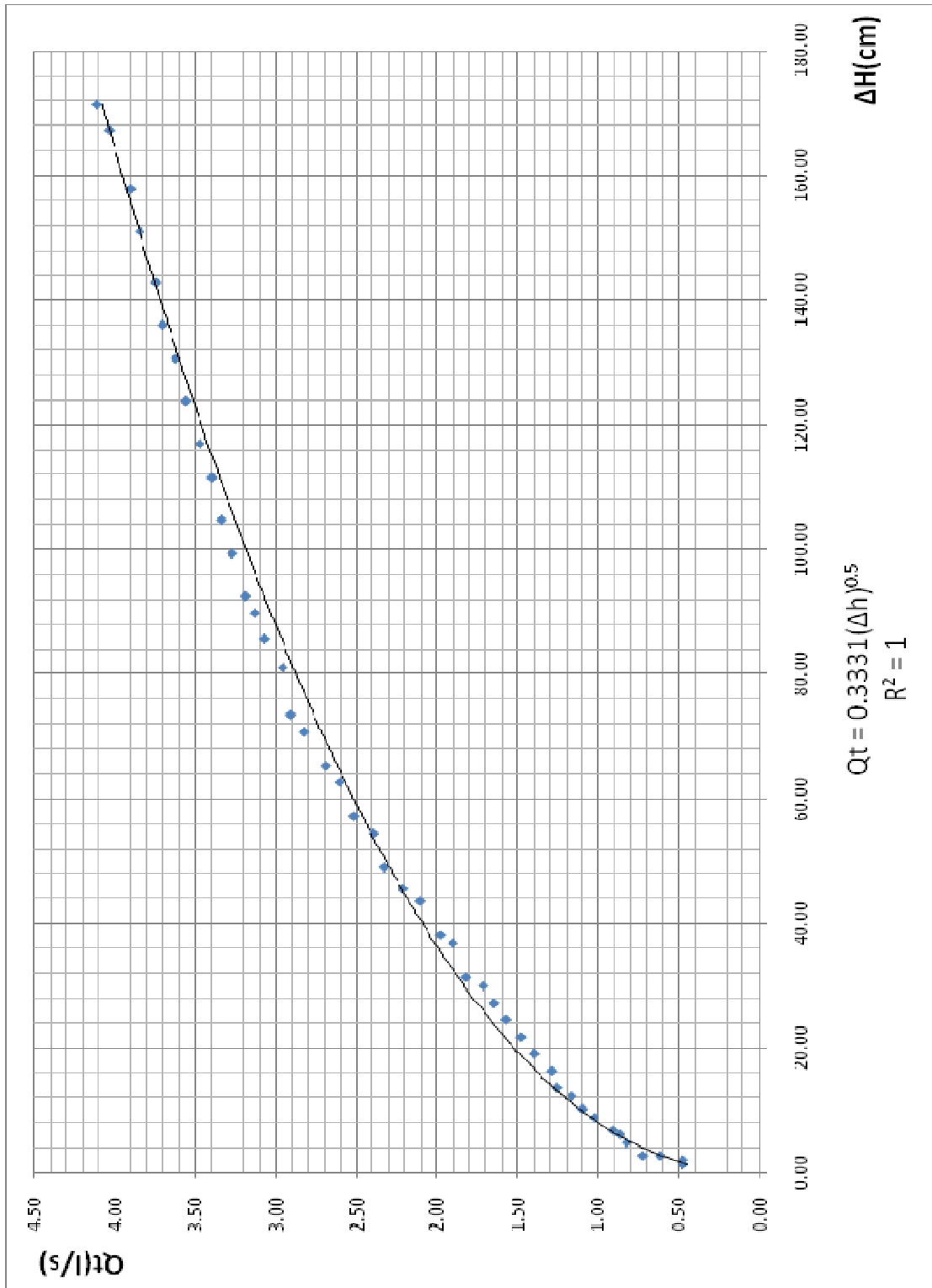


Tabla XVI. Qt contra Qaf (Tubo Venturi)

No.	Δh cm (H ₂ O)	$Q_i = 0.3331\Delta h^{0.5}$ (L/S)	$Q_{af} = 0.2987\Delta h^{0.4464}$ (L/S)
1	1,36	0,388	0,343
2	1,36	0,388	0,343
3	2,04	0,476	0,411
4	2,72	0,549	0,467
5	2,72	0,549	0,467
6	4,76	0,727	0,599
7	6,12	0,824	0,671
8	6,80	0,869	0,703
9	8,84	0,990	0,790
10	10,20	1,064	0,842
11	12,24	1,165	0,914
12	13,60	1,228	0,958
13	16,32	1,346	1,039
14	19,04	1,453	1,113
15	21,76	1,554	1,181
16	24,48	1,648	1,245
17	27,20	1,737	1,305
18	29,92	1,822	1,362
19	31,28	1,863	1,389
20	36,72	2,018	1,492
21	38,08	2,056	1,517
22	43,52	2,197	1,610
23	45,56	2,248	1,643
24	48,96	2,331	1,697
25	54,40	2,457	1,778
26	57,12	2,517	1,817
27	62,56	2,635	1,893
28	65,28	2,691	1,929
29	70,72	2,801	1,999
30	73,44	2,855	2,033
31	80,92	2,996	2,123
32	85,68	3,083	2,178
33	89,76	3,156	2,224
34	92,48	3,203	2,254
35	99,28	3,319	2,326
36	104,72	3,409	2,382
37	111,52	3,518	2,450
38	116,96	3,602	2,503
39	123,76	3,706	2,567
40	130,56	3,806	2,629
41	136,00	3,885	2,677
42	142,80	3,981	2,736
43	150,96	4,093	2,805
44	157,76	4,184	2,860
45	167,28	4,308	2,936
46	171,36	4,360	2,968

Figura 41. Qt contra Qaf (Venturi)

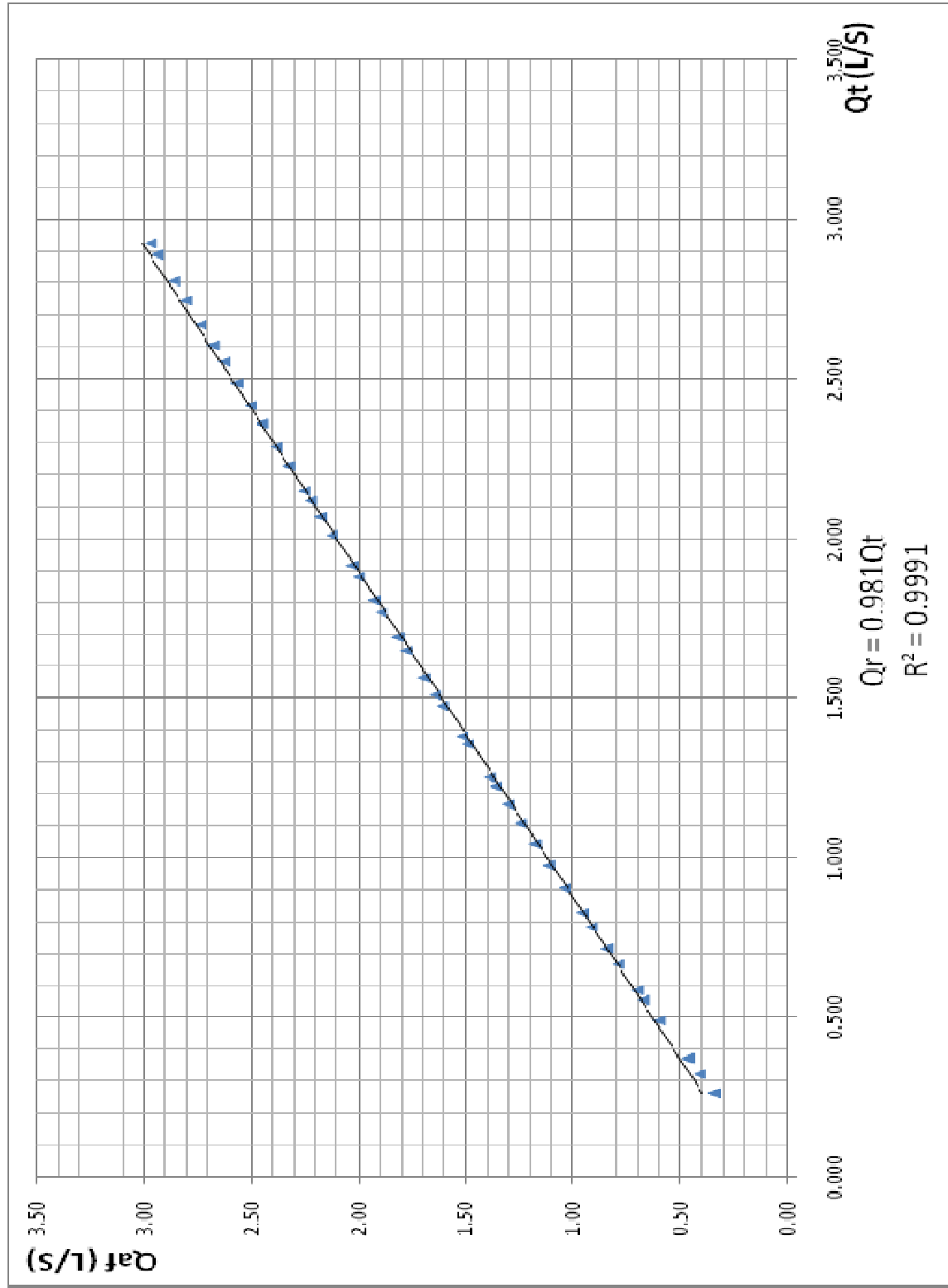


Tabla XVII. Q_t , Q_{af} y Q_r contra Δh (Tubo Venturí)

No.	Δh cm (H ₂ O)	$Q_t = 0.3331\Delta h^{0.5}$ (L/S)	$Q_{af} = 0.2987\Delta h^{0.4464}$ (L/S)	$Q_r = Cd * Q_t$ (L/S)
1	1,36	0,388	0,343	0,256
2	1,36	0,388	0,343	0,256
3	2,04	0,476	0,411	0,313
4	2,72	0,549	0,467	0,362
5	2,72	0,549	0,467	0,362
6	4,76	0,727	0,599	0,478
7	6,12	0,824	0,671	0,542
8	6,80	0,869	0,703	0,572
9	8,84	0,990	0,790	0,652
10	10,20	1,064	0,842	0,700
11	12,24	1,165	0,914	0,767
12	13,60	1,228	0,958	0,808
13	16,32	1,346	1,039	0,886
14	19,04	1,453	1,113	0,956
15	21,76	1,554	1,181	1,023
16	24,48	1,648	1,245	1,085
17	27,20	1,737	1,305	1,143
18	29,92	1,822	1,362	1,199
19	31,28	1,863	1,389	1,226
20	36,72	2,018	1,492	1,328
21	38,08	2,056	1,517	1,353
22	43,52	2,197	1,610	1,446
23	45,56	2,248	1,643	1,480
24	48,96	2,331	1,697	1,534
25	54,40	2,457	1,778	1,617
26	57,12	2,517	1,817	1,657
27	62,56	2,635	1,893	1,734
28	65,28	2,691	1,929	1,771
29	70,72	2,801	1,999	1,843
30	73,44	2,855	2,033	1,879
31	80,92	2,996	2,123	1,972
32	85,68	3,083	2,178	2,029
33	89,76	3,156	2,224	2,077
34	92,48	3,203	2,254	2,108
35	99,28	3,319	2,326	2,184
36	104,72	3,409	2,382	2,243
37	111,52	3,518	2,450	2,315
38	116,96	3,602	2,503	2,371
39	123,76	3,706	2,567	2,439
40	130,56	3,806	2,629	2,505
41	136,00	3,885	2,677	2,556
42	142,80	3,981	2,736	2,619
43	150,96	4,093	2,805	2,693
44	157,76	4,184	2,860	2,753
45	167,28	4,308	2,936	2,835
46	171,36	4,360	2,968	2,869

Figura 42. Qt, Qaf, Qr contra Δh (Tubo Venturi)

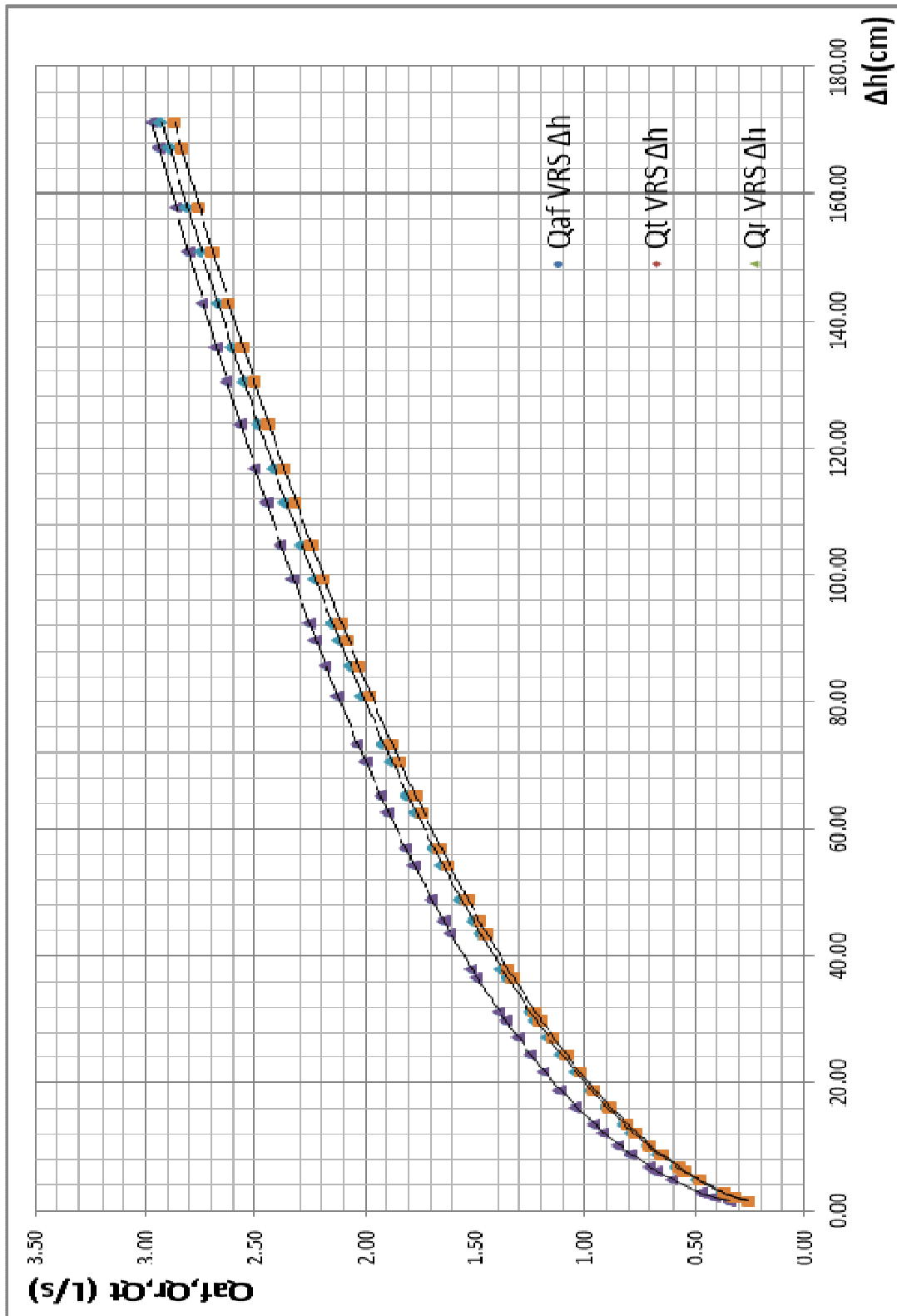


Tabla XVIII. Qaf contra Qrot. (rotámetro)

No.	V (LTS)	Tiempo (s)			Tiempo promedio (s)	CAUDAL Qaf (L/S)	CAUDAL Qrot (m ³ /h)	CAUDAL Qrot (L/S)
		t1	t2	t3				
1	20	62,48	63,18	62,67	62,777	0,319	1,000	0,300
2	20	53,63	52,75	52,73	53,037	0,377	1,200	0,360
3	20	45,11	45,00	45,87	45,327	0,441	1,400	0,420
4	20	39,36	38,74	39,18	39,093	0,512	1,600	0,480
5	20	38,25	38,35	38,95	38,517	0,519	1,800	0,540
6	20	33,55	34,17	33,49	33,737	0,593	2,000	0,600
7	20	32,11	32,50	32,14	32,250	0,620	2,200	0,660
8	20	27,30	27,55	27,82	27,557	0,726	2,400	0,720
9	20	26,48	26,10	26,50	26,360	0,759	2,600	0,780
10	20	23,50	23,96	23,62	23,693	0,844	2,800	0,840
11	20	22,13	21,95	22,25	22,110	0,905	3,000	0,900
12	20	21,48	21,23	21,26	21,323	0,938	3,200	0,960
13	20	19,80	20,20	19,85	19,950	1,003	3,400	1,020
14	20	19,51	19,75	19,87	19,710	1,015	3,600	1,080
15	20	18,68	19,00	18,66	18,780	1,065	3,800	1,140
16	20	16,55	16,40	16,36	16,437	1,217	4,000	1,200
17	20	15,85	15,60	15,70	15,717	1,273	4,200	1,260
18	20	14,91	14,66	14,95	14,840	1,348	4,400	1,320
19	20	14,74	14,48	14,55	14,590	1,371	4,600	1,380
20	20	13,25	13,01	13,27	13,177	1,518	4,800	1,440
21	20	12,85	12,61	12,86	12,773	1,566	5,000	1,500
22	32	20,70	20,80	20,59	20,697	1,546	5,200	1,560
23	32	20,75	20,50	20,77	20,673	1,548	5,400	1,620
24	32	19,69	19,55	19,65	19,630	1,630	5,600	1,680
25	32	19,29	19,36	19,22	19,290	1,659	5,800	1,740
26	32	18,11	18,00	18,36	18,157	1,762	6,000	1,800
27	32	17,40	17,12	17,44	17,320	1,848	6,200	1,860
28	32	16,60	16,36	16,46	16,473	1,943	6,400	1,920
29	32	15,88	15,80	15,95	15,877	2,016	6,600	1,980
30	32	16,17	16,20	16,50	16,290	1,964	6,800	2,040
31	32	15,80	15,50	15,65	15,650	2,045	7,000	2,100
32	32	14,95	14,75	15,05	14,917	2,145	7,200	2,160
33	32	14,10	14,38	14,27	14,250	2,246	7,400	2,220
34	32	13,63	13,60	13,85	13,693	2,337	7,600	2,280
35	32	13,60	13,55	13,56	13,570	2,358	7,800	2,340
36	32	13,25	13,35	13,25	13,283	2,409	8,000	2,400
37	32	13,20	13,17	13,05	13,140	2,435	8,200	2,460
38	32	12,87	12,76	12,65	12,760	2,508	8,400	2,520
39	32	12,31	12,38	12,19	12,293	2,603	8,600	2,580
40	32	12,12	11,98	12,15	12,083	2,648	8,800	2,640
41	32	11,90	11,67	11,75	11,773	2,718	9,000	2,700
42	32	11,30	11,32	11,50	11,373	2,814	9,200	2,760
43	32	11,00	11,10	11,20	11,100	2,883	9,400	2,820
44	32	10,80	10,60	10,65	10,683	2,995	9,600	2,880
45	32	9,98	9,90	9,80	9,893	3,235	9,800	2,940
46	32	9,60	9,50	9,69	9,597	3,334	10,000	3,000

Figura 43. Qaf contra Qrot (rotámetro)

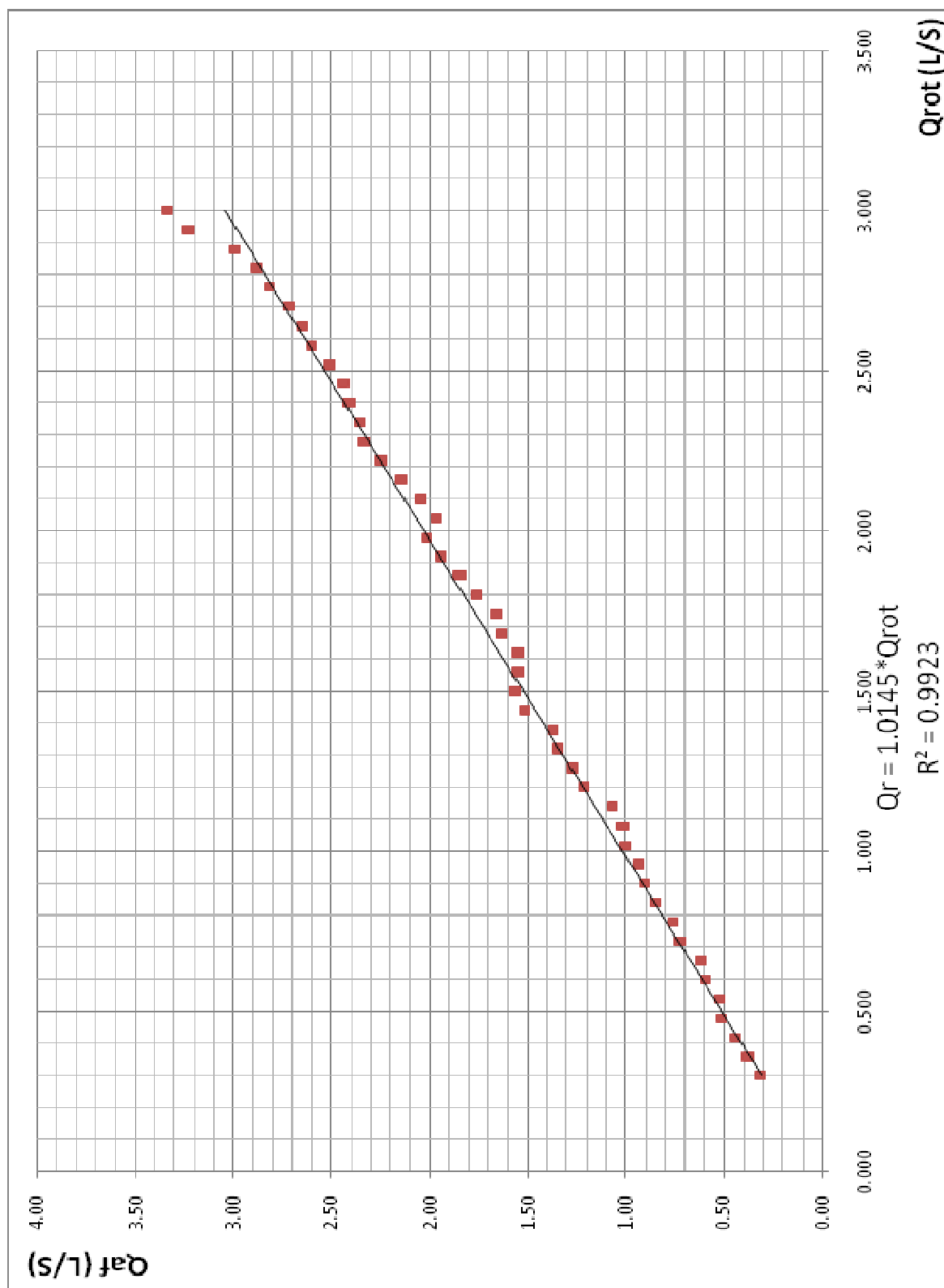
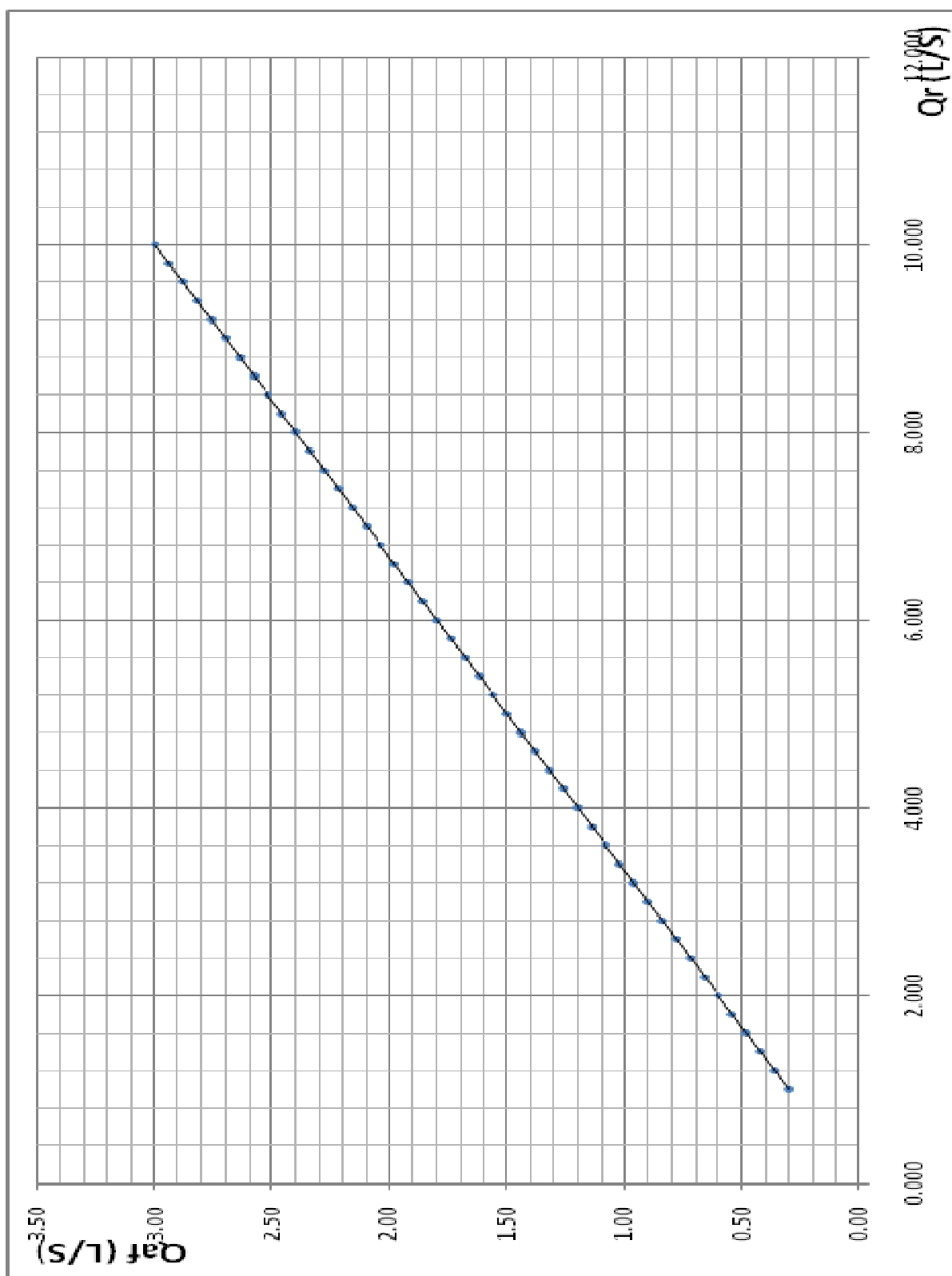


Tabla XIX. Qaf contra Qr (rotámetro)

No.	CAUDAL	CAUDAL
	Qaf (L/S)	Qr=(Cd)(Qrot)(L/S)
1	0,319	0,304
2	0,377	0,365
3	0,441	0,426
4	0,512	0,487
5	0,519	0,548
6	0,593	0,608
7	0,620	0,669
8	0,726	0,730
9	0,759	0,791
10	0,844	0,852
11	0,905	0,913
12	0,938	0,973
13	1,003	1,034
14	1,015	1,095
15	1,065	1,156
16	1,217	1,217
17	1,273	1,278
18	1,348	1,338
19	1,371	1,399
20	1,518	1,460
21	1,566	1,521
22	1,546	1,582
23	1,548	1,643
24	1,630	1,704
25	1,659	1,764
26	1,762	1,825
27	1,848	1,886
28	1,943	1,947
29	2,016	2,008
30	1,964	2,069
31	2,045	2,129
32	2,145	2,190
33	2,246	2,251
34	2,337	2,312
35	2,358	2,373
36	2,409	2,434
37	2,435	2,494
38	2,508	2,555
39	2,603	2,616
40	2,648	2,677
41	2,718	2,738
42	2,814	2,799
43	2,883	2,860
44	2,995	2,920
45	3,235	2,981
46	3,334	3,042

Figura 44. Qaf contra Qr (Rotámetro)



3.5 Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad es la capacidad que tienen los medidores para detectar pequeños cambios de flujo y el cual está relacionado con el error que cada medidor genera.

Una desventaja importante de los medidores de flujo es la pérdida de carga hidráulica que genera, la cual se representa por h_L , esta pérdida de carga es la diferencia de presiones estáticas entre la presión medida en la pared de la tubería aguas arriba y la presión medida aguas abajo, donde el flujo se recupera del impacto con el medidor.

Para el presente estudio se calculará el error de la placa de orificio y del tubo Venturí así como la pérdida de carga que éstos generan.

$$Error = \frac{Q_{AF} - Q_{MEDIDOR}}{Q_{AF}} * 100\%$$

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

Tabla XX. h_l contra Δh (placa de orificio)

No.	Δh cm (H ₂ O)	$h_l = \frac{\sqrt{(1-\beta^4)} - C_d \beta^2}{\sqrt{(1-\beta^4)} + C_d \beta^2} \Delta h$ (cm)
1	2,04	1,165
2	2,04	1,165
3	2,04	1,165
4	3,40	1,942
5	4,76	2,718
6	6,12	3,495
7	6,80	3,884
8	7,48	4,272
9	9,52	5,437
10	10,88	6,214
11	12,24	6,990
12	14,28	8,155
13	14,96	8,544
14	17,68	10,097
15	19,72	11,262
16	22,44	12,816
17	24,48	13,981
18	26,52	15,146
19	29,92	17,088
20	32,64	18,641
21	35,36	20,195
22	40,12	22,913
23	44,20	25,243
24	48,96	27,962
25	51,68	29,515
26	57,12	32,622
27	61,20	34,952
28	65,28	37,282
29	72,08	41,166
30	76,16	43,496
31	78,88	45,049
32	85,00	48,545
33	88,40	50,486
34	91,80	52,428
35	96,56	55,147
36	100,64	57,477
37	104,04	59,419
38	108,80	62,137
39	114,24	65,244
40	118,32	67,574
41	123,76	70,681
42	126,48	72,234
43	133,28	76,118
44	137,36	78,448
45	146,88	83,885
46	152,32	86,992

Figura 45. h_1 contra Δh (placa de orificio)

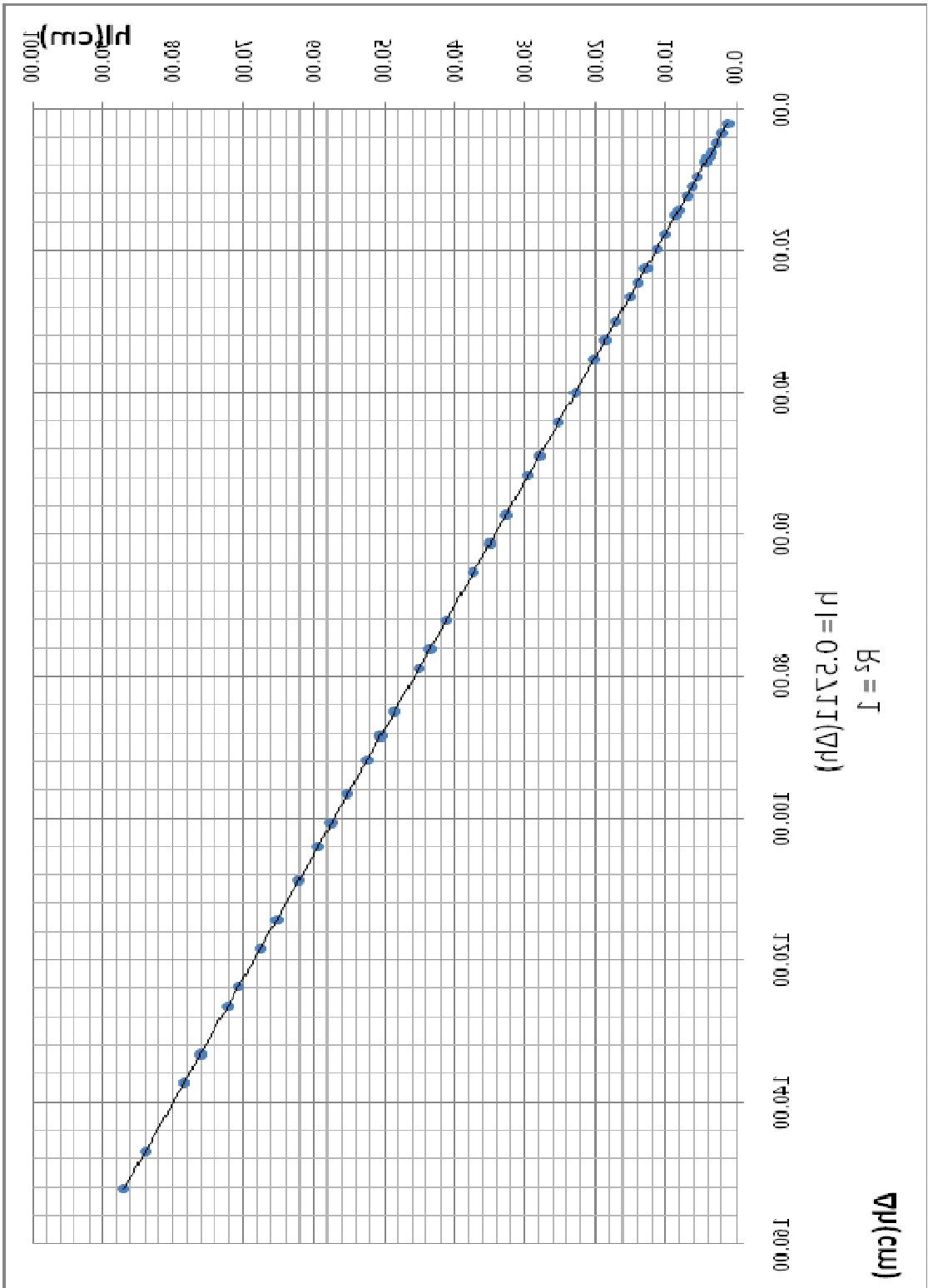


Tabla XXI. Error contra Δh (placa de orificio)

No.	Ah cm (H ₂ O)	Caudal Qt (L/S)	Caudal Qaf(L/S)	$E = \frac{Q_{AF} - Q_{MEDIDOR}}{Q_{AF}} * 100$ (%)
1	2,04	0,476	0,369	5,347
2	2,04	0,476	0,369	5,347
3	2,04	0,476	0,369	5,347
4	3,40	0,614	0,472	4,604
5	4,76	0,727	0,556	4,112
6	6,12	0,824	0,628	3,742
7	6,80	0,869	0,661	3,587
8	7,48	0,911	0,692	3,446
9	9,52	1,028	0,778	3,089
10	10,88	1,099	0,830	2,891
11	12,24	1,165	0,879	2,716
12	14,28	1,259	0,947	2,486
13	14,96	1,288	0,969	2,417
14	17,68	1,401	1,050	2,167
15	19,72	1,479	1,107	2,004
16	22,44	1,578	1,179	1,810
17	24,48	1,648	1,230	1,679
18	26,52	1,715	1,278	1,558
19	29,92	1,822	1,355	1,377
20	32,64	1,903	1,414	1,245
21	35,36	1,981	1,470	1,124
22	40,12	2,110	1,562	0,933
23	44,20	2,215	1,637	0,786
24	48,96	2,331	1,721	0,631
25	51,68	2,395	1,766	0,548
26	57,12	2,517	1,854	0,396
27	61,20	2,606	1,917	0,291
28	65,28	2,691	1,978	0,192
29	72,08	2,828	2,076	0,041
30	76,16	2,907	2,132	-0,043
31	78,88	2,958	2,168	-0,097
32	85,00	3,071	2,248	-0,212
33	88,40	3,132	2,291	-0,272
34	91,80	3,192	2,334	-0,330
35	96,56	3,273	2,392	-0,407
36	100,64	3,342	2,440	-0,471
37	104,04	3,398	2,480	-0,522
38	108,80	3,474	2,534	-0,591
39	114,24	3,560	2,595	-0,666
40	118,32	3,623	2,639	-0,720
41	123,76	3,706	2,697	-0,789
42	126,48	3,746	2,726	-0,823
43	133,28	3,846	2,796	-0,904
44	137,36	3,904	2,837	-0,950
45	146,88	4,037	2,931	-1,054
46	152,32	4,111	2,983	-1,110

Figura 46. Error contra Δh (placa de orificio)

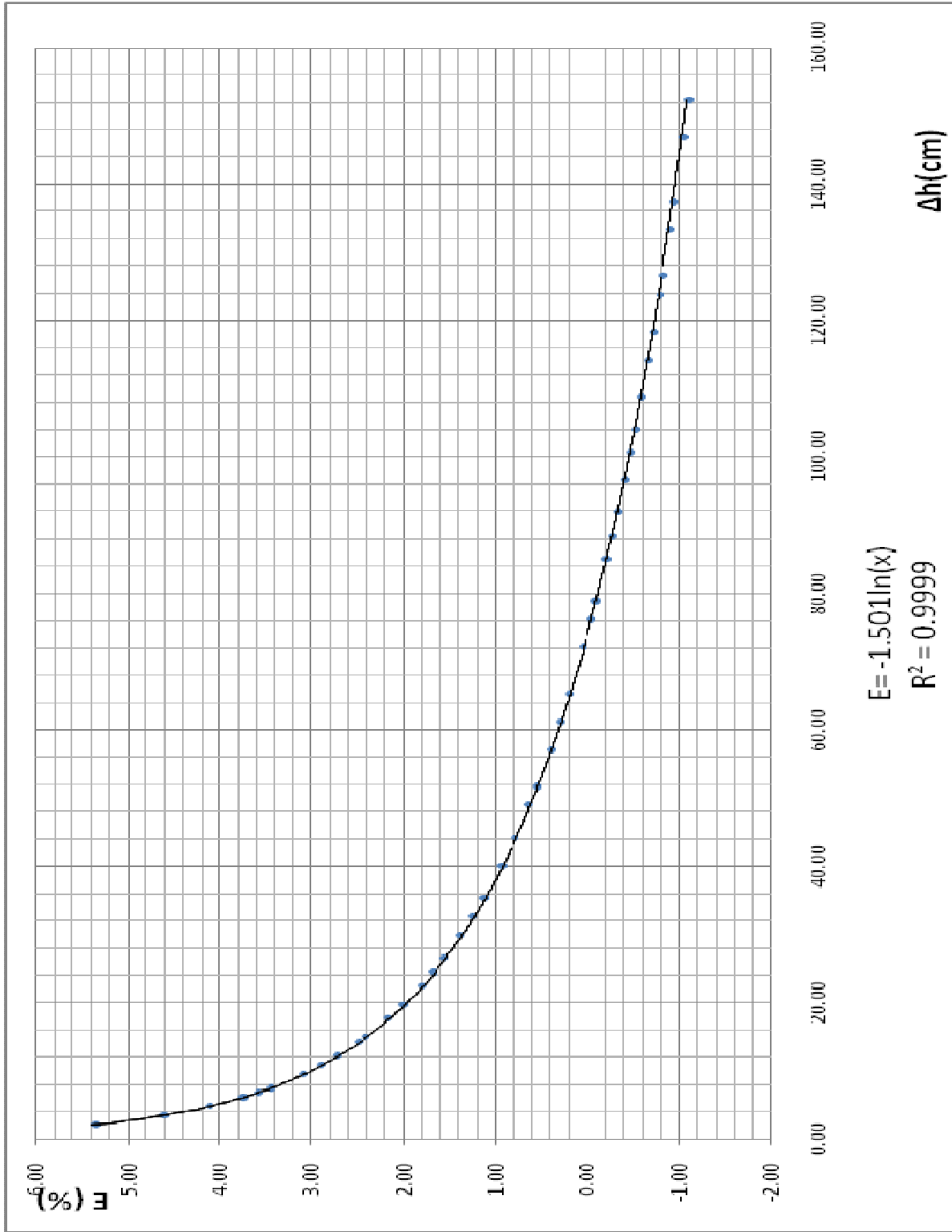


Figura 47. Error contra Δh papel doble logaritmo (placa de orificio)

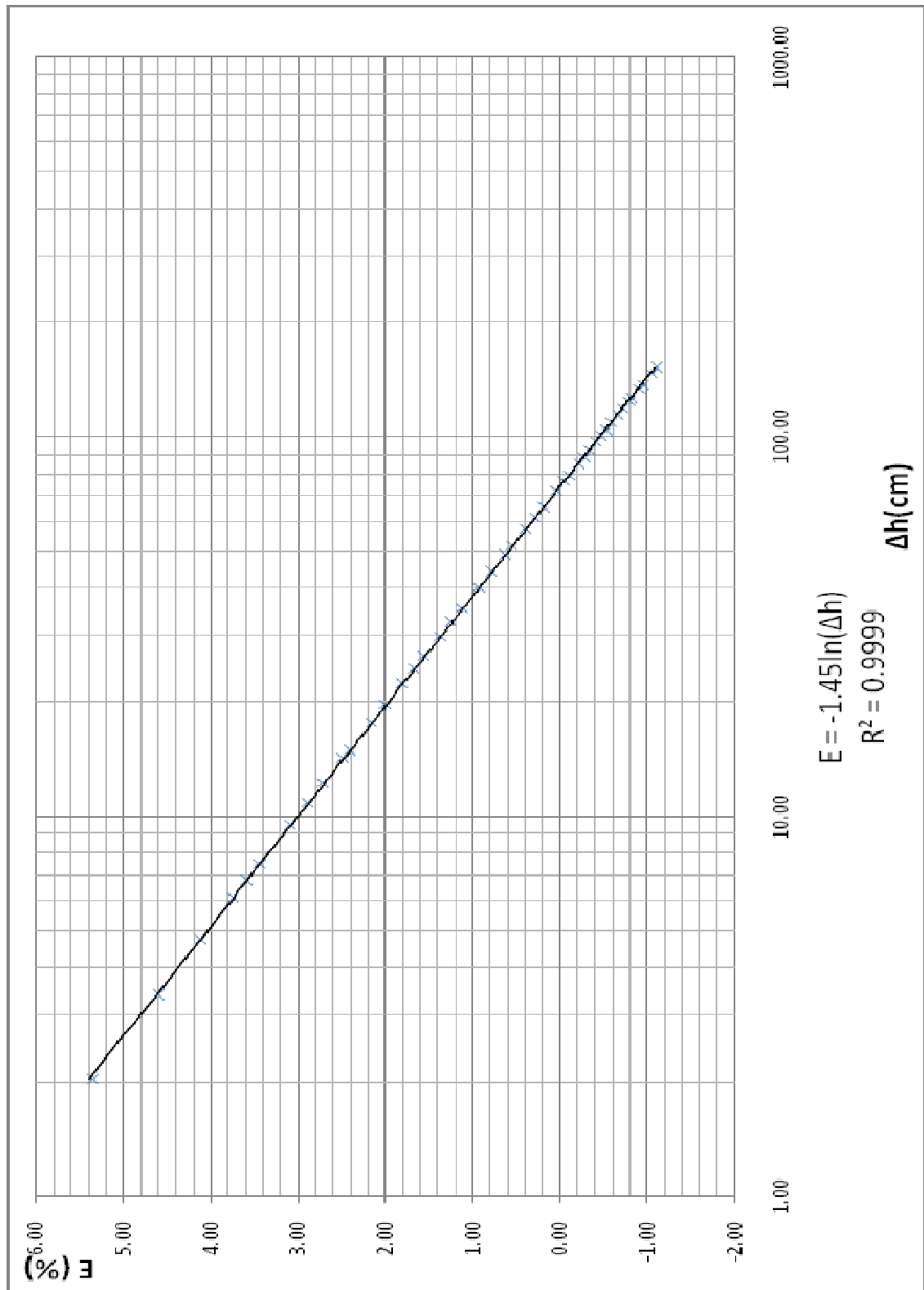


Tabla XXII. h_l contra Δh (Tubo Venturi)

No.	Δh cm (H ₂ O)	$h_L = \frac{\sqrt{(1-\beta^4)} - C_d \beta^2}{\sqrt{(1-\beta^4)} + C_d \beta^2} \Delta h$ (cm)
1	1,36	0,825
2	1,36	0,825
3	2,04	1,237
4	2,72	1,650
5	2,72	1,650
6	4,76	2,887
7	6,12	3,712
8	6,80	4,125
9	8,84	5,362
10	10,20	6,187
11	12,24	7,425
12	13,60	8,250
13	16,32	9,899
14	19,04	11,549
15	21,76	13,199
16	24,48	14,849
17	27,20	16,499
18	29,92	18,149
19	31,28	18,974
20	36,72	22,274
21	38,08	23,099
22	43,52	26,399
23	45,56	27,636
24	48,96	29,698
25	54,40	32,998
26	57,12	34,648
27	62,56	37,948
28	65,28	39,598
29	70,72	42,898
30	73,44	44,548
31	80,92	49,085
32	85,68	51,972
33	89,76	54,447
34	92,48	56,097
35	99,28	60,222
36	104,72	63,522
37	111,52	67,646
38	116,96	70,946
39	123,76	75,071
40	130,56	79,196
41	136,00	82,496
42	142,80	86,620
43	150,96	91,570
44	157,76	95,695
45	167,28	101,470
46	171,36	103,944

Figura 48. h_1 contra Δh (Tubo Venturi)

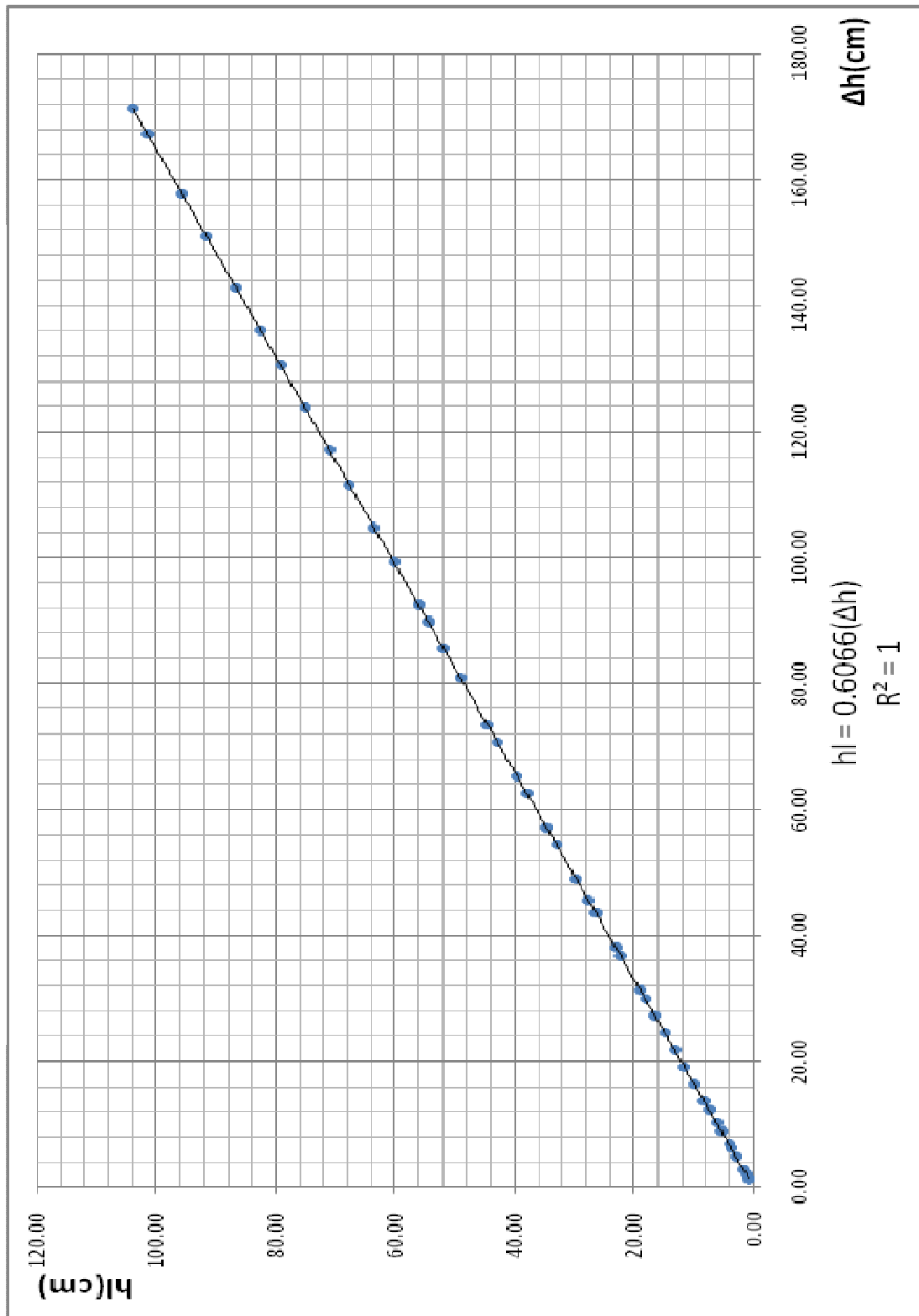


Tabla XXIII. Error contra Δh (Tubo Venturí)

No.	Δh cm (H ₂ O)	Caudal Qt (L/S)	Caudal Qr (L/S)	$E_r = \frac{Q_{AF} - Q_{VENTURI}}{Q_{AF}} * 100$ (%)
1	1.36	0.388	0.343	19.760
2	1.36	0.388	0.343	25.394
3	2.04	0.476	0.411	23.755
4	2.72	0.549	0.467	22.570
5	2.72	0.549	0.467	22.570
6	4.76	0.727	0.599	20.212
7	6.12	0.824	0.671	19.130
8	6.80	0.869	0.703	18.672
9	8.84	0.990	0.790	17.521
10	10.20	1.064	0.842	16.886
11	12.24	1.165	0.914	16.069
12	13.60	1.228	0.958	15.594
13	16.32	1.346	1.039	14.765
14	19.04	1.453	1.113	14.058
15	21.76	1.554	1.181	13.441
16	24.48	1.648	1.245	12.892
17	27.20	1.737	1.305	12.399
18	29.92	1.822	1.362	11.950
19	31.28	1.863	1.389	11.740
20	36.72	2.018	1.492	10.979
21	38.08	2.056	1.517	10.805
22	43.52	2.197	1.610	10.164
23	45.56	2.248	1.643	9.943
24	48.96	2.331	1.697	9.595
25	54.40	2.457	1.778	9.083
26	57.12	2.517	1.817	8.845
27	62.56	2.635	1.893	8.400
28	65.28	2.691	1.929	8.190
29	70.72	2.801	1.999	7.796
30	73.44	2.855	2.033	7.609
31	80.92	2.996	2.123	7.127
32	85.68	3.083	2.178	6.842
33	89.76	3.156	2.224	6.610
34	92.48	3.203	2.254	6.460
35	99.28	3.319	2.326	6.104
36	104.72	3.409	2.382	5.835
37	111.52	3.518	2.450	5.517
38	116.96	3.602	2.503	5.275
39	123.76	3.706	2.567	4.988
40	130.56	3.806	2.629	4.715
41	136.00	3.885	2.677	4.507
42	142.80	3.981	2.736	4.257
43	150.96	4.093	2.805	3.971
44	157.76	4.184	2.860	3.744
45	167.28	4.308	2.936	3.441
46	171.36	4.360	2.968	3.316

Figura 49. Error contra Δh (Tubo Venturi)

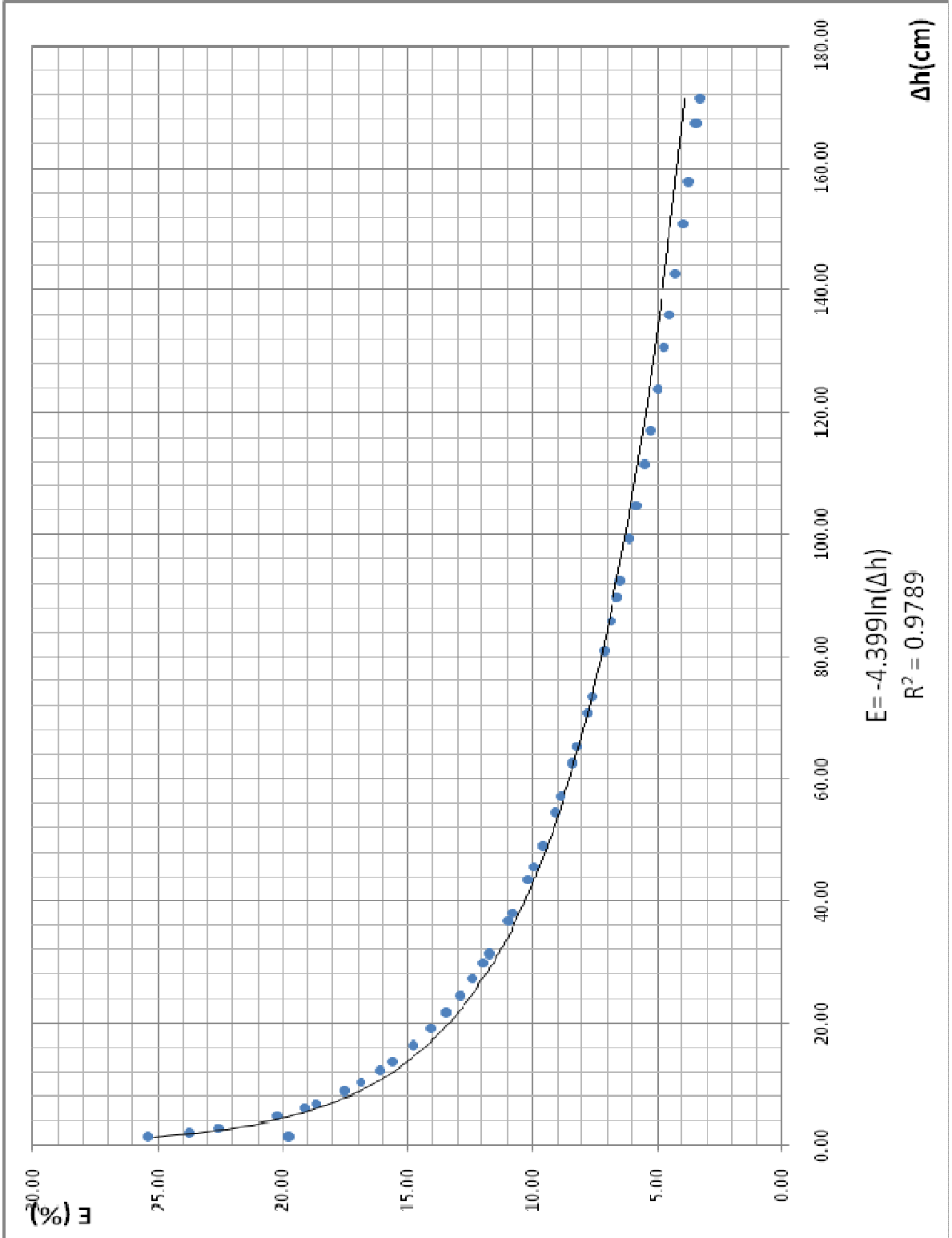
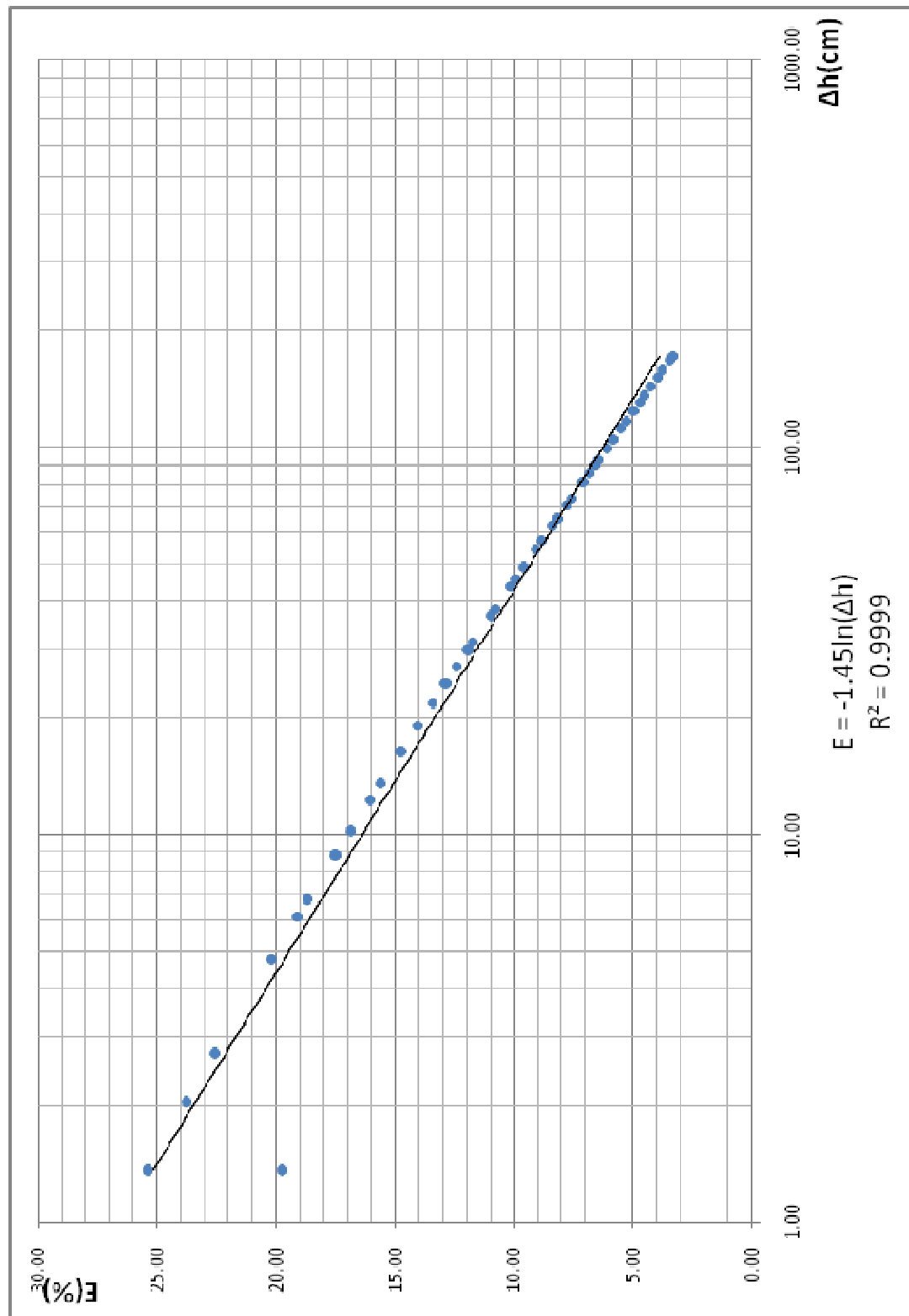


Figura 50. Error contra Δh papel doble logarítmico (Tubo Venturi)



3.6 Instructivo de práctica

MEDIDORES DE FLUJO EN TUBERÍAS A PRESIÓN

Introducción:

Los medidores de flujo son equipos que permiten la medición del caudal a través de un sistema hidráulico de tuberías con flujo a presión. Los medidores de flujo se dividen en diversos tipos, de acuerdo con su morfología y su funcionalidad.

Existen métodos confiables para la medición de flujo, uno de los más comunes es la medición de diferencias de presión causadas por la inserción, en la línea de flujo, de algún mecanismo que reduce la sección; al pasar el fluido a través de la reducción aumenta su velocidad y su energía cinética, pero disminuye su presión; la placa de orificio y el tubo Venturí pertenecen a esta clase.

Es importante conocer el funcionamiento de los medidores de flujo, por tal motivo, conviene hacer un ensayo para verificar el funcionamiento exacto de cada medidor, así como sus ventajas, desventajas y aplicaciones.

Objetivos:

- Realizar la calibración de los medidores de flujo, el tubo Venturí y la placa de orificio

- Determinar, mediante la calibración, el coeficiente de descarga C_d a través del rotámetro.
- Observar las condiciones de funcionamiento de la placa de orificio y tubo Venturí.

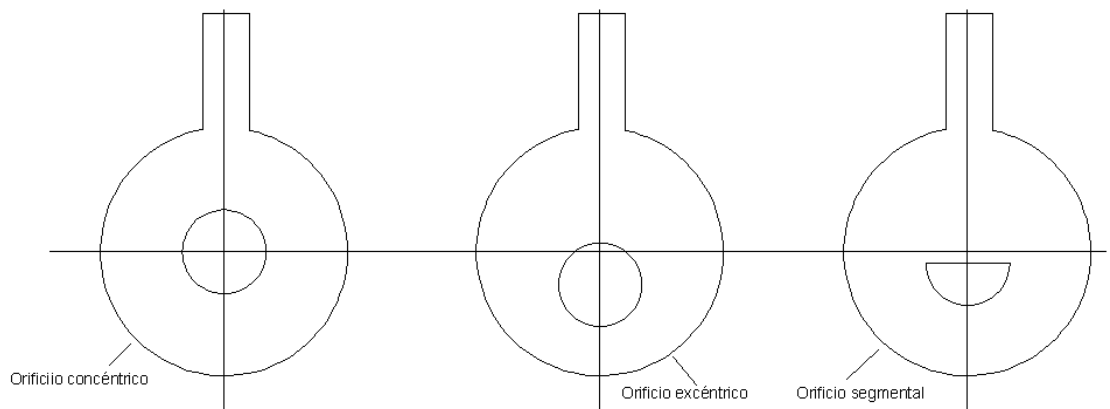
Marco teórico:

Muchos dispositivos se encuentran disponibles para la medición del flujo. Algunos de ellos miden la velocidad del flujo en forma directa, mientras que otros miden la velocidad promedio del flujo, la cual puede convertirse a velocidad de flujo de volumen utilizando el principio de continuidad ($Q=AV$), requiriendo un proceso de calibración o la aplicación de un coeficiente de descarga al caudal medido. La forma de salida del medidor de flujo también varía en forma considerable de un tipo a otro. La indicación puede ser una presión, un nivel del fluido, una señal eléctrica continua o en una serie de impulsos eléctricos. La elección del tipo básico de medidor de fluido y su sistema de indicación depende de varios factores.

Placa de orificio:

La placa de orificio es el elemento primario para la medición de flujo más sencillo, es una lámina plana circular con un orificio concéntrico, excéntrico ó segmentado y se fabrica de acero inoxidable, la placa de orificio tiene una dimensión exterior igual al espacio interno que existe entre los tornillos de las bridas del montaje, el espesor del disco depende del tamaño de la tubería y la temperatura de operación, en la cara de la placa de orificio que se conecta por la toma de alta presión, se coloca perpendicular a la tubería y el borde del orificio, se ajusta a escuadra con un ángulo de 90^0 grados, al espesor de la placa se le hace un biselado con un corte de un ángulo de 45 grados por el lado

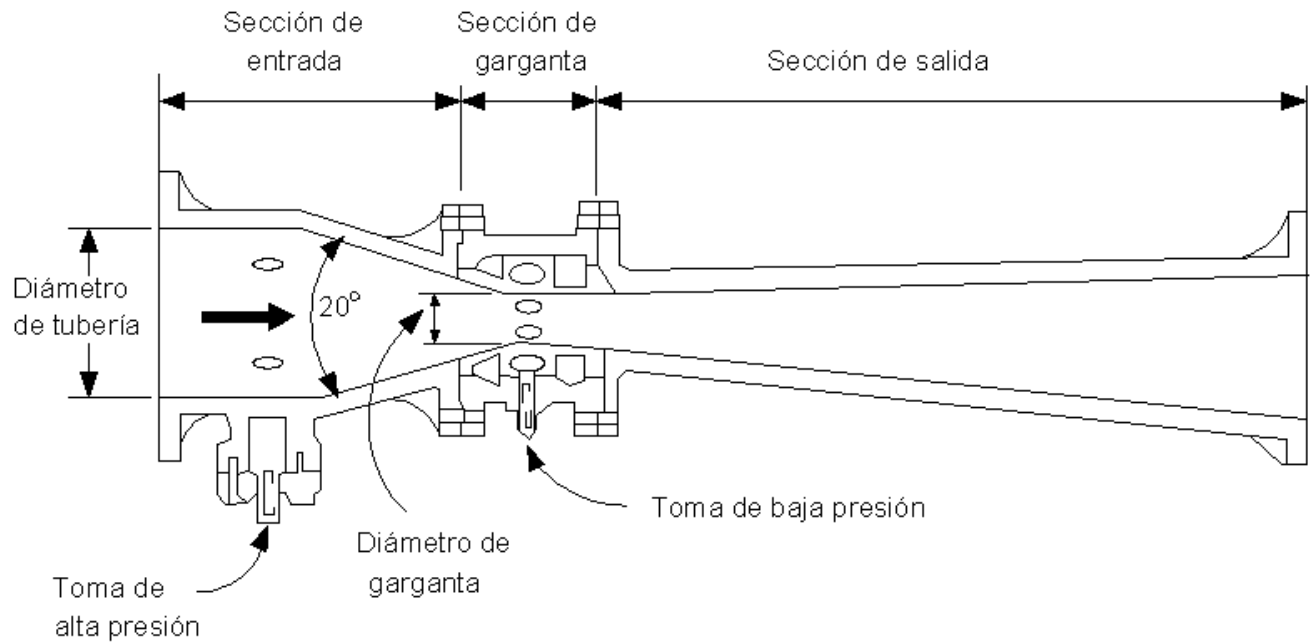
de baja presión, el biselado afilado del orificio es muy importante, es prácticamente la única línea de contacto efectivo entre la placa y el flujo, cualquier saliente o distorsión del orificio ocasiona un error del 2 al 10% en la medición, además, se suelda a la placa de orificio una oreja, para marcar en ella su identificación, el lado de entrada, el número de serie, la capacidad, y la distancia a las tomas de presión alta y baja.



Tubo Venturí:

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

El tubo Venturí permite la medición de flujos 60% superiores a los de la placa de orificio en las mismas condiciones de servicio y con una pérdida de presión de solo 10% o 20% de la presión diferencial. Posee una incertidumbre baja y permite el paso de fluidos con un porcentaje relativamente grande de sólidos, sin embargo, los sólidos abrasivos influyen en su forma afectando la exactitud de la medida.

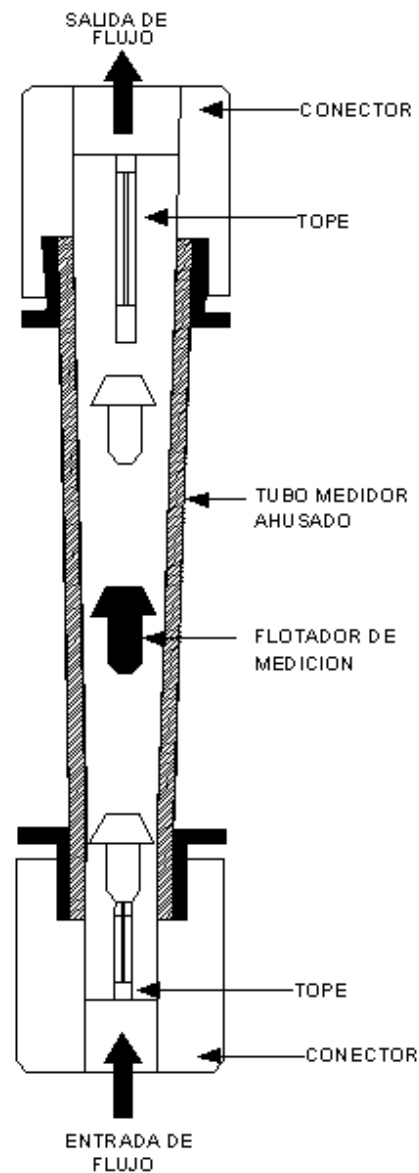


Rotámetro:

El rotámetro es un tipo común de medidor de área variable. El fluido corre hacia arriba de un tubo libre que tiene una ramificación en el interior. Un flotador está suspendido en el fluido que corre en una posición proporcional a la velocidad del flujo.

Las fuerzas hacia arriba debido al arrastre del fluido sobre el flotador y la boya solamente equilibran el peso del flotador.

Una velocidad de flujo diferente provoca que el flotador se mueva hacia una posición, cambiando el área libre entre el flotador y el tubo hasta que se recupera el equilibrio otra vez. La posición del flotador se mide con una escala calibrada, la cual está graduada en las unidades adecuadas de velocidad de flujo de volumen o velocidad de flujo de peso.



Descripción del ensayo:

1. Encender la bomba y enviar directamente el flujo a la tubería en donde está instalada la placa de orificio y el tubo Venturi.
2. Conectar el manómetro a los racores (tomas de presión) de la placa de orificio y tubo Venturi y purgar el aire dentro de las mangueras, (lo que se consigue hasta que ambas ramas del manómetro diferencial estén niveladas).
3. Variar la abertura de la válvula que regula el agua a través del rotámetro, para obtener diferentes valores de caudal.
4. Anotar las diferencias de alturas en los meniscos del manómetro, en centímetros de mercurio.
5. Anotar la lectura del flujo en el rotámetro, en metros cúbicos por hora (m^3/hora).
6. Repetir el proceso del punto 3 al 5 para una variación del caudal de 1 m^3/hora hasta 10 m^3/hora

Cálculo de resultados:

A) Determinación del caudal:

1. Convertir el caudal leído en el rotámetro a L/s.

B) Desviación estándar en la toma de datos:

1. Encontrar el valor k de ajuste de la ecuación que permita determinar la relación Q y Δh, de la forma que una función $Q = k \Delta h^{1/2}$ donde $\Delta h = h_1 - h_2$.

Prueba	Q _{af} (L/s)	Δh (m.c.a.)	$\sqrt{\Delta h}$	$Q * \sqrt{\Delta h}$
1				
2				
3				
...				
...				
20				
Σ =		Σ =		Σ =

$$k = \frac{\sum (Q * \sqrt{\Delta h})}{\sum (\sqrt{\Delta h})}$$

2. Encontrar el valor de la desviación estándar (σ)

Prueba	Q _{af} (L/s)	Δh (m.c.a.)	$k * \sqrt{\Delta h}$	$Q - k * \sqrt{\Delta h}$	$(Q - k * \sqrt{\Delta h})^2$
1					
2					
3					
...					
...					
20					
Σ =		Σ =			Σ =

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (Q - k * \sqrt{\Delta h})^2}{n - 1}}$$

C) Calibración:

1. Calcular la diferencia de presiones registrada por cada medidor, así:
 $\Delta h = h_1 - h_2$, este valor representa la pérdida de energía provocada por cada medidor en particular.
2. Encontrar el caudal teórico a partir de la siguiente ecuación:

$$Q_t = \sqrt{\frac{2g * \left(\frac{P_1 - P_2}{\gamma} \right)}{\frac{1}{A_1^2} - \frac{1}{A_2^2}}}$$

3. Plotear en papel milimetrado las curvas correspondientes a caudal teórico (L/s) en el eje "x" y el caudal de aforo (L/s) en el eje "y".
4. Del inciso anterior, deducir la pendiente de la recta para cada medidor, su valor representará el coeficiente de descarga (Cd).
5. Comparar el coeficiente de descarga del inciso 4 y el calculado con la siguiente ecuación:

$$C_d = 0.5959 + 0.0312 \cdot \beta^{2.10} - 0.1840 \cdot \beta^8 + 0.0029 \cdot \beta^{2.50} \left(\frac{10^6}{R_e} \right)^{0.75}$$

donde:

$$\beta = \frac{d}{D} \text{ (Relación de diámetros)}$$

$$R_e = \frac{vD}{\nu}$$

D) Análisis de sensibilidad:

1. Calcular la pérdida de carga generada por cada medidor con la

siguiente ecuación:
$$h_L = \frac{\sqrt{(1-\beta^4)} - C_d \beta^2}{\sqrt{(1-\beta^4)} + C_d \beta^2} \Delta h$$

2. Plotear en papel milimetrado los valores de Δh (cm) en el eje “x” y el h_L (cm) en el eje “y”.

3. Calcular el error generado por cada medidor de flujo con la siguiente

ecuación:
$$E = \frac{Q_{ROTAMETRO} - Q_{MEDIDOR}}{Q_{ROTAMETRO}} * 100\%$$

4. Plotear en papel milimetrado los valores de Δh (cm) en el eje “x” y el Error(%) en el eje “y”.

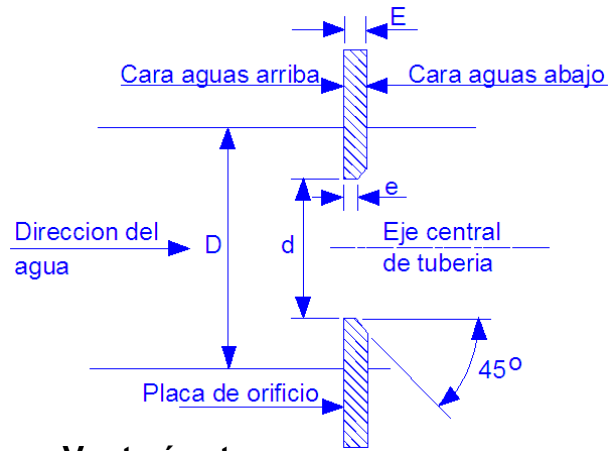
5. Analizar los resultados.

6. Obtener conclusiones, según objetivos y resultados.

No.	Datos de laboratorio			Calculos						
	Altura de piezometros		Q(rotametro) (m3/h)	Qteorico (L/s)	Qrotametro (L/s)	Qr=Cd x Qt (L/s)	N. Reynolds	Cd	hL (cm)	Error (%)
	h1(cm-hg)	h2(cm-hg)								
1										
2										
3										
:										
:										
n										

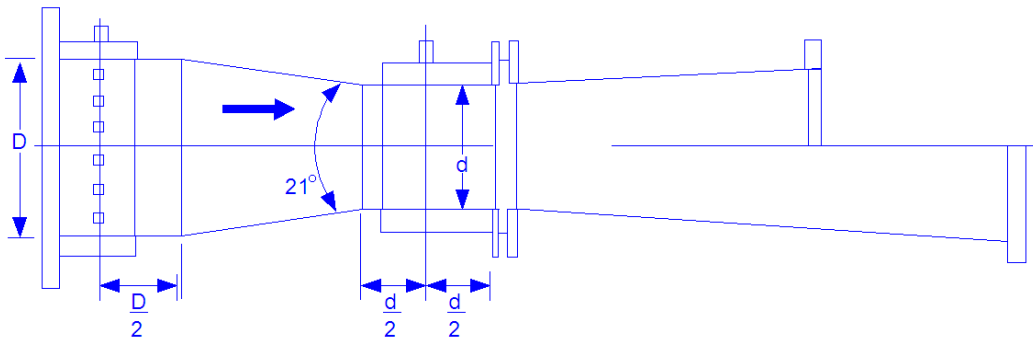
Placa de orificio

E =	0.01	cm
e =	2.54	cm
D =	5.08	cm
d =	3.00	cm

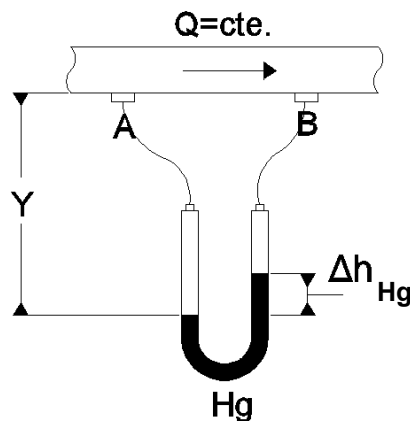


Venturímetro

D =	5.08	cm
d =	2.5	cm



Medición de la diferencia de presiones con un manómetro diferencial



$$\Delta h_{H_2O} = \frac{P_A - P_B}{\gamma_{H_2O}}$$

$$\Delta h_{H_2O} = 12.6 \Delta h_{Hg}$$

CONCLUSIONES

1. El error en la toma de tiempos para los aforos realizados en los ensayos de laboratorio fue aceptable, ya que fue menor al 2%.
2. Al estudiar la desviación estándar de los datos tomados en el laboratorio para la placa de orificio resultó ser 0.09, para el tubo Venturí 0.09 y para el rotámetro 0.12, cuyos valores se consideran pequeños, validando los datos tomados.
3. El valor del coeficiente de descarga (C_d) para la placa de orificio resultó ser 0.73 y para el tubo Venturí 0.98, son valores menores a uno, por consiguiente los valores de descarga son aceptables y lógicos.
4. El valor del coeficiente de descarga (C_d) de la placa de orificio resultó ser menor que el del tubo Venturí, deduciendo que la placa de orificio presenta pérdidas de energía mayores que el tubo Venturí.
5. El valor del coeficiente de descarga (C_d) obtenido por mínimos cuadrados es aceptable, ya que proviene de una relación directa de los caudales teórico y real.
6. El valor del coeficiente de descarga (C_d) obtenido por la ecuación 55 es inexacto, ya que dicha ecuación está normada para ser aplicada en diámetros mayores a 2".
7. El valor del coeficiente de descarga (C_d) del rotámetro aproximadamente es igual a uno, indicando que el rotámetro es un medidor de caudales exacto para el rango de caudales utilizados en el presente estudio.

8. La pérdida de carga generada por la placa de orificio es mayor que el generado por el tubo Venturí, cuando el caudal que circula por ambos medidores es constante.
9. La placa de orificio es un medidor exacto para caudales pequeños ya que presenta menor error para estos caudales. Produciendo una diferencia de presión significativa.
10. El tubo Venturí es un medidor exacto para caudales grandes ya que presenta menor error para estos caudales.
11. Debido a que la placa de orificio produce diferencias de presión significativas para caudales bajos, se califica de muy sensible, proporcionando certeza en la medición del flujo.
12. El tubo Venturí no registra diferencias de presión significativas para caudales bajos, por lo que únicamente es sensible, y por lo tanto exacto, para la medición de caudales grandes.

RECOMENDACIONES

1. Es importante el mantenimiento del circuito y de los medidores de flujo ya que de esto dependerá el error en la medición de caudales para el laboratorio.
2. Se sugiere otro manómetro de mercurio para el tubo Venturí, ya que al desconectarlo de la placa de orificio puede generar un dato erróneo en la medición de caudales, si no se purga adecuadamente.
3. Es muy importante elegir un medidor de flujo que se ajuste lo mejor que se pueda a una aplicación en específico, pero hay que tener ciertos criterios para elegir el medidor de flujo que mejor se ajuste a las características particulares del sistema en donde se instalará.
4. Para poder considerar el efecto del paso del tiempo en la calibración de los medidores de flujo, es necesario realizar una nueva calibración cuando se observe una baja correspondencia entre los caudales teóricos y reales, o bien, una disminución del coeficiente de descarga.

BIBLIOGRAFÍA

1. División de Ingeniería de Crane. **Flujo de Fluidos en válvulas, accesorios y tuberías.** Edición McGraw-Hill, México, 1993.
2. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. **Serie Autodidáctica de Medición de Placa de Orificio,** México, 2001.
3. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. **Serie Autodidáctica de Medición Tubos Venturi, Call y Tobera,** México, 2001.
4. Martínez Guzmán, Héctor Eduardo. **Consideraciones sobre la medición de caudales de agua potable servidos en domicilio.** Trabajo de graduación. Universidad Mariano Gálvez, Guatemala, 1980.
5. Mot, Robert L. **Mecánica de fluidos aplicada.** 1ª. Edición. Editorial Prentice Hall, México 2001.
6. Streeter, Victor L. **Mecánica de fluidos.** 9ª edición. Editorial McGraw-Hill, México, 2000.