

CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA LA MEDICIÓN DE
CAUDALES

JOHANN RICHARD MONCAYO MONTILLA
CARLOS DARWIN POLO OSEJO

Proyecto de Grado para optar al título de Ingeniero Civil

Director

RICARDO ANDRES ARTURO INSUASTY

Ingeniero Mecánico

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN
SAN JUAN DE PASTO

2003

CONSTRUCCIÓN DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA LA MEDICIÓN DE
CAUDALES

JOHANN RICHARD MONCAYO MONTILLA
CARLOS DARWIN POLO OSEJO

UNIVERSIDAD DE NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN
SAN JUAN DE PASTO

2003

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del presidente del jurado

Firma del Jurado

Firma del jurado

San Juan de Pasto, 8 de Septiembre de 2003

“Las ideas y conclusiones aportadas en la tesis de grado, son de responsabilidad exclusiva de su autor”

Art.1, del acuerdo número 324 de octubre 11 de 1966 emanado del honorable concejo directivo de la Universidad de Nariño.

Dedico este trabajo a DIOS por haberme guiado
darme las fuerzas necesarias para culminar
con éxito esta etapa de mi vida.

A BLANCA mi madre por sus sacrificios
y sabios consejos.

A SILVIO mi padre por su apoyo y comprensión.

A mis hermanos: Magda y Diego.

A mis amigos y familiares.

JOHANN MONCAYO

D edico este traba j a m is padres: Carlos y A lba

A m is herm anos: Jhony y A udrey ,

A m i sobrino Chirstiam .

A m is fam ilia res y am igos.

D A R W I N P O L O

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a DIOS por darnos la serenidad y el aliento necesario para culminar con este proyecto.

Al Ingeniero RICARDO ARTURO director de nuestro proyecto, por su colaboración.

A ROBERTO GARCIA laboratorista de la Universidad de Nariño, por su desinteresada colaboración, sin la cual no hubiese sido posible la realización de este proyecto.

A la Universidad de Nariño por la formación académica, especialmente a la facultad de ingeniería

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	27
1. OBJETIVOS	29
1.1 OBJETIVO GENERAL	29
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	29
2 MARCO TEÓRICO	31
2.1 GENERALIDADES	31
2.2 DEFINICION DE FLUIDOS	32
2.3 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS	33
2.3.1 Densidad	33
2.3.2 Gravedad especifica	33
2.3.3 Peso especifico	33
2.3.4 Compresibilidad	33
2.3.5 Viscosidad dinámica	33
2.3.6 Viscosidad cinemática	34
2.4 CARACTERISTICAS DEL MOVIMIENTO DE LOS FLUIDOS	34
2.5 FLUJO DE FLUIDOS Y ECUACIÓN DE BERNOULLI	37
2.5.1 Rapidez de flujo de fluido	37

2.5.2	Ecuación de continuidad	38
2.5.3	Velocidad de flujo recomendado en tuberías	39
2.6	Ecuación de Bernoulli	40
2.6.1	Interpretación Ecuación de Bernoulli	45
2.6.2	Aplicación de la Ecuación de Bernoulli	48
2.7	NUMERO DE REYNOLDS	49
2.7.1	Flujo laminar y Flujo turbulento	49
2.7.2	Numero de Reynolds critico	53
2.8	FLUJO EN TUBERÍAS	54
2.9	PERDIDAS MENORES	56
2.9.1	Líneas de cargas totales y de cargas piezométricas	56
2.9.2	Fuentes de perdidas menores	57
2.9.3	Coeficientes de resistencia	57
2.9.4	Dilatación súbita	58
2.9.5	Dilatación gradual	60
2.9.6	Contracción súbita	62
2.9.7	Contracción gradual	63
2.10	MEDICIONES DE PRESIÓN	65
2.10.1	Rangos de presión	66
2.10.2	Instrumentos de medida	66
2.11	MEDICIONES DE FLUJO	68
2.11.1	Factores para la selección de dispositivos de medición	68

2.11.2	Tipos de medidores	71
2.12	TEORÍA DE ERRORES	90
2.12.1	Errores experimentales	90
2.12.2	Determinación de los errores experimentales	91
2.12.3	Relación entre variables	92
2.12.4	Interpretación de resultados	97
3	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN	98
3.1	PARTES DEL BANCO DE PRUEBAS	98
3.1.1	Tanque de almacenamiento y aforo	98
3.1.2	Motobomba	99
3.1.3	Accesorios	100
3.1.4	Conducción	103
3.1.5	Tomas de presión	103
3.1.6	Mangueras	103
3.1.7	Flauta manométrica	103
3.1.8	Grifos	103
3.1.9	Manómetro	103
3.1.10	Dispositivos de medición de caudal	103
3.1.11	Bridas	104
3.1.12	Empaques	104
3.1.13	Tornillos cromados	104
3.1.14	Tablero	104

3.1.15	Soporte	104
3.2	CALCULO Y DISEÑO	105
3.2.1	Diámetro de la tubería de conducción	105
3.2.2	Diseño del dispositivo venturi	106
3.2.3	Diseño del diafragma u orificio	110
3.2.4	Diseño de la tobera	115
3.2.5	Diseño de bridas	117
3.2.6	Diseño de flauta manométrica	120
3.2.7	Calculo del manómetro	122
3.2.8	Diseño del tablero	124
3.2.9	Diseño del soporte	125
3.2.10	Diseño del tanque de almacenamiento y aforo	127
4	ANALISIS Y PATRONAMIENTO	140
4.1	CALIBRACION DEL VERTEDERO	140
4.2	CALIBRACION DE DISPOSITIVOS DE MEDICIÓN	143
4.2.1	Calibración venturi	143
4.2.2	Calibración tobera	147
4.2.3	Calibración diafragma	151
5	GUIA DE LABORATORIO	155
6	CONCLUSIONES	171
7	RECOMENDACIONES	173
	BIBLIOGRAFÍA	174

GLOSARIO

Accesorio: elemento que direcciona o regula el paso de fluido a través de un conducto cerrado

Aforar: medir la cantidad de agua que lleva una corriente en una unidad de tiempo.

Buje: pieza cilíndrica que tiene como fin disminuir el diámetro de un accesorio.

Motobomba: dispositivo mecánico empleado para impulsar agua, con la energía suministrada por un motor eléctrico o de explosión.

Niple: tramo de tubería recta lisa o roscada que sirve para unir dos accesorios.

Piezómetro: instrumento que permite medir la presión o altura hidrostática de los fluidos.

PVC: cloruro de polivinilo, material plástico utilizado para la fabricación de tuberías a presión.

RDE: es la relación existente entre el diámetro exterior de una tubería y el espesor de sus paredes.

Válvula: dispositivo de cierre que regula el paso de un fluido por un conducto o tubería.

Contracción: cambio de un conducto mayor a uno menor produciéndose una pérdida de energía debida al aumento de velocidad.

Dilatación: cambio de un conducto menor a uno mayor en donde la velocidad del fluido disminuye.

Venturi: es un elemento deprimógeno, cuya función es provocar una diferencia de presiones.

Tobera: son conductos convergentes en la dirección del flujo que producen un aumento de velocidad y una disminución de la presión.

Diafragma: es una placa que lleva un orificio circular concéntrico con el eje de la tubería.

Caudal: es el volumen de fluido por unidad de tiempo que pasa a través de una sección transversal a la corriente.

Aguas arriba: zona ubicada antes de un punto de referencia en una corriente de fluido.

Aguas abajo: zona ubicada después de un punto de referencia en una corriente de fluido.

Válvula de compuerta: son diseñadas para aplicaciones en conducciones de agua, gas y petróleo.

Tee PVC: accesorio encargado de distribuir el flujo en 2 direcciones con ángulo de 90^0

Conducción: componente a través del cual se transporta agua potable, ya sea a flujo libre o a presión.

LISTA DE CUADROS

	pág.
Cuadro 1. Coeficiente de resistencia – dilatación gradual.	61
Cuadro 2. Longitud mínima libre de instalación de los diafragmas.	87
Cuadro 3. Propiedades físicas duralon.	113
Cuadro 4. Coeficientes del vertedero.	131
Cuadro 5. Datos calibración vertedero.	140
Cuadro 6. Tabla carga hidráulica vs. caudal.	141
Cuadro 7. Datos calibración venturi.	143
Cuadro 8. Datos calibración tobera.	147
Cuadro 9. Datos calibración diafragma.	151

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Sistema de distribución de fluido.	39
Figura 2. Elemento de fluido en un conducto.	42
Figura 3. Energía de flujo.	43
Figura 4. Elementos de fluido utilizados en la Ecuación de Bernoulli.	44
Figura 5. Cabezas de presión, elevación, velocidad y total.	46
Figura 6. Dilatación súbita.	59
Figura 7. Dilatación gradual.	60
Figura 8. Contracción súbita.	62
Figura 9. Vena contracta formada en la contracción súbita.	63
Figura 10. Contracción gradual.	64

Figura 11. Molinete hidráulico.	72
Figura 12. Rotámetro.	73
Figura 13. Tubo estándar del venturi de ASME.	74
Figura 14. Diafragma.	83
Figura 15. Tobera.	88
Figura 16. Banco de pruebas para la medición de caudales.	98
Figura 17. Motobomba.	99
Figura 18. Válvula de compuerta.	100
Figura 19. Válvula Universal hierro galvanizado.	101
Figura 20. Accesorios salida motobomba.	102
Figura 21. Tubo venturi.	107

Figura 22. Tomas de presión venturi.	110
Figura 23. Diafragma estándar VDI.	111
Figura 24. Medidor tobera ISA.	116
Figura 25. Empaque y tobera.	119
Figura 26. Tobera y bridas ensambladas.	119
Figura 27. Partes flauta manométrica.	120
Figura 28. Grifo.	121
Figura 29. Flauta manométrica.	122
Figura 30. Manómetro y vacuometro.	123
Figura 31. Tablero ensamblado.	125
Figura 32. Soporte.	126

Figura 33. Vertedero triangular.	129
Figura 34. Cámara de quietamiento.	136
Figura 35. Dimensiones tanque.	138
Figura 36. Tanque terminado.	139
Figura 37. Banco de pruebas.	139
Figura 38. Curva vertedero.	142
Figura 39. Curva calibración venturi $\ddot{A}H$ vs. Caudal.	145
Figura 40. Curva calibración venturi Reynolds vs. Cd.	146
Figura 41. Curva calibración tobera $\ddot{A}H$ vs. Caudal.	149
Figura 42. Curva calibración tobera Reynolds vs. Cd.	150
Figura 43. Curva calibración diafragma $\ddot{A}H$ vs. Caudal.	153

Figura 44. Curva calibración diafragma Reynolds vs. Cd.

154

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es investigar las aplicaciones y eficiencia de los dispositivos de medición de caudal como componentes esenciales para la construcción de un banco de pruebas. Para esto se realizó un estudio y análisis de estos componentes, en los cuales se adoptó al venturi, tobera y diafragma como los dispositivos más utilizados para la medición de caudales. A fin de cumplir con el objetivo principal de la investigación, se lleva a cabo en el laboratorio de hidráulica de la Universidad de Nariño, la construcción del “Banco de pruebas para la medición de caudales”; utilizando los diferentes materiales y accesorios necesarios para su elaboración.

Los ensayos realizados al aparato nos permitieron el patronamiento de cada dispositivo y la obtención de una serie de curvas (Altura vs. Caudal – Reynolds vs. Coeficiente de descarga) y ecuaciones que servirán de base para realizar la comparación con futuros ensayos. Los resultados obtenidos fueron procesados y analizados a fin de realizar la comparación con estudios anteriormente realizados.

Como parte importante para este trabajo, se lleva a cabo la elaboración de una guía de laboratorio que contendrá los fundamentos en que se basa la medición de caudales, una descripción del equipo y su funcionamiento, como también el trabajo de laboratorio a realizarse por los estudiantes.

Finalmente como parte de la investigación se formulan algunas conclusiones y recomendaciones, que son de importancia para la realización de practicas y ensayos con el banco de pruebas.

ABSTRACT

The objective of this work is to investigate the applications and efficiency of the devices of flow mensuration like essential components for the construction of a bank of tests. For this was carried out a study and analysis of these components, in which it was adopted to the venturi, nozzle and diaphragm like the devices more used for the mensuration of flows. In order to fulfill the main objective of the investigation, it is carried out in the laboratory of hydraulics of the University of Nariño, the construction of the "Bank of tests for the mensuration of flows"; using the different materials and necessary accessories for their elaboration.

The rehearsals carried out to the apparatus allowed us the patronamiento of each device and the obtaining of a series of curved (Height vs. Flow - Reynolds vs. discharge Coefficient) and equations that will serve as base to carry out the comparison with future rehearsals. The obtained results were processed and analyzed in order to carry out the comparison with previously carried out studies.

As important part for this work, it is carried out the elaboration of a laboratory guide that will contain the foundations on that it is based the mensuration of flows, a description of the team and their operation, as well as the laboratory work to be carried out for the students.

Finally like part of the investigation is formulated some conclusions and recommendations that are of importance for the realization of you practice and rehearsals with the bank of tests.

INTRODUCCIÓN

El proyecto tiene como objetivo principal “La construcción de un banco de pruebas para la medición de caudales”, y se inició al realizar un diagnóstico en el cual se identificó como una necesidad del laboratorio de hidráulica, el contar con nuevos equipos, que ilustrarán al estudiante de una manera práctica el comportamiento de los fluidos.

Ya que el estudio de la mecánica de fluidos y sus respectivas ramas tales como la hidrodinámica no puede ser completo sin la práctica en donde el estudiante entra en contacto con todos los elementos necesarios que refuercen los conocimientos teóricos, para así lograr una total comprensión de esta área de la ingeniería. Además la confrontación de los conocimientos teóricos con la práctica le dan al estudiante una visión más clara de los fenómenos y propiedades en que se basa la hidrodinámica de los fluidos.

El trabajo se fundamentó bajo ciertos elementos científicos con el objeto de conseguir resultados objetivos, se tuvieron presentes algunos autores que respaldan el proyecto entre otros: Streeter, Víctor y E., Sotelo. Gilberto, Gross. Richard y Hochstein John, entre otros. Los citados especialistas contribuyeron a darnos claridad sobre la mecánica de fluidos y especialmente sobre la hidrodinámica.

El trabajo se estructuró bajo el desarrollo de un marco teórico que divide el contenido en áreas temáticas determinantes en el proyecto. El banco se diseñara teniendo en cuenta el

comportamiento hidráulico de cada fenómeno y haciendo cumplir las recomendaciones de los autores anteriormente mencionados, ajustadas a las necesidades y materiales existentes en nuestro medio.

El proceso de elaboración del proyecto fue sistemático, por ello se llevo acabo por fases así: Primero, se realizó un diagnostico donde se identificó la necesidad de implementar nuevos instrumentos para el laboratorio de hidráulica, después se diseña y ejecuta la propuesta del banco de pruebas, con sus respectivos ensayos para posteriormente elaborar un manual de manejo para su utilización.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Fortalecer el proceso de práctica en el laboratorio de hidráulica del plantel mediante la construcción de un banco de pruebas para la medición de caudales, con el fin de obtener resultados objetivos y concretos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ♣ Mejorar el proceso enseñanza-aprendizaje de los principios de la mecánica de fluidos.

- ♣ Practicar el uso de los manómetros diferenciales en U y manómetros metálicos acoplados a los dispositivos y comprender su relación con el medidor.

- ♣ Entender los principios de funcionamiento en que se basan los dispositivos de medición empleados en este instrumento a partir del aumento de velocidad (energía cinética) y la caída de presión.

- ♣ Construir un banco de pruebas para la medición de caudales siguiendo unas especificaciones técnicas aportadas por diferentes autores, para así lograr un instrumento confiable para la experimentación de las propiedades en que se basa la hidrodinámica de los fluidos, y realizar una confrontación de los conceptos teóricos y prácticos.

2. MARCO TEORICO

2. 1 GENERALIDADES

Existen varias razones para utilizar sistemas de medición de flujo entre los cuales sobresalen el conteo, la evaluación del funcionamiento, la investigación y el control de procesos. Siempre que se esté trasladando un fluido, existe la necesidad de realizar un conteo de las cantidades involucradas.

En comercio, existen numerosos ejemplos de transferencia de custodia. El flujo de gasolina se mide conforme se bombea hacia el tanque de combustible de un automóvil. El gas natural que se emplea para cocinar y para calefacción se mide como se hace con el agua. En la industria, tanto la salida de materia prima como la del producto terminado debe supervisarse en forma continua para propósitos de conteo interno. En control de procesos, el éxito de una operación continua depende en gran medida de la medición y control del flujo.

2.2 DEFINICIÓN DE FLUIDO

Los fluidos son sustancias que fluyen, esto es, son materia en una forma tan fácil de distorsionar que no se puede decir que poseen una forma propia esto debido a su poca cohesión intermolecular¹. A diferencia de los sólidos, en los cuales un esfuerzo cortante dado produce un cambio de forma bien definido, en los fluidos aun el más pequeño esfuerzo cortante, aplicado por un tiempo suficientemente largo, producirá el cambio de forma que se desee.

Un fluido es una sustancia que se deforma continuamente cuando se le sujeta a un esfuerzo cortante, sin importar la magnitud de éste. Una fuerza cortante actúa tangencialmente a una superficie y al dividirse entre el área de la superficie, da como resultado el esfuerzo cortante medio sobre dicha área.

Por tanto, la propiedad mecánica fundamental de un fluido se refiere a que en un fluido en reposo no puede existir ningún esfuerzo cortante. Los líquidos son prácticamente incompresibles que a una presión y temperatura determinadas ocupan un volumen determinado. Introducido el líquido en un recipiente adopta la forma del mismo, pero llenando solo el volumen que le corresponde. Si sobre el líquido reina una presión uniforme, por ejemplo, la atmosférica, el líquido adopta una superficie libre plana, como la superficie de un lago o la de un cubo de agua.

¹ MATAIX, Claudio. Mecánica de fluidos y maquinas hidráulicas. 2. ed. México : HARLA, 1982. p.13.

2.3 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS

2.3.1 Densidad, se representa con la letra griega ρ (rho) y se define como la cantidad de masa por unidad de volumen de una sustancia, las unidades de densidad son kg/m^3 en el Sistema Internacional (SI) y slug/pie^3 en el Sistema Británico de Unidades.

2.3.2 Gravedad específica (S), la gravedad específica de una sustancia es la relación entre el peso de la sustancia y el peso de un volumen igual de agua en condiciones estándar (4°C ó 39.2°F). También se puede expresar como la relación de la densidad o del peso específico de la sustancia a la correspondiente densidad o peso específico del agua.

2.3.3 Peso específico, se representa con la letra griega γ (gamma) y se define como la cantidad de peso por unidad de volumen de una sustancia, las unidades del peso específico son los N/m^3 en el Sistema Internacional y lb/pie^3 en el Sistema Británico de Unidades.

2.3.4 Compresibilidad, se refiere al cambio de volumen v de una sustancia que está sujeta a un cambio de la presión que se ejerce sobre ella. La cantidad usada normalmente para medir este fenómeno es el módulo volumétrico de elasticidad o, simplemente, módulo volumétrico, E .

2.3.5 Viscosidad dinámica, se representa con la letra griega μ (miu). Cuando un fluido se mueve, se desarrolla en él una tensión de corte, cuya magnitud depende de la viscosidad del

fluido. La tensión de corte, denotada con la letra griega τ (tao), puede definirse como la fuerza requerida para deslizar una capa de área unitaria de una sustancia sobre otra capa de la misma sustancia. Así pues, τ es una fuerza dividida entre un área y puede medirse en unidades de N/m^2 o lb/pie^2 . En un fluido como el agua, el aceite o cualquier otro líquido común, encontramos que la magnitud de la tensión de corte es directamente proporcional al cambio de velocidad entre diferentes posiciones del fluido. En el SI pueden usarse las siguientes unidades N.s/ m^2 , Pa.s, kg/m.s .

2.3.6 Viscosidad cinemática, su símbolo es ν (ny) y se define como la razón de la viscosidad dinámica a la densidad del fluido. Algunas unidades usuales son: m^2/s , o stokes (cm^2/s).

2.4 CARACTERÍSTICAS DEL MOVIMIENTO DE LOS FLUIDOS

El movimiento de los fluidos se puede clasificar de muchas maneras, a continuación se describirán varios tipos de escurrimiento².

El flujo turbulento, es el que más se presenta en la práctica de la ingeniería. En él, las partículas de fluido se mueven siguiendo trayectorias muy irregulares y ocasionando la transferencia de cantidad de movimiento de una porción de fluido a otra.

² STREETER, Víctor. Mecánica de los fluidos. 8. ed. México : Mc Graw Hill, 1988. p.84-88.

Si se compara un flujo turbulento con uno no turbulento (laminar) en igualdad de condiciones, se encontrará que la turbulencia desarrolla esfuerzos cortantes mucho mayores en el fluido y ocasiona más pérdidas; además, en un fluido turbulento, las pérdidas varían con la primera potencia de la velocidad.

En un *flujo laminar*, las partículas de fluido se mueven a lo largo de trayectorias bastante regulares, dando la impresión de que se tratara de laminas o capas más o menos paralelas entre sí, deslizándose suavemente unas sobre otras. El flujo laminar está regido por la ley de la viscosidad de Newton, la cual establece la relación entre el esfuerzo cortante y la rapidez de deformación angular. En un flujo laminar, la acción de la viscosidad puede amortiguar cualquier tendencia turbulenta, si bien un flujo laminar resulta inestable en aquellas situaciones en que se combinen baja viscosidad, alta velocidad o conductos de grandes dimensiones, transformándose en un flujo turbulento.

Se considera que un *fluido ideal* es aquel fluido incomprensible y carente de fricción, el cual, no se debe confundir con un gas perfecto. Un fluido sin fricción resulta no viscoso y los procesos en que se tenga su escurrimiento son irreversibles.

Un *fluido real*, es aquel cuyo comportamiento es similar al que se presenta en la práctica, por lo tanto, será viscoso y gastará cierta cantidad de energía para vencer la resistencia que se opone al desplazamiento o sea la resistencia de rozamiento interno.

Un *fluido adiabático* es aquel en el cual no se tiene transferencia de calor hacia el fluido o desde él. El flujo adiabático reversible (adiabático sin fricción) se llama flujo isentrópico. Para analizar ordenadamente el escurrimiento de un fluido, es necesario entender claramente la terminología utilizada.

Un *flujo permanente* se caracteriza en que las condiciones en cualquier punto del escurrimiento no cambian con el tiempo; asimismo en cualquier punto de un flujo permanente, no existen cambios en la densidad, la presión o la temperatura con el tiempo. Debido al movimiento errático de las partículas de fluido, siempre existen pequeñas fluctuaciones en las propiedades de un fluido en un punto, cuando se tiene flujo turbulento, entonces la definición de flujo permanente debe generalizarse con el fin de tener en cuenta fluctuaciones.

Un *flujo es no permanente* cuando las condiciones en cualquier punto cambian con el tiempo. El agua que se bombea a través de un sistema fijo, con un gasto constante es un ejemplo de flujo permanente. Si el agua se bombea a través de un sistema fijo con un gasto que aumenta con el tiempo, se tiene entonces un flujo no permanente.

Un *flujo uniforme* ocurre cuando el vector velocidad en todos los puntos del escurrimiento es idéntico para un instante dado, o expresado matemáticamente, donde el tiempo se mantiene constante. La definición de flujo uniforme para un flujo real en un conducto abierto o cerrado, puede aplicarse en la mayoría de los casos, aun cuando el vector velocidad en las fronteras es siempre cero.

2.5 FLUJO DE FLUIDOS

2.5.1 Rapidez de flujo de fluido

La cantidad de flujo que fluye en un sistema por unidad de tiempo, se puede expresar mediante los tres términos que se define a continuación³:

Q : la rapidez de flujo de volumen es el volumen del flujo de fluido que pasa por una sección por unidad de tiempo.

W : la rapidez de flujo de peso es el peso de fluido que fluye por una sección por unidad de tiempo

M : la rapidez de flujo de masa es la masa de fluido que fluye por una sección por unidad de tiempo

El más importante de estos tres términos es la rapidez de flujo de volumen, Q, que se calcula con la ecuación: $Q = A \cdot v$ Ec.(1) en donde A es el área de la sección y v es la velocidad promedio del flujo.

La rapidez de flujo de peso, W, está relacionada con Q mediante la ecuación $W = \gamma * Q$ Ec.(2) en la que γ es el peso específico del fluido.

³ MOTT, Robert. Mecánica de fluidos aplicada. 4. ed. México : Prentice Hall, 1990. p.146-161.

La rapidez de flujo de masa, M , está relacionada con Q mediante la ecuación $M = \rho * Q$ Ec.(3) en la que ρ es la densidad del fluido.

2.5.2 Ecuación de continuidad

El método para calcular la velocidad de flujo de un fluido en un sistema de conducto cerrado, depende del principio de continuidad. Considere la figura 1. un fluido fluye de la sección 1 a la sección 2 con una rapidez constante. Esto es la cantidad de fluido que pasa por cualquier sección en un cierto tiempo dado es constante. En este caso se dice que se tiene un flujo constante. Ahora bien, si no se agrega fluido, se almacena o se retira entre la sección 1 y la sección 2, entonces la masa de fluido que pasa por la sección 2 en un tiempo dado, debe ser la misma que la que fluye por la sección 1, en el mismo tiempo. Lo anterior se puede expresar en términos de la rapidez de flujo de masa como: $M_1 = M_2$ o, puesto que $M = \rho * A * v$, tenemos:

$$\rho_1 * A_1 * v_1 = \rho_2 * A_2 * v_2 \quad \text{Ec.(4)}$$

esta ecuación es un planteamiento matemático del principio de continuidad y se le conoce como ecuación de continuidad. Se utiliza para relacionar la densidad del fluido, el área de flujo y la velocidad de flujo en dos secciones de un sistema en el que existe un flujo estable. Es válida para todos los fluidos, ya sean gases o líquidos.

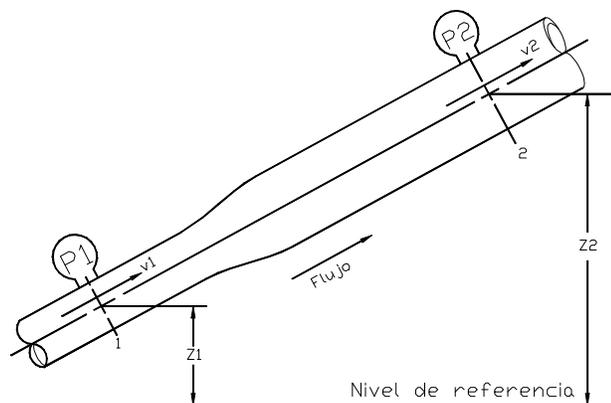
Si el fluido que se encuentra en el tubo de la figura 1 es un líquido que puede ser considerado incompresible, entonces los términos ρ_1 y ρ_2 de la ecuación 4 son iguales. La ecuación, entonces, queda:

$$A_1 * v_1 = A_2 * v_2 \quad \text{Ec.(5)}$$

o, puesto que $Q = A * v$, tenemos: $Q_1 = Q_2$

la ecuación 5 es la ecuación de continuidad aplicada a líquidos; establece que para un flujo estable, la rapidez de flujo de volumen es la misma en cualquier sección.

Figura 1. Sistema de distribución de fluido



2.5.3 Velocidad de flujo recomendada en tuberías

Los factores que afectan la elección de una velocidad de flujo satisfactoria en los sistemas de fluidos son numerosos. Algunos de los más importantes son el tipo de fluido, la longitud

del sistema de flujo, el tipo de conducto o de tubo, la caída de presión que se puede tolerar, los dispositivos (como bombas, válvulas, etc.), que se pueden conectar al conducto o a la tubería, la temperatura, la presión y el ruido. Según el análisis de la ecuación de continuidad se deduce que la velocidad de flujo aumenta a medida que disminuye el área de la trayectoria del flujo. Por consiguiente, los tubos más pequeños producirán altas velocidades, y, al contrario, los tubos más grandes proporcionaran bajas velocidades. Además las pérdidas de energía y las correspondientes caídas de presión aumentan drásticamente a medida que aumenta la velocidad de flujo. Es por esta razón que se hace deseable mantener las velocidades bajas. Pero, debido a que los tubos y los conductos grandes son más costosos, es necesario establecer algunas limitaciones.

Una velocidad de flujo razonable para sistemas de distribución de fluido es de aproximadamente 3 m/s. Esto se puede aplicar a agua, aceite y otros líquidos de uso común en conductos.

2.6 ECUACIÓN DE BERNOULLI

La ley de la conservación de la energía nos dice que la energía no puede ser creada ni destruida, sino que puede ser transformada de un tipo a otro.

Cuando se analizan problemas de flujo en conductos, existen tres formas de energía que siempre hay que tomar en consideración. Tome un elemento de fluido, como el que se muestra en la figura 2, que puede estar dentro de un conducto de un sistema de flujo. Puede

estar localizado a una cierta elevación Z , tener una cierta velocidad v y una presión p . El elemento de fluido tendrá las siguientes formas de energía:

1. Energía potencial. Debido a su elevación, la energía potencial del elemento con respecto de algún nivel de referencia es:

$$PE = w \cdot z. \quad \text{Ec.(6)}$$

en la que w . es el peso del elemento.

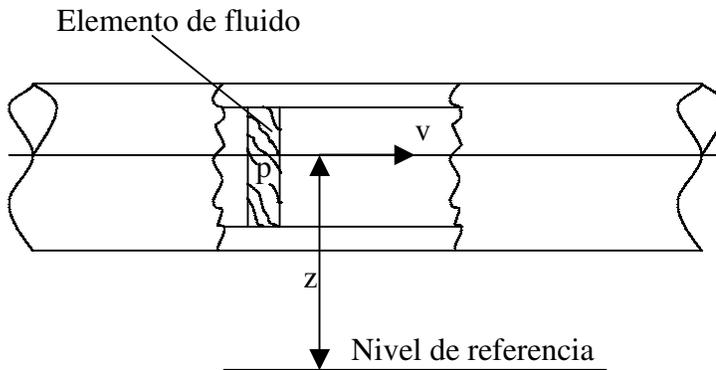
2. Energía cinética. Debido a su velocidad, la energía cinética del elemento es:

$$K.E = w \cdot v^2 / 2g \quad \text{Ec.(7)}$$

3. Energía de flujo. En ocasiones conocida como energía de presión o trabajo de flujo, ésta representa la cantidad de trabajo necesario para mover el elemento de fluido a través de una cierta sección en contra de la presión p . La energía de flujo se abrevia FE y se calcula a partir de la ecuación:

$$FE = w \cdot p / \gamma \quad \text{Ec.(8)}$$

Figura 2. Elemento de fluido en un conducto



La ecuación 8 puede ser derivada de la manera siguiente. En la figura 3 se muestra en el elemento de fluido en el conducto que se traslada a través de una sección. La fuerza que actúa sobre el elemento es pA , en la que p es la presión en la sección y A es su área. Al trasladar el elemento través de la sección, la fuerza se mueve una distancia L igual a la longitud del elemento. En consecuencia, el trabajo hecho es:

$$\text{trabajo} = pA L = pV$$

en donde v es el volumen del elemento. El peso del elemento, w , es:

$$w = \gamma.V$$

en la que γ es el peso específico del fluido. Entonces, el volumen del elemento es:

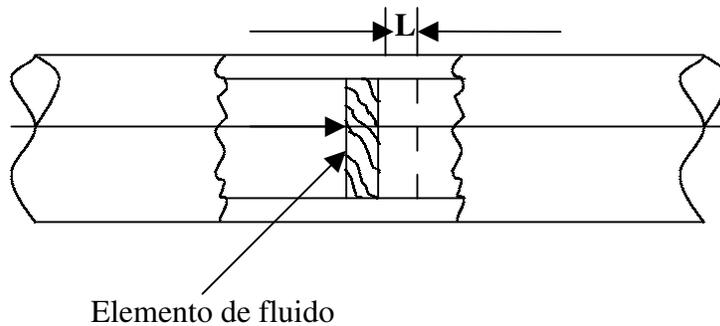
$$V = w/\gamma$$

y tenemos:

$$\text{trabajo} = p V = p w / \gamma$$

al cual se le llama energía de flujo en la ecuación 8.

Figura 3. Energía de flujo



La cantidad total de energía de estas tres formas que posee el elemento de fluido será la suma, representada con E:

$$E = FE + PE + KE$$

$$E = wp/\gamma + wz + wv^2/2g$$

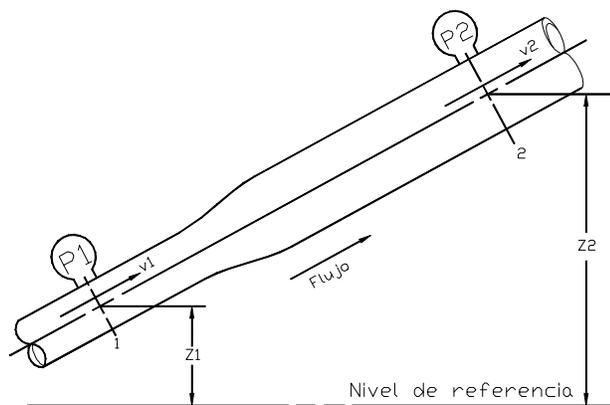
Consideraré ahora el elemento de fluido de la figura, que se mueve de la sección 1 a la sección 2. Los valores de p, z y v son diferentes en las dos secciones. En la sección 1, la energía total es:

$$E_1 = \frac{w p_1}{\gamma} + w z_1 + \frac{w v_1^2}{2g}$$

En la sección 2, la energía total es:

$$E_2 = \frac{w p_2}{\gamma} + w z_2 + \frac{w v_2^2}{2g}$$

Figura 4. Elementos de fluido utilizados en la ecuación de Bernoulli



Si no se agrega energía al fluido o se pierde entre las secciones 1 y 2, entonces el principio de conservación de la energía requiere que:

$$E_1 = E_2$$

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

El peso del elemento, w , es común a todos los términos y se puede cancelar en la ecuación, entonces, se convierte en:

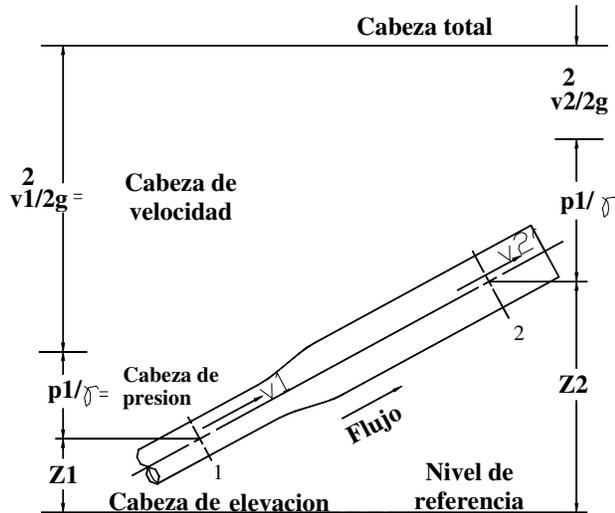
$$\frac{p_1}{\gamma} + z_1 + \frac{v_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} + z_2 + \frac{v_2^2}{2g} \quad \text{Ec.(9)}$$

A ésta se le conoce como ecuación de Bernoulli.

2.6.1 Interpretación de la ecuación de Bernoulli

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. Los términos de la ecuación de Bernoulli se conocen, a menudo, como "cabezas", refiriéndose a una altura por encima de un nivel de referencia. El término p/γ se conoce como cabeza de presión; a z se le llama cabeza de elevación; y al término $v^2/2g$ se le conoce como cabeza de velocidad. La suma de las tres se conoce como cabeza total. Debido a que cada término representa una altura, un diagrama parecido al que se presenta en la figura 5, es de utilidad para visualizar la relación entre los tres tipos de energía. Observe que, debido a la suposición de que no se pierde o se agrega energía, la cabeza total permanece a un nivel constante. Entonces, la altura relativa de cada término de cabeza varía según lo establecido por la ecuación de Bernoulli.

Figura 5. Cabezas de presión, elevación, velocidad y total



En la figura 5 se verá que la cabeza de velocidad en la sección 2 será menor que en la sección. Esto se puede mostrar mediante la ecuación de continuidad,

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

$$v_2 = v_1 (A_1 / A_2)$$

Puesto que $A_1 < A_2$, v_2 debe ser menor que v_1 . Y como la velocidad está al cuadrado en el término correspondiente a la cabeza de velocidad, $v_2^2/2g$ es mucho menor que $v_1^2/2g$.

Típicamente, cuando el tamaño de la sección se expande como lo hace en la figura 5, la cabeza de presión aumenta debido a que disminuye la cabeza de velocidad. Ésta es la forma

en que se construyó la figura 5. Sin embargo, el cambio real también se ve afectado por el cambio en la cabeza de elevación.

En suma, la ecuación de Bernoulli explica el cambio en las cabezas de elevación, de presión y de velocidad entre dos puntos en un sistema de flujo de fluido. Se supone que no existen pérdidas o ganancias de energía entre los dos puntos, de modo que la cabeza total permanece constante.

Cuando se escribe la ecuación de Bernoulli, es esencial que la presión en los dos puntos de referencia se expresen ambas como presiones absolutas o como presiones manométricas. Es decir, deben tener las dos la misma presión de referencia. En la mayoría de los problemas será conveniente utilizar la presión manométrica, pues partes del sistema de fluido expuestas a la atmósfera tendrán entonces presión cero. Se tiene también que la mayoría de las presiones son medidas con un manómetro con respecto a la presión atmosférica local.

Aunque la ecuación de Bernoulli es aplicable a una gran cantidad de problemas prácticos, existen algunas limitaciones que deben tenerse en cuenta con el fin de aplicar la ecuación de manera correcta.

1. Es válida solamente para fluidos incomprensibles, puesto que el peso específico del fluido se tomó como el mismo en las dos secciones de interés.

2. No puede haber dispositivos mecánicos entre las dos secciones de interés que pudieran agregar o eliminar energía del sistema, ya que la ecuación establece que la energía total del fluido es constante.

3. No puede haber transferencia de calor hacia dentro o fuera del fluido.

4. No puede haber pérdidas de energía debido a la fricción.

En realidad, ningún sistema satisface todas estas restricciones. Sin embargo, existen muchos sistemas para los cuales solamente se tendrá un error despreciable cuando se les aplica la ecuación de Bernoulli. Por otro lado, el uso de tal ecuación puede permitir una rápida estimación de un resultado, cuando eso es todo lo que se necesita.

2.6.2 Aplicación de la ecuación de Bernoulli

Para la aplicación de la ecuación de Bernoulli, se recomienda seguir los siguientes pasos:

1. Determine que elementos son conocidos y qué se va a encontrar.

2. Decida cuáles dos secciones del sistema se utilizarán cuando se escribe la ecuación de Bernoulli. Se escoge una sección de la cual se conocen muchos datos. La segunda es, por lo general, la sección en la cual se debe calcular algo.

3. Escriba la ecuación de Bernoulli para las dos secciones elegidas en el sistema. Es importante que la ecuación se escriba en la dirección del flujo. Es decir, el flujo debe ir de la sección de la parte izquierda de la ecuación a la de la parte derecha.
4. Simplifique la ecuación, si es posible, mediante la cancelación de los términos cuyo valor es cero o de aquellos que son los mismos en ambos lados de la ecuación.
5. Resuelva la ecuación algebraicamente para el término deseado.
6. Sustituya las cantidades conocidas y calcule el resultado, tome la precaución de asegurar el uso de unidades consistentes a lo largo del cálculo.

2.7 NUMERO DE REYNOLDS

2.7.1 Flujo laminar y flujo turbulento

Número de Reynolds, número adimensional que se utiliza en la mecánica de fluidos para estudiar el movimiento de un fluido en el interior de una tubería, o alrededor de un obstáculo sólido. Se representa por N_R .

Cuando analizamos un fluido en una corriente de flujo, es importante ser capaces de determinar el carácter del flujo⁴. En algunas condiciones, el fluido parecerá que fluye en capas, de una manera uniforme y regular. Se puede observar este fenómeno cuando se abre un grifo de agua lentamente, hasta que el chorro es uniforme y estable. A este tipo de flujo se conoce como *flujo laminar*. Si se abre más el grifo, permitiendo que aumente la velocidad del flujo, se alcanzaría un punto en el que el flujo ya no es uniforme ni regular. El agua del chorro parecerá que se mueve de una manera bastante caótica. Al flujo, entonces, se le conoce como *flujo turbulento*.

El número de Reynolds puede ser calculado para cada conducción recorrida por un determinado fluido y es el producto de la velocidad, la densidad del fluido y el diámetro de la tubería dividido entre la viscosidad del fluido. Para un mismo valor de este número el flujo posee idénticas características cualquiera que sea la tubería o el fluido que circule por ella.

De acuerdo con la expresión del número de Reynolds, cuanto más elevada sea la viscosidad de un fluido mayor podrá ser el diámetro de la tubería sin que el flujo deje de ser laminar, puesto que las densidades de los líquidos son casi todas del mismo orden de magnitud. Un flujo laminar se define como aquel en que el fluido se mueve en capas o láminas, deslizándose suavemente unas sobre otras y existiendo sólo intercambio de cantidad de movimiento molecular entre ellas. Cualquier tendencia hacia la inestabilidad y la turbulencia se amortigua por la acción de las fuerzas cortantes viscosas que se oponen al

⁴

STREETER, Víctor. Mecánica de los fluidos. 8. ed. México : Mc Graw Hill, 1988. p.188-192.

movimiento relativo de capas de fluido adyacentes entre sí. Por otro lado, en un flujo turbulento, el movimiento de las partículas es muy errático y se tiene un intercambio transversal de cantidad de movimiento muy intenso. El número de Reynolds permite caracterizar la naturaleza del escurrimiento, es decir, si se trata de un flujo laminar o de un flujo turbulento; además, indica, la importancia relativa de la tendencia del flujo hacia un régimen turbulento respecto de uno laminar y la posición relativa de este estado de cosas a lo largo de determinada longitud.

La naturaleza de determinado flujo incompresible se puede caracterizar mediante su número de Reynolds. Para valores grandes de N_R , uno o todos los factores en el numerador resultan grandes, comparados con el denominador. Esto implica una gran expansión en el conducto del fluido, una velocidad alta, una gran densidad, una viscosidad extremadamente pequeña o combinaciones de estos extremos. Los términos en el numerador se relacionan con las fuerzas de inercia, es decir, fuerzas debidas a la aceleración o desaceleración del fluido. El término en el denominador es la causa de las fuerzas cortantes viscosas. De esta manera, también se puede considerar al número de Reynolds como el cociente de las fuerzas de inercia entre las fuerzas viscosas. Un número de Reynolds grande indica que el flujo es altamente turbulento con las pérdidas proporcionales al cuadrado de la velocidad. La turbulencia puede ser de escala pequeña, caracterizada por remolinos muy pequeños, los cuales convierten rápidamente energía mecánica en irreversibilidades a través de la acción viscosa; o puede ser de escala grande, como en el caso de los remolinos más o menos definidos que se forman en los ríos o en la zona de la atmósfera en inmediato contacto con la superficie de la tierra. Los grandes remolinos generan remolinos más pequeños, los

cuales a su vez dan lugar a la turbulencia de escala pequeña. Se puede imaginar al flujo turbulento como un flujo regular, posiblemente uniforme, en el cual se tuviera sobre impuesto un flujo secundario. En la turbulencia de escala pequeña se tienen fluctuaciones de velocidad que se caracterizan por una frecuencia alta; la raíz media cuadrada de estas fluctuaciones y la frecuencia de cambio de su signo son medidas cuantitativas de la turbulencia. En general, la intensidad de la turbulencia aumenta conforme lo hace el número de Reynolds.

Para valores intermedios de N_R , tanto los efectos viscosos como los inerciales son de importancia y los cambios en la viscosidad afectan a la distribución de las velocidades y a la resistencia al flujo.

El comportamiento de un fluido⁵, particularmente con respecto a las pérdidas de energía, depende bastante de si el flujo es laminar o turbulento. Por esta razón se necesita tener medios para predecir el tipo de flujo sin tener necesidad de observarlo. En efecto, la observación directa es imposible para fluidos que se encuentran en conductos opacos. Se puede mostrar experimentalmente y verificar analíticamente que el carácter del flujo en un conducto redondo depende de cuatro variables: la densidad del fluido, ρ , la viscosidad del fluido, μ , el diámetro del conducto, D , y la velocidad promedio del flujo, v . Reynolds fue el primero en demostrar que un flujo laminar o turbulento puede ser predicho si se conoce la magnitud de un número adimensional, conocido ahora como número de Reynolds (N_R).

⁵

MOTT, Robert. Mecánica de fluidos aplicada. 4. ed. México : Prentice Hall, 1990. p.221-224.

La ecuación 10 muestra la definición básica del Número de Reynolds.

$$N_R = \frac{\rho D v}{\mu} = \frac{v D}{\nu} \quad \text{Ec.(10)}$$

Estas dos formas de la ecuación son equivalentes, puesto que $\nu = \mu/\rho$.

El número de Reynolds es el cociente de la fuerza de inercia sobre un elemento de fluido, entre la fuerza viscosa. La fuerza inercia se deriva de la segunda ley de Newton del movimiento, $F = m.a$, la fuerza viscosa está relacionada con el producto de la tensión de corte por el área.

Los flujos que tienen un número de Reynolds grande, típicamente debido a una alta velocidad o a una baja viscosidad, o a ambas, tienden a ser turbulentos. Aquellos fluidos que poseen una alta viscosidad y/o que se mueven a grandes velocidades tendrán un número de Reynolds pequeño y tenderán a ser laminares.

2.7.2 Números de Reynolds críticos

Para aplicaciones prácticas en flujos de conductos, tenemos que si el número de Reynolds para el flujo es menor que 2000, el flujo será laminar. Tenemos también que si el número de Reynolds es mayor que 4000, se puede suponer que el flujo es turbulento. En el intervalo de número de Reynolds comprendido entre 2000 y 4000, es imposible predecir que tipo de flujo existe; por consiguiente, este intervalo se conoce como región crítica. Las aplicaciones

típicas involucran flujos que se encuentran bien colocados en el intervalo de los flujos laminares o en el intervalo de los flujos turbulentos, de modo que la existencia de esta región de incertidumbre no ocasiona gran dificultad.

Si se encuentra que el flujo de un sistema está en la región crítica, la práctica normal consiste en cambiar la rapidez de flujo o el diámetro del conducto para hacer que el flujo sea claramente laminar o turbulento. Entonces se hace posible un análisis más preciso.

Mediante una cuidadosa minimización de las perturbaciones externas, es posible mantener un flujo laminar para números de Reynolds hasta de 50,000. Sin embargo, cuando N_R es mayor que aproximadamente 4000, una perturbación menor de la corriente de flujo ocasionaría un cambio súbito en el flujo de laminar a turbulento.

2.8 FLUJO EN TUBERÍAS

Las irreversibilidades en un flujo incompresible permanente a través de un tubo se expresan mediante las pérdidas de carga o por medio de la caída de la línea de cargas piezométricas⁶. Esta línea se encuentra a una distancia ρ/γ por encima del centro del tubo y si z es la elevación del centro de la tubería, entonces $z + \rho/\gamma$ es la elevación de un punto cualquiera sobre la línea de cargas piezométricas. De esta manera, los valores de $z + \rho/\gamma$ a lo largo de

⁶ STREETER, Víctor. Mecánica de los fluidos. 8. ed. México : Mc Graw Hill, 1988. p.108-109.

la tubería localizan a la línea de cargas piezométricas. Las pérdidas o irreversibilidades ocasionan que esta línea vaya cayendo en la dirección del flujo.

La ecuación de Darcy-Weisbach :

$$hf = f \frac{L V^2}{D 2g}$$

Se emplea generalmente en cálculos de flujo en tuberías. hf es la pérdida de carga, o caída en la línea de cargas piezométricas, a lo largo de la longitud L de la tubería de diámetro D y con velocidad promedio V . Las dimensiones de hf son de longitud, expresándose en términos de libras por pie sobre libra o newtons por metro sobre newtons. El factor de fricción f es el factor adimensional necesario para que la ecuación produzca el correcto valor de las pérdidas. Todas las cantidades en la ecuación anterior, excepto f , se pueden determinar experimentalmente. Existen aparatos para efectuar estas mediciones: midiendo el gasto y el diámetro interior, se puede calcular la velocidad, y las pérdidas de carga hf se miden mediante un manómetro diferencial colocado entre las secciones 1 y 2, las cuales se encuentran separadas una distancia L entre sí, los experimentos indican que para flujo turbulento, las pérdidas de carga:

- Varían directamente con la longitud de la tubería;
- Varían aproximadamente con el cuadrado de la velocidad;
- Varían aproximadamente con el inverso del diámetro;
- Dependen de la rugosidad de la superficie interior del tubo;

- Dependen de las propiedades de densidad y viscosidad del fluido;
- Son independientes de la presión.

2.9 PÉRDIDAS MENORES

2.9.1 Líneas de cargas totales y de cargas piezométricas

Los conceptos de línea de cargas totales y línea de cargas piezométricas son de utilidad en el análisis de problemas de tuberías. Si en cada punto a lo largo de un sistema de tuberías se determina el término ρ/γ y se dibuja como una distancia vertical por encima del centro del tubo, se obtiene el lugar geométrico llamado línea de cargas piezométricas. De manera más general, si se considera los dos términos $\rho/\gamma + z$ el escurrimiento para ordenadas contra la longitud del tubo como abscisa, se obtendrá la línea de cargas piezométricas. Esta línea es el lugar geométrico de las alturas hasta las cuales accedería el líquido, en los tubos verticales de vidrio que se conectaran a diferentes aberturas piezométricas a lo largo del tubo. Cuando la presión en el tubo es menor que la atmosférica, ρ/γ es negativa y la línea de cargas piezométricas se encuentra debajo de la tubería.

La línea de cargas totales es una línea que une todos los puntos cuya ordenada es la energía disponible en libras pie sobre libra para cada punto a lo largo de la tubería, considerando a la longitud del tubo como abscisa, es decir constituye la representación gráfica de la suma

$$\frac{V^2}{2g} + \frac{\rho}{\gamma} + z$$

para cada punto a lo largo de la tubería. Por definición, la línea de cargas totales se encuentra siempre a una distancia vertical de $V^2/2g$ por encima de la línea de cargas piezométricas, despreciando el factor de corrección de la energía cinética.

2.9.2 Fuentes de pérdidas menores

En la mayor parte de los sistemas de flujo, la pérdida de energía primaria se debe a la fricción de conducto⁷. Los demás tipos de pérdidas generalmente son pequeñas en comparación, y por consiguiente se hace referencia a ellas como pérdidas menores. Las pérdidas menores ocurren cuando hay un cambio en la sección cruzada de la trayectoria del flujo o en la dirección de flujo, o cuando la trayectoria de flujo se encuentra obstruida, como sucede con una válvula. La energía se pierde bajo estas condiciones debido a fenómenos físicos bastante complejos. La predicción teórica de la magnitud de estas pérdidas también es compleja, y por tanto, normalmente se usan los datos experimentales.

2.9.3 Coeficiente de resistencia

Las pérdidas de energía son proporcionales a la cabeza de velocidad del fluido al fluir este alrededor de un codo, a través de una dilatación o contracción de la sección de flujo, o a través de una válvula. Los valores experimentales de pérdidas de energía generalmente se reportan en términos de un coeficiente de resistencia, K , de la siguiente forma:

⁷

MOTT, Robert. Mecánica de fluidos aplicada. 4. ed. México : Prentice Hall, 1990. p.167-278.

$$h_L = K (v^2/2g) \quad \text{Ec.(11)}$$

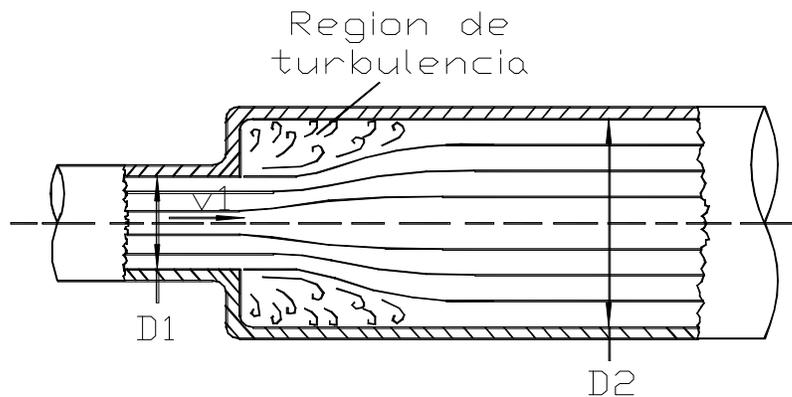
En la ecuación 11, h_L es la pérdida menor, K , es el coeficiente de resistencia y v es la velocidad de flujo promedio en el conducto en la vecindad donde se presenta la pérdida menor. En algunos casos, puede haber más de una velocidad de flujo, como con las dilataciones o en las contracciones.

La magnitud de coeficiente de resistencia depende de la geometría del dispositivo que ocasiona la pérdida y algunas veces depende de la velocidad de flujo.

2.9.4 Dilatación súbita

Al fluir un fluido de un conducto menor a uno mayor a través de una dilatación súbita, su velocidad disminuye abruptamente, ocasionando una turbulencia que genera una pérdida de energía (figura 6). La cantidad de turbulencia, y por consiguiente, la cantidad de pérdida de energía, depende del cociente de los tamaños de los dos conductos.

Figura 6. Dilatación súbita



La pérdida menor se calcula de la ecuación:

$$h_L = K (v_1^2/2g) \quad \text{Ec.(12)}$$

Donde v_1 es la velocidad de flujo promedio en el conducto menor que está delante de la dilatación. Las pruebas han demostrado que el valor del coeficiente de pérdida K depende tanto de la proporción de los tamaños de los dos conductos como de la magnitud de la velocidad de flujo.

Al hacer ciertas suposiciones de simplificación respecto del carácter de la corriente de flujo al expandirse a través de una dilatación súbita, es posible predecir analíticamente el valor de K a partir de la siguiente ecuación:

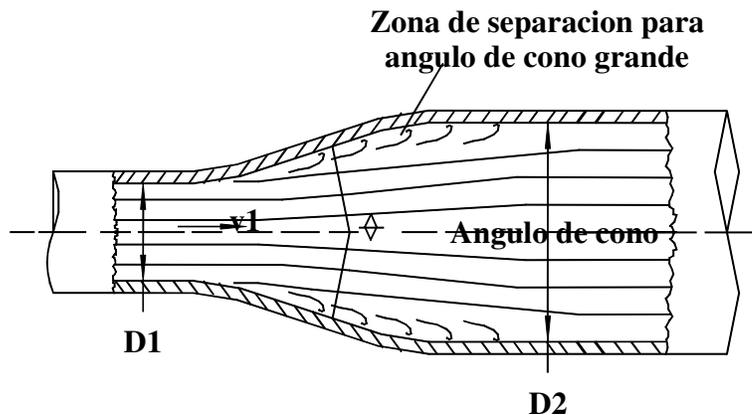
$$K = [1 - (A_1/A_2)]^2 = [1 - (D_1/D_2)^2]^2 \quad \text{Ec.(13)}$$

Los subíndices 1 y 2 se refieren a las secciones menores y mayores, respectivamente como se muestra en la figura 6. Los valores para K de esta ecuación concuerdan con los datos experimentales cuando la velocidad v_1 es aproximadamente 1.2 m/s. A velocidades mayores, los valores reales de K son menores que los valores teóricos. Se recomienda que se usen los valores experimentales si se conoce la velocidad de flujo.

2.9.5 Dilatación gradual

Si la transición de un conducto menor a uno mayor puede hacerse menos abrupta que la dilatación súbita de bordes cuadrados, la pérdida de energía se reduce. Esto normalmente se hace colocando una sección cónica entre los dos conductos, se muestra en la figura 7. Las paredes en pendiente del cono tienden a guiar el fluido durante la desaceleración y expansión de la corriente de flujo.

Figura 7. Dilatación gradual



La pérdida de energía para una dilatación gradual se calcula a partir de:

$$h_L = K (v_1^2/2g)$$

Donde v_1 es la velocidad del conducto menor que está adelante de la dilatación. La magnitud de K depende tanto de la proporción de diámetro D_2/D_1 como del ángulo de cono θ . En la tabla serán varios valores de θ y D_2/D_1 .

Cuadro 1. Coeficiente de resistencia- dilatación gradual

D_2/D_1	Ángulo del cono, θ											
	2°	6°	10°	15°	20°	25°	30°	35°	40°	45°	50°	60°
1.1	0.01	0.01	0.03	0.05	0.10	0.13	0.16	0.18	0.19	0.20	0.21	0.23
1.2	0.02	0.02	0.04	0.09	0.16	0.21	0.25	0.29	0.31	0.33	0.35	0.37
1.4	0.02	0.03	0.06	0.12	0.23	0.30	0.36	0.41	0.44	0.47	0.50	0.53
1.6	0.03	0.04	0.07	0.14	0.26	0.35	0.42	0.47	0.51	0.54	0.57	0.61
1.8	0.03	0.04	0.07	0.15	0.28	0.37	0.44	0.50	0.54	0.58	0.61	0.65
2.0	0.03	0.04	0.07	0.16	0.29	0.38	0.46	0.52	0.56	0.60	0.63	0.68
2.5	0.03	0.04	0.08	0.16	0.30	0.39	0.48	0.54	0.58	0.62	0.65	0.70
3.0	0.03	0.04	0.08	0.16	0.31	0.40	0.48	0.55	0.59	0.63	0.66	0.71
∞	0.03	0.05	0.08	0.16	0.31	0.40	0.49	0.56	0.60	0.64	0.67	0.72

Fuente: Handbook of Hydraulics: KING, H.W. 1963, Tabla 6-8.

La pérdida de energía calculada de la ecuación no incluye las pérdidas debido a la fricción en las paredes de la transición. Para ángulos relativamente empinados, la longitud de la transición es corta y por lo tanto, la pérdida de sección de la pared es despreciable. Sin embargo, al disminuir el ángulo del cono, la longitud de la transición se incrementa y la fricción de la pared se hace significativa. Tomando en cuenta tanto la pérdida de fricción de

la pared, las pérdidas debido a la dilatación, podemos obtener la pérdida de energía mínima con un ángulo del cono de aproximadamente 7° .

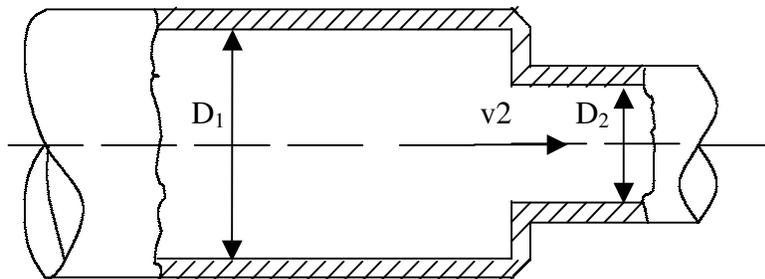
2.9.6 Contracción súbita

La pérdida de energía debido a una contracción súbita, como se muestra en la figura 8, se calcula a partir de:

$$h_L = K (v_2^2/2g) \quad \text{Ec.(14)}$$

Donde v_2 es la velocidad en la corriente hacia abajo del conducto menor a partir de la contracción. El coeficiente de resistencia K depende de la proporción de los tamaños de los dos conductos y de la velocidad de flujo.

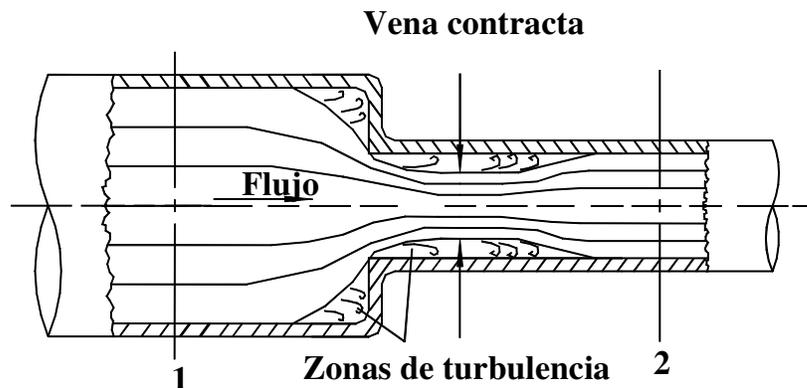
Figura 8. Contracción súbita



El mecanismo mediante el cual se pierde energía debido a una contracción súbita es bastante complejo. La figura 9 ilustra lo que sucede al converger la corriente de flujo. Las

líneas de la figura representan las trayectorias de las diversas partes de la corriente de flujo llamadas líneas de trayectoria. Al aproximarse las líneas de trayectoria a la contracción, asumen una trayectoria curva y la corriente total continua estrechándose durante cierta distancia más allá de la contracción. Por lo tanto, la sección de cruce mínimo del flujo es menor que la del conducto menor. La sección donde ocurre esta área de flujo mínimo se denomina vena contracta. Más allá de la vena contracta, la corriente de flujo debe desacelerar y dilatarse nuevamente para llenar el conducto. La turbulencia ocasionada por la contracción y la posterior dilatación genera la pérdida de energía.

Figura 9. Vena contracta formada en una contracción súbita

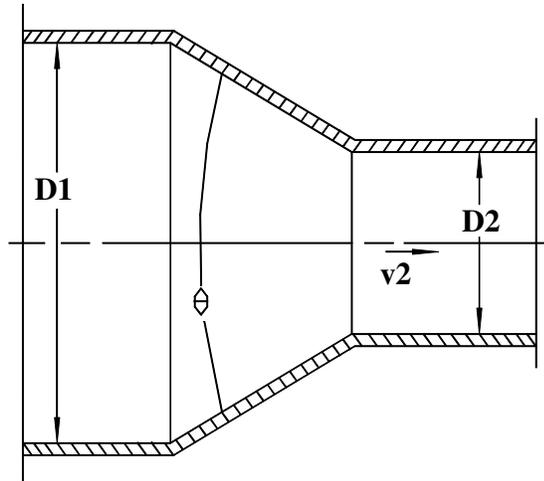


2.9.7 Contracción gradual

La pérdida de energía en una contracción puede disminuirse sustancialmente haciendo la contracción más gradual. La figura 10 muestra una contracción de este tipo, formada

mediante una sección cónica entre los dos diámetros con cambios abruptos en las uniones. El ángulo θ se denomina el ángulo del cono.

Figura 10. Contracción gradual



La pérdida de energía se calcula a partir de la ecuación 14, donde el coeficiente de resistencia se basa en la cabeza de velocidad en el conducto menor después de la contracción.

Al disminuir el ángulo de cono de la contracción por debajo de 15 grados, el coeficiente de resistencia de hecho se incrementa. La razón es que los datos incluyen los efectos tanto de la turbulencia local ocasionada por la separación del flujo como de la fricción del conducto. Para los ángulos de cono menores, la transición entre los dos diámetros es muy larga, lo que incrementa la pérdida de fricción. El redondeo del extremo de la transición cónica para juntarla con el conducto menor puede disminuir el coeficiente de resistencia.

2.10 MEDICIÓN DE PRESIÓN

Según Mott⁸, la presión en un punto se define como el cociente de la fuerza perpendicular entre el área, conforme ésta última se aproxima a una área pequeña que circunscriba al punto. La presión tiene unidades de fuerza entre área. La presión también se puede expresar como una altura de columna equivalente de algún fluido; una presión que se expresa de esta manera se refiere a la fuerza por unidad de área que actúa sobre la base de una columna.

La presión suele medirse en atmósferas (atm). En el sistema internacional de unidades (SI). La presión se expresa en Newtons por metro cuadrado: un Newton por metro cuadrado es un Pascal (Pa). La atmósfera se define como 101.325 Pa. y equivale a 760mm de mercurio en un barómetro convencional. Medir la presión que ejercen los fluidos es muy frecuente. Tanto en laboratorios, salas de máquinas, industrias, controles de seguridad, etc. de ahí su importancia.

Existen tres tipos de presiones:

Presión absoluta: se mide con relación al vacío o cero absoluto.

Presión relativa: se mide con relación a la presión atmosférica y se llama manométrica.

$$P_m = P_{abs} - P_{atm}$$

Presión atmosférica local, es la que da el barómetro en el lugar de medición. Esta presión disminuye con la altitud del lugar.

⁸ MOTT, Robert. Mecánica de fluidos aplicada. 4. ed. México : Prentice Hall, 1990. p.43-45.

2.10.1 Rangos de presión

Las presiones pueden variar desde 10^{-8} y 10^{-2} mm de mercurio de presión absoluta en aplicaciones de alto vacío. Hasta miles de atmósferas en prensas y controles hidráulicos. Con fines experimentales se han obtenido presiones del orden de millones de atmósferas.

En la atmósfera, el peso cada vez menor de la columna de aire a medida que aumenta la altitud, hace que disminuya la presión atmosférica local. Así, la presión baja desde su valor de 101.325 Pa a nivel del mar, a una latitud de 40° , hasta unos 2.350 Pa a 10.700m (35.000 pies).

2.10.2 Instrumentos de medida

Existen muchas formas de medir la presión en un fluido y la mayoría de los medidores miden la diferencia entre la presión de un fluido y la presión atmosférica local.

- ♣ Tubos piezométricos: son tubos transparentes de cristal o plástico. Rectos o con codo de 90 grados. De diámetro entre 1cm y 3cm y de longitud adecuada para que el líquido pueda subir sin llegar a rebosarse. Para reducir los errores por tensión capilar y evitar correcciones por menisco, el diámetro del tubo debe ser como mínimo de 1.2 cm. El agujero de conexión entre el tubo piezométrico y el de la tubería debe ser pequeño, preferiblemente no mayor de 3mm de diámetro, para evitar la influencia de la tensión superficial. El tubo se conecta al recipiente en que se quiere medir la presión y se utiliza

para apreciar presiones relativas, o manométricas pequeñas y positivas. La altura del líquido en el tubo da directamente el valor de la altura de presión.

- ♣ Manómetro simple: el manómetro simple o manómetro de mercurio en U, es un dispositivo más conveniente para la medición de presiones que el piezómetro común ya que este último no permite medir presiones altas y ni se puede utilizar con gases.

Aunque el mercurio se utiliza habitualmente como el fluido de medida en el manómetro simple, se pueden utilizar también otros líquidos (Tetra cloruro de carbono, por ejemplo). Cuando la densidad relativa del fluido de medida se acerca a la del fluido cuya presión se pretende medir, la lectura aumenta para una presión cualquiera aumentando de esta manera la precisión del aparato, siempre y cuando se conozca exactamente las densidades relativas.

- ♣ Manómetros diferenciales: se usan cuando interesa medir solamente la diferencia entre dos presiones. En este caso la densidad del fluido de medida es mayor que la del fluido cuya diferencia de presión se pretende medir.
- ♣ Manómetros metálicos: miden la presión relativa o el vacío respecto a la presión atmosférica. Como la mayoría de los medidores de presión miden la diferencia entre la presión del fluido y la presión atmosférica local, por lo que hay que sumar esta última al valor indicado por el manómetro para hallar la presión absoluta. Una lectura negativa del manómetro corresponde a un vacío parcial. Como ejemplo se tiene el Bourdon,

llamado así en honor al inventor francés Eugene Bourdon, en donde la presión atmosférica actúa en el exterior y la presión del líquido a medir actúa en el interior de un tubo curvado de sección elíptica, que cambiará su curvatura al cambiar la presión dentro del tubo. El extremo móvil del tubo gira la manecilla de un cuadrante mediante un mecanismo de unión articulado.

2.11 MEDICIONES DE FLUJO

El gasto en la sección de una tubería se puede medir indirectamente con dispositivos de aforo, en el sitio en que se desea conocer⁹. Los más comunes son los venturímetros, toberas diafragmas, que se adaptan generalmente a tuberías de medianas y grandes dimensiones, donde es necesario llevar un control de los gastos, como en el caso de redes de abastecimiento de agua

2.11.1 Factores para la selección de dispositivos de medición

Muchos dispositivos encuentran disponibles para medición de flujo. Algunos de ellos miden la velocidad de flujo de volumen en forma directa, mientras que otros miden la velocidad promedio del flujo el cual puede convertirse a velocidad de flujo de volumen utilizando $Q = A.v$. Asimismo algunos de ellos proporcionan mediciones primarias directas, mientras que otros requieren calibración o la aplicación de un coeficiente de descarga a la salida observada del dispositivo. La forma de la salida del medidor de flujo

⁹ MOTT, Robert. Mecánica de fluidos aplicada. 4. ed. México : Prentice Hall, 1990. p.375-377.

también varía en forma considerable de un tipo a otro. La indicación puede ser una presión, un nivel de líquido, un contador mecánico, la posición de un indicador en la corriente del fluido, una señal eléctrica continua o una serie de pulsos eléctricos. La elección del tipo básico de medidor de fluido y su sistema de indicación depende de varios factores, algunos de los cuales se nombrarán a continuación.

- **Rango**

Los medidores disponibles en el mercado pueden medir flujos desde varios mililitros por segundo para experimentos precisos de laboratorio hasta varios miles de metros cúbicos por segundo para sistemas de irrigación de agua o agua municipal y para sistema de drenaje por consiguiente para una instalación de medición en particular, debe conocerse el orden de magnitud general de la velocidad de flujo así como el rango de las variaciones esperadas.

- **Exactitud requerida**

Virtualmente 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 tiene una exactitud del 2% y algunos dicen tener una exactitud de más del 0.5%. El costo es con frecuencia uno de los factores importantes cuando se requiere de una gran exactitud.

- **Pérdida de presión**

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

- **Tipo de indicación**

Los factores a considerar en la elección del tipo de indicación de flujo dependen de si se desea de sensibilidad remota o grabación, si va a operar un actuador automático a la salida, si un operador necesita supervisar la salida o si prevalecen condiciones severas del medio ambiente.

- **Tipo de fluido**

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

- **Calibración**

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

2.11.2 Tipos de medidores

Entre los medidores más comúnmente usados están los siguientes¹⁰:

1. Medidores de hélice.
2. Medidores de área variable.
3. Medidores diferenciales.

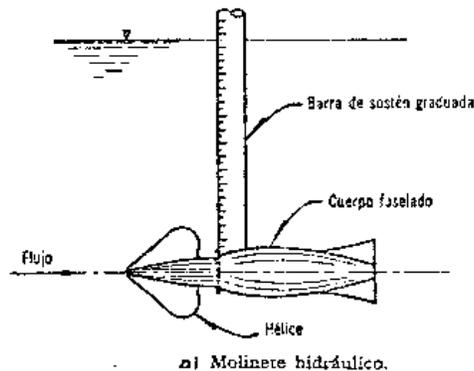
Medidores de hélice: están constituidos por una hélice que se instala dentro del conducto, la cual gira a un número de revoluciones por unidad de tiempo proporcionales directamente

¹⁰ UNIVERSIDAD DEL CAUCA. Medidores de caudal. Popayán : Departamento de Hidráulica, 2002.

a la velocidad del flujo. Como el área es constante, el caudal es directamente proporcional a la velocidad de rotación de la hélice.

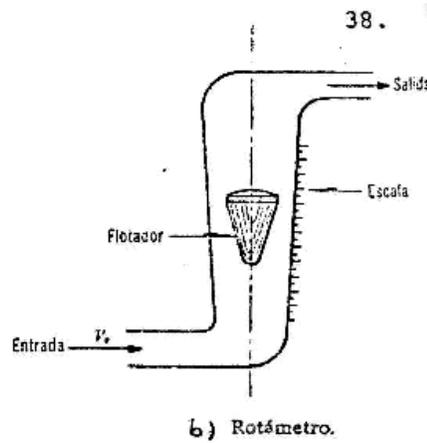
Entre este tipo de medidores están los molinetes que pueden acoplarse a dispositivos mecánicos, eléctricos o electrónicos que registren el número de revoluciones o directamente la velocidad del flujo, Figura 11.

Figura 11. Molinete hidráulico



Medidores de área variable: son conocidos como rotámetros y consisten de un flotador dentro de un tubo transparente de diámetro variable que va aumentando desde la entrada hasta la salida y va instalado en un tramo ascendente del conducto. Proporcionalmente al flujo que esté entrando al aparato, el flotador se desplaza verticalmente hasta lograr estabilizarse en un punto o nivel. Conocida la geometría del aparato se puede calibrar de tal manera que en una escala graduada se lea directamente el caudal. Por construcción se logra que el eje del flotador siempre coincida con el del tubo transparente que lo contiene, evitando así que el flotador se adhiera a las paredes del tubo, Figura 12.

Figura 12. Rotámetro



Medidores diferenciales: el principio básico en el cual se apoyan los medidores diferenciales es que cuando una corriente de fluido se restringe, su presión disminuye por una cantidad que depende de la velocidad de flujo a través de la restricción. Por lo tanto, la diferencia de presión entre los puntos antes y después de la restricción puede utilizarse para indicar la velocidad del flujo. Los tipos más comunes de medidores de cabeza variable son el tubo venturi, la boquilla de flujo, el orificio y el tubo de flujo. La derivación de las relaciones entre la diferencia de presión y la velocidad de flujo de volumen es el mismo sin importar que tipo de dispositivos se esté utilizando.

Para lograr una mayor sensibilidad, se construyen de tal forma que la diferencia de presiones sea grande, lográndose ésto con una reducción de la sección de flujo que aumente notoriamente la velocidad.

Ecuación general de medidores diferenciales:

$$Q_R = C_d \cdot A_o \sqrt{2g\Delta h} \quad \text{Ec. (15)}$$

Ecuación de patronamiento

$$Q_R = K \cdot \Delta h^{1/2} \quad \text{Ec. (16)}$$

$$K = C_d \cdot A_o \sqrt{2g}$$

Q_R = caudal real

C_d = coeficiente de descarga

A_o = área de la sección en la contracción

Δh = diferencia de presiones antes y en la contracción

K = constante de patronamiento

El coeficiente de descarga C_d depende de:

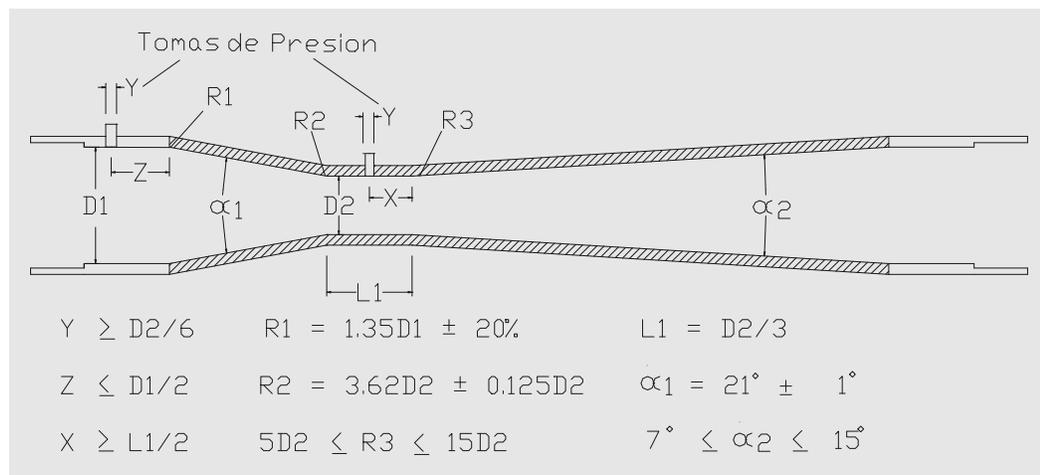
- La geometría del dispositivo
- La rugosidad del conducto
- El número de Reynolds Re en la tubería principal en que se instala el dispositivo.

Este coeficiente debe determinarse experimentalmente y tiende a ser constante para $Re \geq 10^5$.

Dentro de este tipo de medidores tenemos:

- **Tubos Venturi**¹¹

Figura 13. Tubo estándar del venturi de Asme



El tubo convergente es un eficiente dispositivo para la conversión de la altura de presión en altura de velocidad, mientras que el tubo divergente convierte la altura de velocidad en altura de presión. Se pueden combinar los dos para producir un tubo venturi, denominado así en honor de Giovanni B. Venturi (1746-1822), un físico italiano que investigó los principios fundamentales del mismo alrededor de 1791. El tubo venturi consiste en un tubo que converge hacia una garganta, que genera un aumento de velocidad acompañado de una reducción de presión, seguido por otro tramo de tubo divergente en el que la velocidad se transforma de nuevo en presión con una ligera pérdida de carga por fricción.

¹¹ ASME. Medida del flujo fluido en pipas usando el orificio y el venturi, 1985.

Los valores de la relación D_2/D_1 pueden variar entre $1/4$ y $3/4$, siendo el valor más común $1/2$. Una relación pequeña aumenta la precisión de la lectura manométrica, pero va acompañada de una mayor pérdida por fricción y puede producir una presión baja no deseada en la garganta suficiente en algunos casos para que se liberen gases disueltos o incluso para que se evapore el líquido en este punto; este fenómeno se denomina cavitación.

Este dispositivo consta de tres partes principales:

- a) La entrada de forma cónica convergente.
- b) La garganta de forma cilíndrica
- c) El difusor de forma cónica divergente

Los tubos Venturi se fabrican de distintos materiales y de dos tipos.

- a) Tubos Venturi Cortos: longitud entre $3.5D$ y $5D$.
- b) Tubos Venturi Largos: longitud entre $5D$ y $12D$.

Entre la entrada y la salida se produce una pérdida de carga la cual es proporcional directamente a la diferencia de presiones entre la entrada y la garganta e inversamente a la relación D_2/D_1 .

La pérdida de carga es mayor en tubos cortos que en los largos de igual relación D_2/D_1 .

Para un mismo tipo de tubo, la relación es mayor cuanto menor sea el diámetro de su garganta.

Para determinar la ecuación del caudal en el medidor venturi, se aplica la ecuación de la energía entre una sección (1) a la entrada del venturímetro y otra sección (2) en la garganta del venturímetro, sin considerar las pérdidas de carga o sea en condiciones teóricas; utilizando las secciones 1 y 2 en la figura 13 como puntos de referencia, podemos escribir las siguientes ecuaciones:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g}$$

Para tubería horizontal:

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2g} = h_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

$$V_2^2 - V_1^2 = 2g \cdot (\Delta h)$$

Por continuidad:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 = Q$$

$$V_1 = \frac{A_2 \cdot V_2}{A_1}$$

$$V_2 = \frac{\sqrt{2g \cdot \Delta h}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \quad \text{Ec. (17)}$$

El caudal teórico:

$$Q_T = A_2 \cdot V_2 = \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{2g \cdot \Delta h} \quad \text{Ec. (18)}$$

La velocidad real en (2)

$$V_R = C_V \frac{\sqrt{2g \cdot \Delta h}}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \quad \text{Ec. (19)}$$

El caudal real estará dado por:

$$Q_R = A_2 \cdot V_R = \frac{C_V \cdot A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{2g \cdot \Delta h} \quad \text{Ec. (20)}$$

Llamando

$$C_d = \frac{C_V}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \quad \text{Ec. (21)}$$

$$Q_R = C_d \cdot A_2 \sqrt{2g \cdot \Delta h} \quad \text{Ec. (22)}$$

Sección (1): a la entrada del venturímetro

Sección (2): en la garganta del venturímetro

D_1 = diámetro de la sección (1)

D_2 = diámetro de la garganta sección (2)

Z_1 = cota del eje de la sección (1)

Z_2 = cota del eje de la sección (2)

P_1/γ = cabeza de presión en la sección (1)

P_2/γ = cabeza de presión en la sección (2)

V_1, V_2 = velocidades en las secciones (1) y (2) respectivamente.

h_1 = $Z_1 + P_1/\gamma$ = cota piezométrica en la sección (1)

h_2 = $Z_2 + P_2/\gamma$ = cota piezométrica en la sección (2)

Δh = $h_1 - h_2$ = diferencia de presiones entre la entrada y la garganta

Estas ecuaciones son válidas solamente para fluidos incomprensibles, esto es, líquidos. Para el flujo de gases, debemos dar especial atención a la variación del peso específico γ con la presión.

El coeficiente de descarga C_d depende de:

→ El grado de estrangulamiento $A_2/A_1 = (D_2/D_1)^2$

→ La viscosidad del fluido.

→ La rugosidad de las paredes internas del tubo.

→ Del tipo de medidor Venturi.

Este coeficiente se determina experimentalmente y es característico de cada medidor el cual para valores altos del número de Reynolds tiende a ser constante.

Ecuación de patronamiento del medidor:

$$Q = K \cdot \Delta h^{1/2} \quad \text{Ec. (23)}$$

$$K = C_d \cdot A_2 \sqrt{2g} \quad \text{Ec. (24)}$$

Para un tubo venturi fabricado o fundido con las siguientes condiciones se recomienda un coeficiente $C_d = 0.984$

100mm • D_1 • 1200mm

4" • D_1 • 48"

0.30 • $\hat{\alpha}$ • 0.75

2×10^5 • N_R • 6×10^6 (en la tubería principal)

donde $\hat{\alpha}$ se define como el cociente del diámetro de la garganta y el diámetro de la sección de la tubería principal. Esto es, $\hat{\alpha} = D_2 / D_1$.

Para un tubo venturi maquinado, se recomienda que $C_d = 0.995$ para las condiciones siguientes:

$$50\text{mm} \bullet D_1 \bullet 250\text{mm}$$

$$2'' \bullet D_1 \bullet 10''$$

$$0.30 \bullet \hat{c} \bullet 0.75$$

$$2 \times 10^5 \bullet N_R \bullet 6 \times 10^6 \text{ (en la tubería principal)}$$

Para la selección de un medidor venturi se debe tener en cuenta:

1. Determinar el rango de caudales que ha de medir: Q_{min} y Q_{max} .
2. De catálogos se selecciona el que puede medir el Q_{max} requerido y se determina la correspondiente diferencia de presiones.
3. Se calcula la Δh para el Q_{min} requerido. El Δh debe ser mayor de 3 cms.
4. Se calcula la máxima pérdida de carga dada por:

$$hp = C \cdot \Delta h_{max}$$

Δh_{max} = diferencia de presiones para el Q_{max} entre la entrada y la salida.

C = coeficiente que depende del tipo de Venturi y de la relación D_2/D_1 .

Si la pérdida de carga es muy alta debe buscarse un medidor mas largo y/o de diámetro mayor.

5. El caudal normal que debe registrar el aparato debe ser del 50% al 75% del caudal máximo dado para el medidor.
6. Se recomienda en lo posible, escoger un medidor con relación $D_2/D_1 < 0.70$.

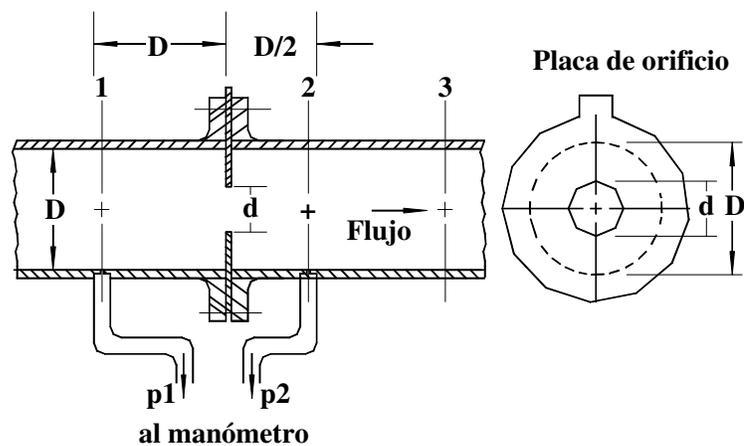
Para la instalación de un medidor venturi se debe cumplir los siguientes requisitos:

- 1) Para instalar un tubo Venturi debe seleccionarse un punto en la tubería donde se disponga de la presión suficiente para que se produzca la diferencia de presiones Δh requerida para el caudal máximo.
- 2) La tubería donde se instale debe tener un diámetro igual que el de la entrada del Venturi.
- 3) Deben instalarse en tramos rectilíneos de $6D$ a $10D$ como mínimo aguas arriba y $5D$ aguas abajo.
- 4) No debe haber accesorios en la tubería próximos al Venturi, los cuales ocasionarían perturbaciones en la uniformidad del flujo.

- **Diafragmas u Orificio**

A una placa plana con un orificio de orilla en ángulo maquinada en forma precisa se le conoce con el nombre de orificio. Cuando se coloca en forma concéntrica dentro de una tubería, como se muestra en la figura 14, esta provoca que el flujo se contraiga de repente conforme se aproxima al orificio y después se expande de repente al diámetro total de la tubería. La corriente que fluye a través del orificio forma una vena contracta y la rápida velocidad del flujo resulta en una disminución de presión hacia abajo desde el orificio. Las tomas de presión antes y después del orificio permiten la medición de la presión diferencial a través del medidor, la cual está relacionada con la velocidad de flujo de volumen por medio de la ecuación de caudal.

Figura 14. Diafragma



El valor de C_d es afectado por pequeñas variaciones en la geometría de la orilla del orificio. Donde D es el diámetro de la tubería y d es el diámetro del orificio; así mismo, es mucho

más bajo que el del tubo venturi o la boquilla de flujo puesto que el fluido se fuerza a realizar una contracción repentina seguida de una expansión repentina. Asimismo, debido a que las mediciones están basadas en el diámetro del orificio, la disminución en el diámetro de la corriente de flujo en la vena contracta tiende a reducir el valor de Cd.

Se diferencian de una tobera porque la sección de área mínima no se presenta en el tubo, sino aguas abajo de la contracción, exactamente en la vena contracta en la sección (2), como se observa en la figura anterior. El área de la sección (2) se determina con un coeficiente de contracción Cc.

$$A_2 = Cc * A_0$$

Se construyen en bronce, acero, u otro material inoxidable con espesores desde 2.5 mm. Si se emplean placas de espesor mayor a 5 mm. los bordes del orificio deben biselarse. Su uso esta limitado a tuberías donde se permite una alta perdida de carga en el sistema de aforo.

En la determinación de la ecuación del caudal en el diafragma se procede de la siguiente manera:

Aplicando Bernoulli desde la sección 1 hasta la vena contracta, sección 2:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g}$$

La ecuación de continuidad relaciona V_1 y V_2 con el coeficiente de contracción

$$C_c = A_2/A_0 \quad \text{así:}$$

$$A_1V_1 = C_c A_2V_2 = Q$$

$$V_{2t} = \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1 - C_c^2 (A_0/A_1)^2}} \quad \text{Ec. (25)}$$

Multiplicando por C_v para obtener la velocidad real en la vena contracta:

$$V_R = C_v \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1 - C_c^2 (A_0/A_1)^2}} \quad \text{Ec. (26)}$$

Y finalmente, multiplicando por el área del chorro, $C_c A_0$, se encuentra el caudal real Q en el cual $C_d = C_v \cdot C_c$:

$$Q = C_d A_0 \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1 - C_c^2 (A_0/A_1)^2}} \quad \text{Ec. (27)}$$

$C_c = A_2/A_0 =$ Coeficiente de contracción

$C_v =$ Coeficiente de velocidad

$C_d = C_c * C_v =$ Coeficiente de descarga

En los diafragmas no es posible localizar la toma piezométrica correspondiente a la sección (2) exactamente en la sección de la vena contracta, por tal razón se localiza a una proporción fija del diámetro del tubo aguas abajo de la placa del diafragma. La conexión en la sección (1) se localiza a 1 diámetro (1D) aguas arriba de la placa. En la ecuación se aprecia como el coeficiente C_d del diafragma depende de los coeficientes de velocidad C_v y contracción C_c . Usualmente el coeficiente de descarga se encuentra relacionado con el número de Reynolds.

La ecuación de patronamiento del medidor esta dada por la expresión.

$$Q = K \cdot \Delta h^{1/2}$$

$$K = C_d \cdot A_2 \sqrt{2g}$$

A continuación se enumera los requisitos de instalación para los diafragmas:

1. Los diafragmas deben instalarse donde la pérdida de carga no sea una limitante debido a que es bastante alta.
2. La relación entre el diámetro D_o del orificio y el de la tubería D donde se instale, debe estar entre 0.80 y 0.30.

3. Deben ubicarse en tramos rectilíneos ya sean horizontales o verticales.
4. Antes y después del diafragma no deben existir aditamentos que causen perturbación en el flujo. La longitud mínima libre se da en el cuadro 2.

Cuadro 2. Longitud mínima libre de instalación de los diafragmas

RELACIÓN DE DIÁMETROS	LONGITUD LIBRE DE ADIMENTOS	
D_o orificio/ D tubo	AGUAS ABAJO	AGUAS ARRIBA
0.80	20.D	5.D
0.70	12.D	4.D
0.50	7.D	3.5.D
0.30	3.D	3.D

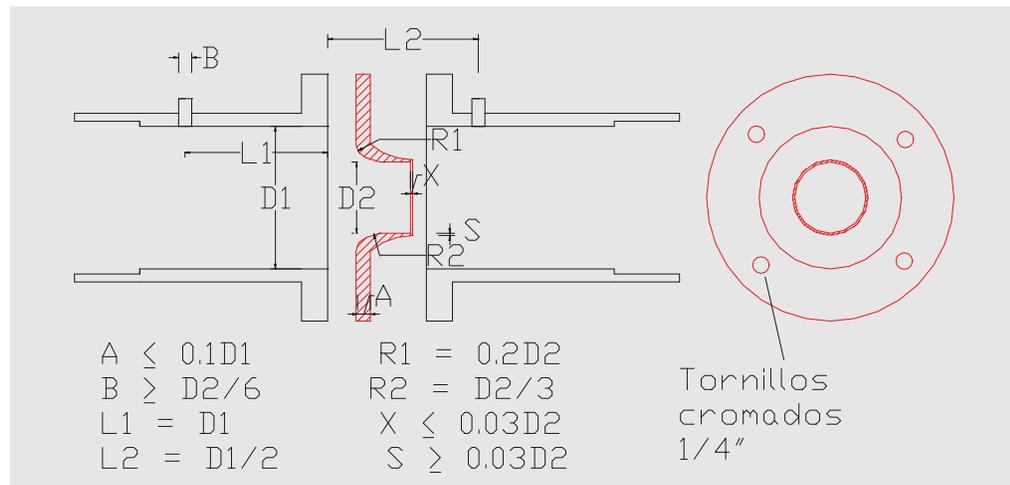
- **Toberas**

Este dispositivo es más sencillo que el tubo venturi ya que el tramo divergente ha sido omitido, se puede instalar entre los platos de unión de una tubería. Tiene la misma función que un tubo venturi, aunque dará lugar a una mayor pérdida por fricción en la tubería.

La boquilla de flujo es una contracción gradual de la corriente de flujo seguida de una sección cilíndrica recta y corta como se muestra en la figura. Diferentes geometrías estándar de boquillas de flujo se han presentado y adoptado por organizaciones tales como

la American Society of Mechanical Engineers (ASME) y la Organización Internacional de Estándares. Debido a la contracción pareja y gradual, existe una pérdida muy pequeña entre los puntos 1 y 2 para la boquilla de flujo. A valores grandes de número de Reynolds C_d es superior a 0.99. A valores bajos de número de Reynolds la expansión repentina fuera de la garganta de boquilla provoca una pérdida de energía mayor y un valor de C_d mas bajo, lo demuestran resultados obtenidos de la experiencia.

Figura 15. Tobera



Aunque existen muchos diseños de toberas medidoras de caudal, la tobera ISA (International Standards Association) que se representa en la figura, se ha convertido en la forma estándar aceptada en muchos países. El coeficiente de descarga C_d está en función de la relación de diámetros de la tobera (D_2/D_1) y del número de Reynolds. Se debe tener en cuenta que en este caso el número de Reynolds es el de la tubería de acercamiento y no el de la garganta de la tobera.

Las mismas ecuaciones de caudal de los diafragmas son válidas para las toberas haciendo $C_c=1$. por lo tanto:

$$Q_R = C_d \cdot A_0 \sqrt{2g\Delta h}$$

$$C_d = \frac{C_v}{\sqrt{1 + \left(\frac{A_0}{A_1}\right)^2}}$$

En la instalación de este dispositivo se tiene en cuenta:

1. Se recomiendan para tuberías de diámetros grandes mayores de 30 cms (12").
2. Deben instalarse en tramos rectos de $10D$ a $40D$ de longitud aguas arriba y como mínimo $5D$ aguas abajo.

2.12 TEORÍA DE ERRORES¹²

Cuando se somete un fenómeno físico a un proceso de observación, se obtiene de él información que siempre debe ser procesada, atendiendo las consideraciones de la Teoría de Errores. Esta consiste en aproximar los modelos obtenidos experimentalmente a los modelos reales, disminuyendo el grado de incertidumbre en el observador cuando los datos obtenidos están, de alguna manera, dispersos.

¹² UNIVERSIDAD DEL CAUCA. Metodología para procesar datos experimentales. Popayán Departamento de Hidráulica, 2002.

2.12.1 Errores experimentales

En un trabajo experimental, las observaciones efectuadas no son absolutamente exactas debido a la incidencia de diferentes tipos de errores que se presentan. Los errores pueden clasificarse en dos: los errores sistemáticos y los errores fortuitos o casuales.

♣ Errores sistemáticos

Tienen el mismo signo siempre y pueden deberse a las siguientes causas: *instrumentales*, cuando se deben a defectos o imprecisión del aparato utilizado. Para evitar este tipo de error, los instrumentos se deben patronar cuidadosamente; *personales*, tienen como base la apreciación del observador. Se evitan estos errores realizándose cuidadosamente las lecturas, en forma repetida y por varios observadores; *externas*, se deben a causas externas tales como vientos, temperatura, humedad, vibraciones, etc. El observador no tiene control sobre ellos por lo cual no pueden eliminarse pero se deben aplicar las correcciones necesarias.

♣ Errores fortuitos o casuales

Son resultado de las probabilidades y su efecto se reduce haciendo un gran número de observaciones.

2.12.2 Determinación de los errores experimentales

Según la clasificación de errores anterior, los errores sobre los que se puede tener algún tipo de estimativo matemático son aquellos asociados a los instrumentos de medición y su escala de medida. En general, los errores en la escala de los instrumentos se estiman así:

$$\varepsilon = \frac{\delta M}{M}$$

En donde, δM se refiere a la escala de precisión del instrumento utilizado y M es la magnitud total medida. Es decir, si se está midiendo una distancia de 1 m (100cm), con una precisión de 1cm (1cm), el error esperado sería $\varepsilon = \delta M / M = 1\text{cm} / 100\text{cm} = 0.01$. Es evidente entonces, que acorde a la medida que se va a realizar, se deben utilizar escalas de medición adecuadas.

Cuando la medición se hace sobre una magnitud derivada, es decir, que depende de la relación existente entre mediciones básicas (longitud, tiempo, masa, entre otras), se debe determinar la influencia de cada medición, sobre el error final.

Para relaciones más complejas, es decir, con influencias de más variables, se considera el error individual y luego se suman.

2.12.3 Relación entre variables

En las experimentaciones hidráulicas se tienen variables cuyos valores son dependientes entre sí y que están relacionadas mediante una ecuación matemática tal que $Y = f(x)$. Así por ejemplo, el caudal Q que pasa por un vertedero depende de la carga hidráulica H que actúa sobre su cresta.

Los diferentes pares ordenados (X_i y Y_i), encontrados experimentalmente, conformaran un “diagrama de dispersión”, el cual responde a un patrón de forma que puede ser correlacionado mediante modelos lineales, exponenciales, logarítmicos, o potenciales. Al elegir la correlación conveniente, una de las variables quedará en función de las otras, mediante una ecuación cuyas constantes deben determinarse. La curva que mejor represente los pares ordenados se llama curva de aproximación. Las curvas de aproximación más usuales son:

Polinómicas : Línea recta, Cuadrática (parábola), cúbica, grado n .

Logarítmica: $Y = a \ln(X) + b$

Exponencial: $Y = ab^X$

Potencial: $Y = aX^b$

Para decidir cual ecuación desarrollar en curvas no Polinómicas, es útil obtener diagramas de dispersión de variables transformadas. Por ejemplo, si un diagrama de dispersión en escalas “ X vs. $\log Y$ ” muestra una relación lineal entonces habrá que desarrollar una

ecuación exponencial, mientras que si graficando los pares "X vs. log Y" obtenemos una recta, entonces habrá que desarrollar una ecuación potencial.

Ajuste de datos experimentales

En cada una de las practicas de laboratorio de hidráulica se obtendrán conjuntos de variables que presentan algún tipo de relación. Con el diagrama de dispersión y la mejor curva de ajuste definidos se procede a hallar la ecuación de esta última mediante un desarrollo matemático.

♣ Método Gráfico

Consiste en construir un gráfico cartesiano, donde se presente la dispersión entre las variables y dibujar la línea de mejor ajuste. En caso de ser lineal, los parámetros a y b se leen directamente del gráfico.

♣ Promedio Aritmético

Para determinar el valor que tiene la mayor probabilidad de ser el correcto, se utilizan métodos estadísticos, siendo el más común el de la media aritmética o promedio aritmético, que expresa que el valor más representativo esta dado por la suma de todos los valores de las observaciones dividida por el número de estas. Este procedimiento presenta como ventajas que es el más usado, de fácil computo y que para el cálculo solo son necesarios los valores totales y el número de datos. Se presenta matemáticamente así:

$$M = \frac{1}{n} \sum_1^n X_1 \quad \text{Ec. (28)}$$

M = media aritmética

n = número de datos

X_1 = valores de las observaciones

♣ Método de Mínimos cuadrados

Se han desarrollado métodos basados en teorías estadísticas para buscar la ecuación de la curva que mejor se ajuste al conjunto de datos, que siendo única, evita el juicio individual.

Como procedimiento para hallar la ecuación de la curva de ajuste se puede utilizar el método de mínimos cuadrados cuyo criterio es definir una curva cuyas desviaciones al cuadrado respecto a los datos reales son mínimos (definido para cualquier curva: recta, parábola, etc.). Para aplicar estos métodos es indispensable conocer de antemano la clase de correlación entre las variables. Entre los métodos estadísticos, uno de los más conocidos es el de los mínimos cuadrados.

- | | |
|----------------------------|---------------|
| 1. Correlación exponencial | $Q = K.H^m$ |
| 2. Correlación lineal | $Y = a + m.X$ |

Para este tipo de correlación las ecuaciones cuadráticas normales son:

$$\sum (XY) = a \sum x + m \sum x^2$$

La solución para las constantes a y m están dadas por ecuaciones

$$a = \text{constante} = \frac{(\sum Y_1) * (\sum X_1^2) - (\sum X_1) * (\sum X_1 Y_1)}{n \sum X_1^2 - (\sum X_1)^2}$$

$$m = \text{constante} = \frac{n(\sum X_1 Y_1) - (\sum X_1) * (\sum Y_1)}{n \sum X_1^2 - (\sum X_1)^2}$$

n = número de datos

En la mayoría de las prácticas se evalúan parámetros cuyas relaciones son no lineales pero en todos los casos la forma de abordar estas curvas es haciendo uso de la transformación de variables, por ejemplo:

$Q = K.H^m$ donde: Q Caudal, variable dependiente

H Carga hidráulica del flujo de agua, variable independiente

K y m Constantes

Aplicando logaritmos a ambos lados de la ecuación anterior y utilizando las propiedades de los logaritmos se tiene:

$$\text{Log (Q)} = \text{log (K.H}^m)$$

$$\text{Log (Q)} = \text{log (K)} + \text{log (H}^m)$$

$$\text{Log (Q)} = \text{log (K)} + m \text{log (H)}$$

Haciendo:

$$\text{Log (Q)} = Y$$

$$\text{Log (K)} = a$$

$$\text{Log (H)} = X$$

$$m = b$$

Entonces $Y = a + bX$ función lineal, las constantes a y b se hallan haciendo uso de las ecuaciones anteriores y $K = \text{antilog (a)}$.

2.12.4 Interpretación de resultados

Una vez obtenida la ecuación de la curva que mejor se ajusta a los datos, proceso llamado patronamiento, se puede utilizarla para calcular la variable dependiente haciendo solo uso de la determinación de la variable independiente, esto es lo que la estadística llama *Regresión*.

Una vez se realiza el ajuste de datos es necesario conocer que tan adecuado es dicho ajuste; esto se hace calculando el coeficiente de correlación, que sería un indicador de que,

efectivamente, los datos guardan una proporción lineal. Valores cercanos a 1 indican una relación lineal adecuada, valores cercanos a 0 indican que los datos no se distribuyen según un comportamiento lineal. El coeficiente de correlación se estima con la siguiente ecuación:

$$r = \frac{n(\sum X_i Y_i) - (\sum X_i) * (\sum Y_i)}{\sqrt{[n(\sum X_i^2) - (\sum X)^2] * [n(\sum Y_i^2) - (\sum Y)^2]}} \quad \text{Ec. (29)}$$

3. DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

3.1 Partes del banco de pruebas

Figura 16. Banco de pruebas para medición de caudales



3.1.1 Tanque de alimentación y aforo: se construyó en lamina de acero galvanizado calibre 18, cuyas dimensiones se indican en la figura 35. Consta de un deposito de almacenamiento de agua, de donde sale el tubo de succión de la motobomba. También está provisto de un vertedero triangular para el aforo de caudales. Este tanque esta diseñado con un sistema de retorno el cual hace recircular el fluido a través del banco.

3.1.2 Motobomba: dispositivo mecánico de marca IHM que cuenta con las siguientes características:

- motor eléctrico monofásico Siemens.
- potencia de 2 Horse Power (HP).
- salida a 1½”.
- voltaje de 115.
- amperaje de 25.
- revoluciones por minuto (RPM) 3450.

La cual proporciona un caudal máximo de 5.5 l/s (dato obtenido por aforo), está ubicada en la parte baja del tanque de alimentación y aforo y conectada al sistema.

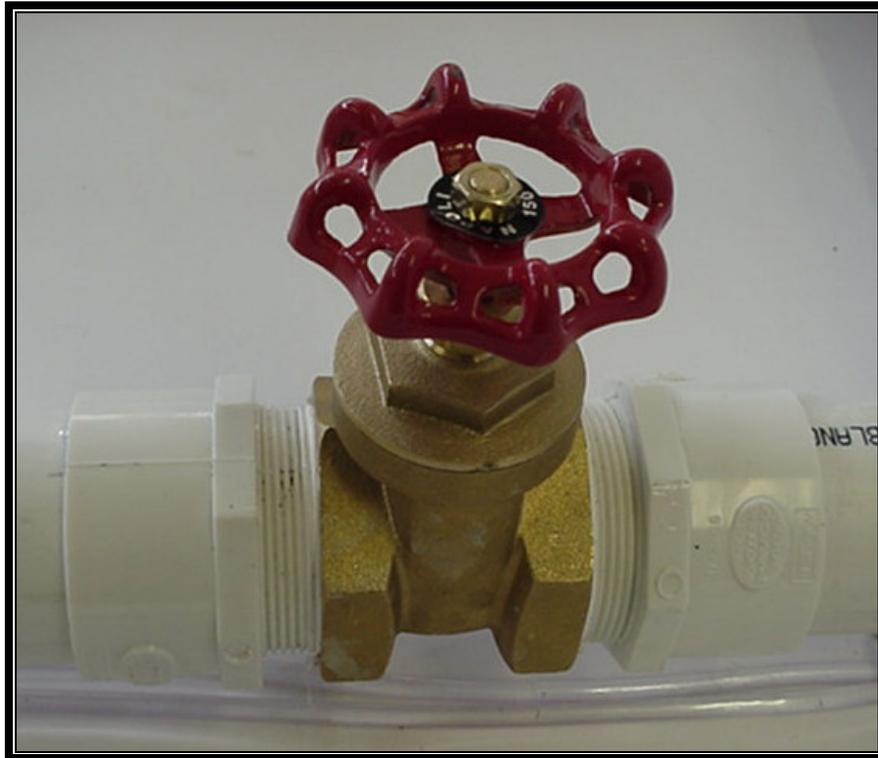
Figura 17. Motobomba



3.1.3 Accesorios:

Válvula de compuerta: accesorio de 2", que en el banco de pruebas construido sirve para variar el caudal que circula por la conducción y suspender el flujo cuando el equipo no este en funcionamiento.

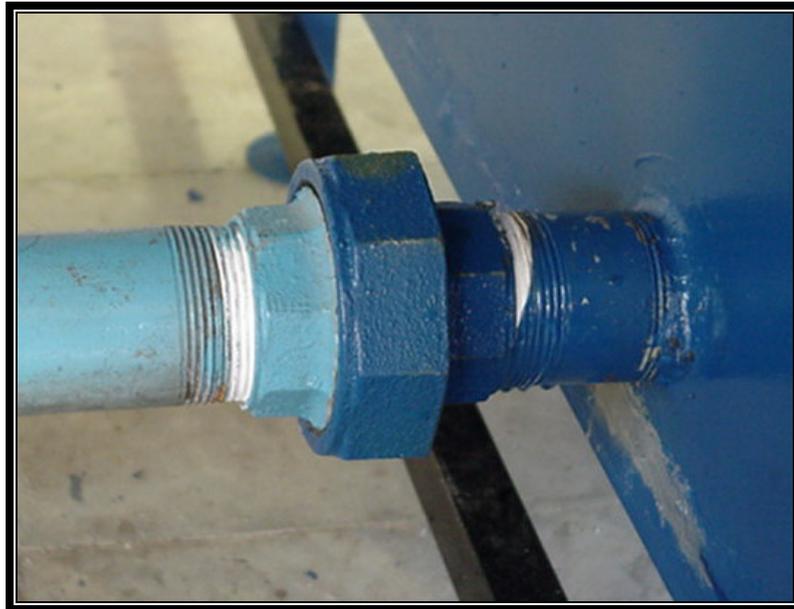
Figura 18. Válvula de compuerta



Codos 90°: accesorio en PVC de radio corto, el cual se utiliza para cambiar la dirección de la tubería.

Válvula Universal Acero Galvanizado (HG): de diámetro 1 ½”, la cual nos sirve para acoplar la motobomba al tanque de alimentación.

Figura 19. Válvula Universal HG



Válvula Universal PVC: de diámetros 1 ½” y 2”, sirven para instalar la motobomba a la conducción y facilitar el desacople.

Adaptador macho: accesorios en PVC de diámetros 1 ½” y 2”, sirve para acoplar la motobomba a la universal, al codo y las válvulas de compuerta a la conducción. figuras 18 y 20.

Dilatación gradual HG: cumple la función de cambiar el diámetro ampliándolo de 1 ½ ” a 2 ” de la motobomba a la conducción. figura20.

Niple HG: de diámetro 1 ½ ”, conecta la copa con el adaptador hembra. Figura 20.

Adaptador hembra: de diámetro 1 ½ ” en PVC, sirve como conector entre la universal y el niple de HG. Figura 20.

Figura 20. Accesorios salida motobomba.



Tee PVC 2”: cumple la función de conectar una tubería a otra en un ángulo recto de 90°.

3.1.4 Conducción: se emplea una tubería RDE 21- Pavco, con un diámetro de 2", a través de la cual circula el fluido en el banco de pruebas.

3.1.5 Tomas de presión: conformadas por racores de cobre de un diámetro interno de 4mm, ubicadas en los dispositivos de medición.

3.1.6 Mangueras plásticas: con diámetro interno de 4mm, las cuales son transparentes y conectan las tomas con el sistema de medición de presión, mediante un sistema de racores.

3.1.7 Flauta manométrica: dispositivo construido en tubería de presión PVC con el fin de recoger los puntos de presión de los dispositivos de medición de caudal y llevarlos al manómetro. Figura 29.

3.1.8 Grifos: fabricados en bronce con un diámetro interno de 4 mm, nos permitirán cerrar el paso del fluido en los puntos donde no se desea determinar la presión, irán conectados a la flauta manométrica. Figura 28.

3.1.9 Manómetro en U: aparato que sirve para determinar la presión en cada uno de los puntos por analizar, va conectado a la flauta manométrica.

3.1.10 Dispositivos de medición: se utiliza el venturi, el orificio (diafragma) y la tobera, los cuales nos permiten medir el caudal circulante por medio de unas tomas de presión que

se conectan a estos por medio de mangueras y posteriormente al manómetro. Figuras 21, 23 y 24 respectivamente.

3.1.11 Bidas: aparatos contruidos en resina transparente para ensamblar en la tubería la tobera y el orificio. Figura 26.

3.1.12 Empaques: los cuales van entre las bidas y los dispositivos de medición y sirven para evitar la filtración del fluido.

3.1.13 Tornillos cromados: con diámetro de $\frac{1}{4}$ ", de cabeza redonda acompañados por una tuerca y arandelas planas, para dar mayor fijación de las bidas con la tobera y orificio.

3.1.14 Tablero: elaborado en madecor blanco, calibre 9mm, el cual sirve para apoyar la tubería y los dispositivos por medio de soportes.

3.1.15 Soporte: contruido en lamina de acero calibre 20, en el se apoya el tablero y va en la parte posterior del tanque de almacenamiento y aforo. Figura 32.

3.2 CALCULO Y DISEÑO

3.2.1 Diámetro de la tubería de conducción

Se determinó teniendo en cuenta la velocidad de flujo recomendada en conductos y tuberías, la cual dice que para sistemas de distribución de fluido una velocidad de flujo razonable es de aproximadamente 3 m/s con el fin de evitar ruidos, desgastes y pérdidas excesivas en la tubería.

Se toma un caudal de 5.5 l/s (proporcionado por la motobomba).

Para un diámetro de 1 ½ ” con $A = 0.001459 \text{ m}^2$:

$$v = Q/A = 0.0055 \text{ m}^3/\text{s} / 0.001459 \text{ m}^2 = 3.77 \text{ m/s}$$

Para un diámetro de 2” con $A = 0.00234 \text{ m}^2$:

$$v = Q/A = 0.0055 \text{ m}^3/\text{s} / 0.00234 \text{ m}^2 = 2.35 \text{ m/s}$$

por lo tanto se escogió un diámetro nominal de 2” PVC Pavco, ya que un diámetro menor produciría una velocidad demasiada alta afectando la presión y un diámetro mayor no proporcionaría la presión suficiente para la toma de datos; también se adopto este diámetro por facilidad de construcción de los dispositivos y permitir así observar con mayor claridad la geometría de estos; además el laboratorio de hidráulica de la Universidad de Nariño cuenta con una motobomba que proporciona un caudal óptimo para el diámetro escogido. Asimismo como se escogió construir los dispositivos con unas medidas de diseño estándar

o normalizadas, estas recomendaban construir los dispositivos con un diámetro mínimo de 50 mm.

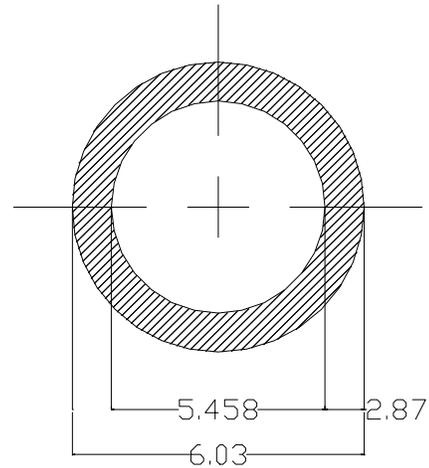
Para un diámetro de 2" tubería RDE 21 las especificaciones según catalogo Pavco son las siguientes:

Diámetro exterior: 60.32mm

Espesor de pared: 2.87mm

Diámetro Interno: 54.58mm aprox. 2.15"

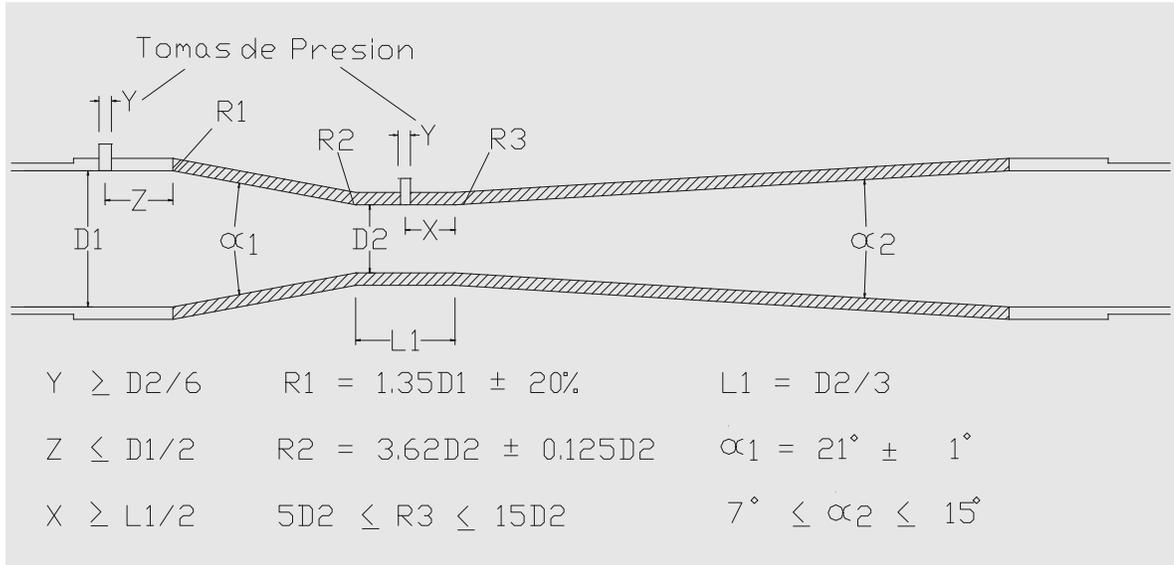
Presión de trabajo: 200 PSI



3.2.2 Diseño del dispositivo venturi

Se diseño siguiendo las especificaciones de la Sociedad Americana de Ingenieros Mecánicos (ASME).

Figura 21. Tubo venturi



Obteniéndose las siguientes dimensiones:

$$D_1 = 54.58 \text{ mm}$$

$$D_2 = 27.29 \text{ mm}$$

$$Y = 4 \text{ mm}$$

$$Z = 27.3 \text{ mm}$$

$$X = 15 \text{ mm}$$

$$R_1 = 74 \text{ mm}$$

$$R_2 = 95 \text{ mm}$$

$$R_3 = 250 \text{ mm}$$

$$\alpha_1 = 21^\circ$$

$$\alpha_2 = 10^\circ$$

Materiales

Para la construcción del venturi se empleó los siguientes materiales:

- Molde en madera
- Aros de tubería PVC Pavco RDE 21 de 2"
- Resina transparente 75%, estireno monómero rígido 25%, cobalto 6gr, MEK peróxido 10gr, Rowin mant (mezcla para 1 L).
- Racores 4mm de diámetro.

Propiedades físicas de la resina endurecida

Apariencia: Plástico claro, con o sin grietas.

Densidad: 1,1 g/ml

Rango de temperaturas: (-50°C a 250°C)

A temperatura constante: max. 200°C

A temperatura poco tiempo: max. 250°C (la resistencia a la temperatura depende del tamaño de la porosidad)

Resistencia química: tiene muy buena resistencia química a los líquidos polares y no polares

Resistencia a la presión: Igual al metal normal

Conductividad térmica: 0,18°C W/m K (*)

Resistencia eléctrica superficial: $10^{15} \text{ } \Omega \text{ cm}$ DIN 53482 (*)

Resistencia dieléctrica interna específica: $>10^{15} \text{ } \Omega \text{ cm}$ DIN 53482 (*)

Constante dieléctrica: $3,5 \pm 0,4$ a 50 Hz (*)

Voltaje de ruptura dieléctrica: 450 ± 50 kV DIN 53481 (*)

(*) Valores no medidos pero son los típicos de este tipo de resina.

Construcción

Se elaboró un molde en madera seca tipo balsa, torneada con las medidas correspondientes al interior del venturi; este molde se pulió de tal manera que la rugosidad del dispositivo sea la mas mínima posible para minimizar las pérdidas por fricción y la presencia de porosidades que generen agrietamientos, además evitar la turbulencia.

En los extremos del molde se colocaron los aros de tubería PVC de diámetro 2" de una longitud de 4.5 cm, los cuales servirán de un mecanismo de unión con la tubería de conducción.

Seguidamente se procede a mezclar la resina transparente con los demás componentes (estireno monómero rígido, cobalto, MEK peroxido, Rowin mant) para luego junto con la manta empezar a recubrir el molde, el cual se lo retiró a los tres días, dándole así a la resina suficiente tiempo para que logre la dureza necesaria y evitar que esta se contraiga y nos cambie las dimensiones de construcción.

Después de haber retirado el molde se procedió a ubicar los racores en los puntos calculados en el diseño los cuales servirán de tomas de presión, como se muestra en la figura 22.

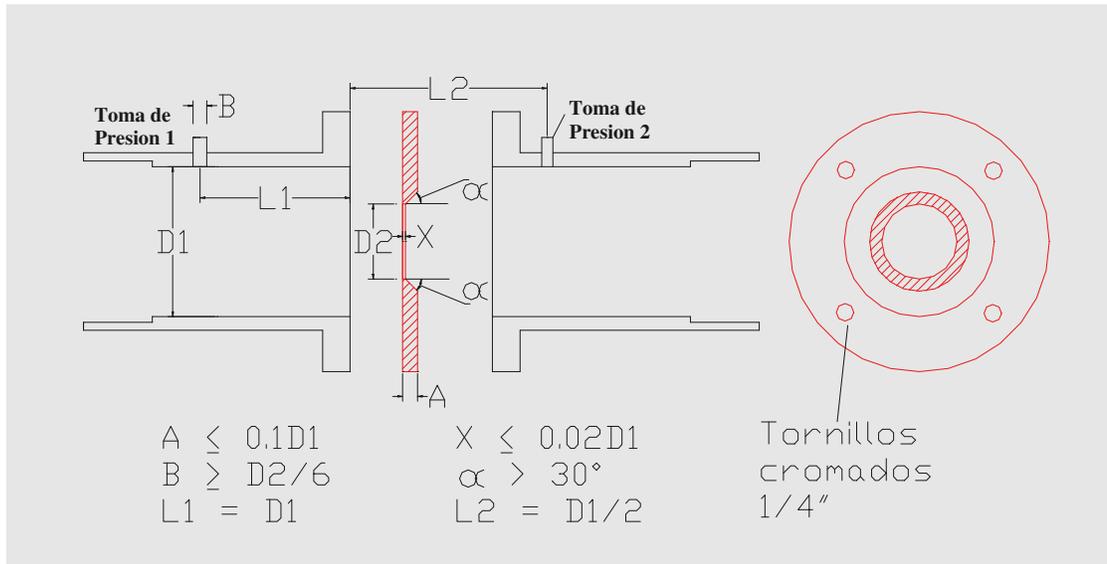
Figura 22. Tomas de presión - venturi



3.2.3 Diseño del Diafragma u orificio

Se diseño siguiendo las especificaciones de la Asociación Alemana de Ingenieros (VDI)

Figura 23. Diafragma estándar VDI



Obteniéndose las siguientes dimensiones:

$$D1 = 54.58 \text{ mm}$$

$$D2 = 27.29 \text{ mm}$$

$$A = 5.45 \text{ mm}$$

$$B = 4 \text{ mm}$$

$$L1 = 54.58 \text{ mm}$$

$$L2 = 27.3 \text{ mm}$$

$$X = 1 \text{ mm}$$

$$\acute{\alpha} = 45^\circ$$

Materiales

Como material de construcción del orificio se empleó Duralon ya que nos ofrece similares propiedades al bronce y al acero inoxidable los cuales son materiales recomendados en la teoría consultada, además es un material trabajable el cual tiene las siguientes aplicaciones y propiedades:

- Alta resistencia a la compresión
- Alta resistencia al impacto
- Alto módulo de elasticidad
- Alta resistencia a esfuerzos mecánicos combinados.
- Bajo peso específico
- Resistencia a la abrasión y al desgaste
- Comportamiento elástico

Aplicaciones:

- Ideal para fabricar engranajes, piñones, ruedas dentadas
- Cojinetes, poleas, cremalleras.
- Planchas protectoras que exijan resistencia a abrasivos e impacto.
- Guías, estrellas, sinfines para la industria embotelladora.

Propiedades físicas

Cuadro 3. Propiedades físicas duralon

PROPIEDADES	TEST A.S.T.M.	UNIDAD	VALOR*
Peso específico	D-792	N/m ³	1.15
Volumen específico	D-792	Lb/Pul ³	24.05
Dureza Rockwell	D-785		R-110 – R-120
Resistencia a la tracción	D-638 23°C (2"/mln.)	p.s.i.	11.000 – 14.000
Elongación	23°C (2"/mln.)	%	10.40
Resistencia o ruptura	23°C (2"/mln.)	p.s.i.	13.000
Módulo de tensión	D-638 23°C (0,25"7mln.)	p.s.i.	540.000
Resistencia a la flexión	D-790 23°C	p.s.i.	16.500
Módulo de flexión	D-790 23°C	p.s.i.	505.000
Resistencia a la compresión	D-695 23°C	p.s.i.	14.000
Módulo de compresión	D-695 23°C	p.s.i.	400.000
Resistencia al desgarramiento	D-732 23°C	p.s.i.	10.000 – 11.500
Resistencia al impacto (testizod)	D-256 23°C	Pie x lb / muesc	A 1.2
Tensión del impacto	D-1822 23°C	Pie x lb/pul ²	290
Combustibilidad	D-635		Auto Extinguible

Coeficiente de expansión térmica lineal	D-69 C	pul x pul/°C 5	X 10 a la -5
Temperatura de distorsión	66 p.s.l.	°C	215
Punto de fusión		°C	227
Resistividad volumétrica	D-257	Ohm/cm	2,6 x 10 a la 14
Constante dieléctrica	D-150 60 ciclos 10 a la 3 ciclos 10 a la 6 ciclos	- - -	3,7 3,7 3,7
Factor de disipación	D-150 60 ciclos 10 a la 3 ciclos 10 a la 6 ciclos	- - -	0,015 0,02 0,05
Resistencia dieléctrica	D-149 Poco tiempo 1/18" espesor	Volts/mil	380
Gradualmente 1/8"	D-149	Volts/mil	340
Absorción de agua 24 horas 23°C	D-570	%	0,6
Saturación de absorción de agua	D-570	%	6
Coeficiente de fricción dinámica (nylion contra acero)			0,32 sin lubricación. 0,05 inicio de lubricación con aceite 0,21 lubricación con agua
*Duralon Nylon conteniendo 0,2% de agua			

El DURALON NYLON resiste a la Corrosión de muchos solventes y puede ser usado bajo varias condiciones donde las piezas metálicas serian corroídas. DURALON NYLON es principalmente resistente a los alcalinos y solventes orgánicos. Puede ser usado en presencia de ácidos diluidos, pero no con ácidos fuertes o agentes oxidantes.

Construcción

Siguiendo las dimensiones calculadas en el diseño se elaboró el orificio en un torno industrial, procurando que la superficie sea lo mas lisa posible para disminuir las perdidas por fricción y evitar datos erróneos en las mediciones, los agujeros para los tornillos se hicieron con un taladro en los puntos determinados.

3.2.4 Diseño de la tobera

Se diseño siguiendo un modelo estandarizado de la Sociedad Instrumental de América (ISA).

Materiales

Al igual que el orificio este dispositivo se construyo en Duralon.

Construcción

Se elaboró en un torno industrial siguiendo las medidas de diseño de la ISA obtenidas en el cálculo, y al igual que el orificio procurando que la superficie sea lo menos rugosa, los agujeros para los tornillos se hicieron de la misma forma que en el orificio, y con la misma ubicación.

3.2.5 Diseño de bridas

Se elaboraron de tal manera que cumplan con las necesidades de instalación de la tobera y el orificio.

Materiales

- Molde
- Resina transparente
- Racores 4 mm de diámetro
- Aros de tubería PVC Pavco RDE 21 de 2"
- Manta

- Tubo PVC 2" sanitario

Construcción

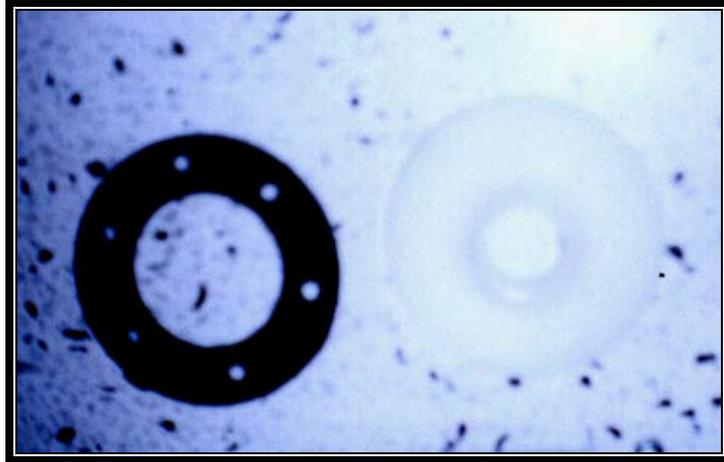
Para la elaboración del molde, se comenzó por cortar longitudinalmente el tubo PVC sanitario de 2" para que el diámetro externo de este tubo encaje en el diámetro interior de la tubería de conducción (Pavco RDE 21 de 2"), luego se inserta un aro de diámetro igual al de la tubería de conducción de una longitud de 4.5 cm, el cual servirá como mecanismo de unión en la tubería, a continuación este molde se coloca verticalmente en una lámina metálica.

Elaborado el molde se procede a recubrir este con la manta y la resina transparente previamente mezclada de la misma forma como se construyó el venturi, y de igual manera el molde se retira a los tres días.

Posteriormente se procedió a ubicar los puntos de toma de presión teniendo en cuenta si la brida irá ubicada aguas arriba o aguas abajo del dispositivo, ya que según diseño las distancias no son iguales; luego se perforó con un taladro y se colocaron los racores fijándolos con resina.

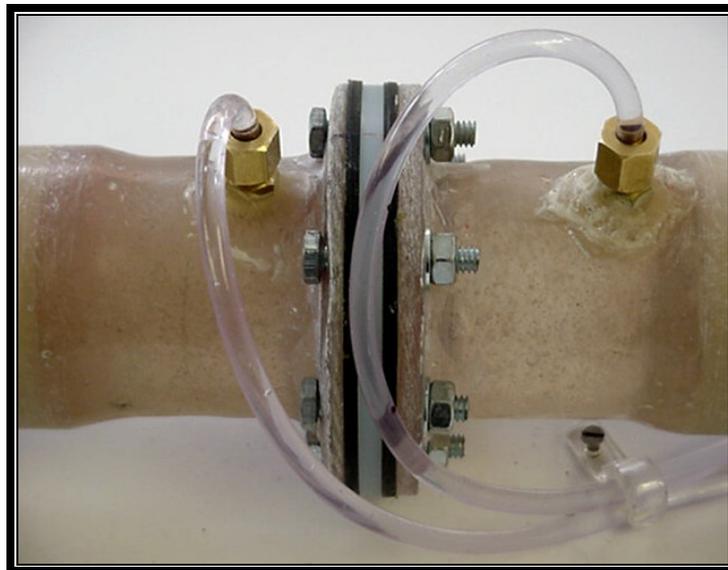
Para fijar los dispositivos entre las bridas se perforaron estas con un taladro industrial en los mismos puntos descritos en los dispositivos. Con el fin de evitar fugas entre los dispositivos y las bridas se construyeron empaques como se muestran en la figura 25.

Figura 25. Empaque y tobera



Finalmente, se ensamblan las bridas al dispositivo correspondiente, junto con los empaques, por medio de tornillos y tuercas de diámetro ¼”.

Figura 26. Tobera y bridas ensambladas



3.2.6 Diseño de la flauta manométrica

Se diseñó con el fin de permitir al usuario determinar que puntos de presión desea leer, y además cumplirá la función de eliminar las burbujas de aire que se hayan introducido en el sistema.

Materiales

Figura 27. Partes flauta manométrica



- 10 m de manguera transparente
- 8 grifos en bronce

- 80 cm de tubo de presión PVC ¾"
- 6 racores
- 2 T de bronce
- Unión PVC ¾"
- 2 bujes roscados PVC 1"x1/2"

Construcción

Se cortaron 2 tubos de presión de ¾" con una longitud de 40cm cada uno, los cuales se les hizo 3 perforaciones equidistantes con un taladro, para luego insertar los grifos.

Figura 28. Grifo



Se tomaron 2 uniones y se soldaron con los bujes roscados a los que se unieron la T de bronce y el grifo. Se selló la unión de PVC en el centro con un tapón de acrílico del mismo diámetro para dividir a la flauta en dos secciones independientes.

Posteriormente se unieron las partes descritas y se conectaron a los manómetros metálicos y por medio de las mangueras al manómetro en U.

Figura 29. Flauta manométrica



3.2.7 Cálculo del manómetro

Mediante la ecuación general del caudal se despejó $\dot{A}h$ y se asumió un caudal máximo de 4.5 LPS y un $C_d = 0.62$, correspondiente al orificio, el cual es el dispositivo que más pérdidas genera; obteniendo un $\dot{A}h = 0.60\text{mt}$, con el cual se determinó la altura máxima del manómetro en U. Se escogió un manómetro metálico de 15 PSI y un vacuómetro de

76 cmHg.

Materiales

- Mangueras transparentes
- Soportes en acrílico
- Tablero en madecor
- Mercurio

Construcción

En la sección 1 de la flauta manométrica se conecta a la T de bronce el manómetro metálico y en la sección 2 el vacuometro.

Figura 30. Manómetro (izquierda) y vacuometro (derecha)



Se fija el manómetro en U al tablero mediante un soporte en la base. Con la ayuda de una jeringa se llena el mercurio en el manómetro, el cual irá conectado por medio de mangueras a los grifos ubicados en los extremos de la flauta manométrica.

3.2.8 Diseño del tablero

El diseño se realizó teniendo en cuenta las longitudes máximas de la conducción como también las de la flauta manométrica.

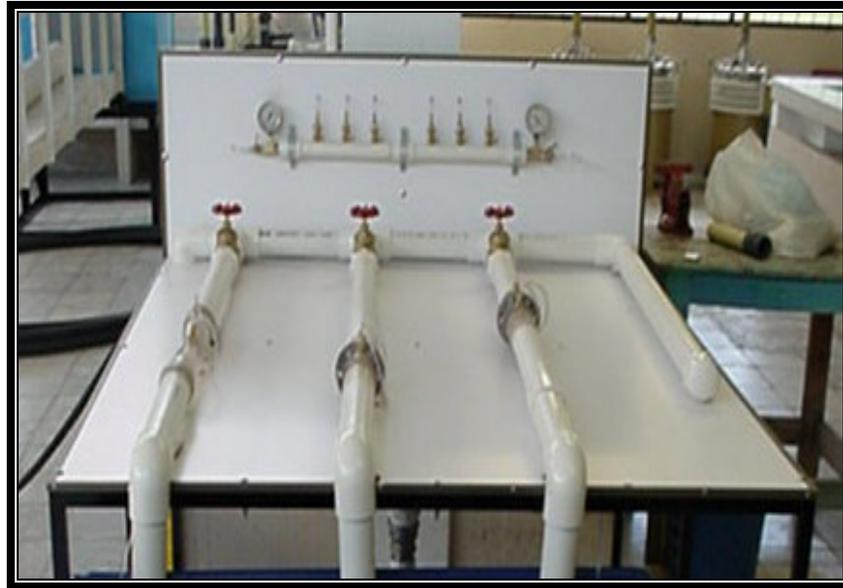
Materiales

- Lamina de madecor blanco de calibre 9 mm

Construcción

Teniendo en cuenta las longitudes calculadas para la tubería de conducción y la flauta, se cortó la lámina con las siguientes dimensiones 1.65 x 1.35 mt dejando un espacio libre de 10 cm en los extremos y 1.65 x 0.43 mt para ubicar la flauta, como se muestra en la figura 31.

Figura 31. Tablero ensamblado



3.2.9 Diseño del soporte

Este aparato fue diseñado con base en las medidas del tablero.

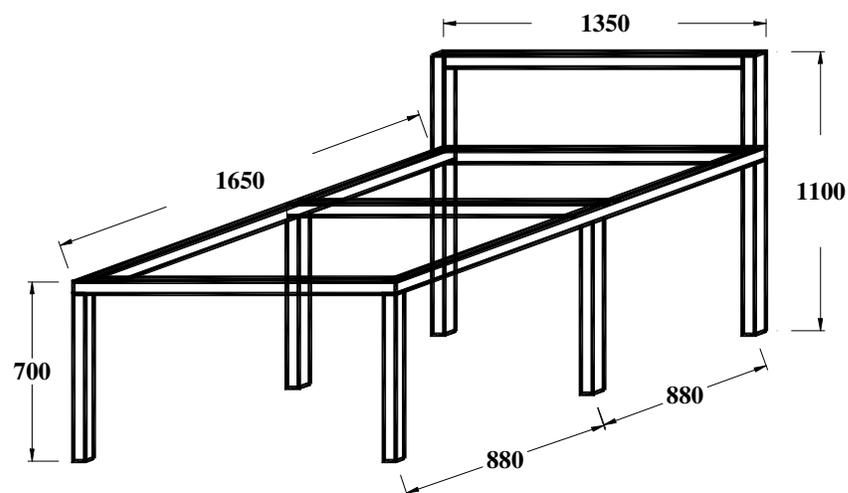
Materiales

- Tubo cuadrado de 1" x 1" en hierro galvanizado
- Soldadura
- Tornillos cromados.
- Tuerca
- Arandela plana

Construcción

Este aparato se construyó en tubo cuadrado de 1" x 1" en hierro galvanizado, se cortó el tubo con las medidas calculadas que posteriormente se unieron con soldadura, a continuación se macillo y se lijó las uniones para obtener una superficie lisa para luego aplicarle el anticorrosivo y el esmalte final. Esta parte tiene las mismas dimensiones del tablero y servirá de apoyo y soporte entre el tablero y el tanque de alimentación y aforo, como se muestra en la figura 32, el cual se fijará a este por medio de tornillos localizados en la base del soporte.

Figura 32. Soporte



3.2.10 Diseño del tanque de alimentación y aforo

El modelo requiere de un tanque para suministro de agua que será utilizado como tanque de descarga; en el que se medirá el caudal por medio de un vertedero.

Cuando la descarga del líquido se efectúa por encima de un muro o una placa y a superficie libre, la estructura hidráulica en la que ocurre se llama vertedor. Son utilizados intensivamente en la medición de pequeños cursos de agua y con conductos libres, así como en el control de flujo en galerías y canales.

Este aparato se diseñó con el propósito de servir de alimentador de la motobomba y a su vez de aforador de caudales.

Clasificación general de los vertederos: los vertederos tienen diferentes formas y disposiciones, siendo muchos los factores que pueden servir para su clasificación, así:

1. Forma

- Simples: rectangulares, trapezoidales, triangulares.
- Compuestos: secciones combinadas

2. Altura relativa del umbral

- Vertederos completos o libres
- Vertederos incompletos o ahogados

3. Espesor de la pared

- Vertederos de pared delgada
- Vertederos de pared gruesa

4. Longitud de la cresta

- Vertederos sin contracciones laterales
- Vertederos con contracciones laterales

Vertederos triangulares: estos vertederos hacen posible una mayor precisión en la medida de las cargas, correspondientes a caudales reducidos, generalmente son construidos en placas metálicas y tienen dos subdivisiones: totalmente contraídos y parcialmente contraídos.

Existen limitaciones para el empleo de vertederos parcialmente contraídos, estas son:

$$h/p \bullet 1.2$$

$$h/B \bullet 0.5$$

$$0.05 \bullet h \bullet 0.61 \text{ m}$$

$$p \bullet 0.09 \text{ m}$$

Cuando el vertedero es de sección triangular simétrica respecto al eje vertical y con ángulo en el vértice θ , el $\text{vd} \alpha \text{ de } X = Y \tan \theta/2$.

La ecuación del gasto es:

$$Q = K * h^{5/2} \quad \text{Ec.(30)}$$

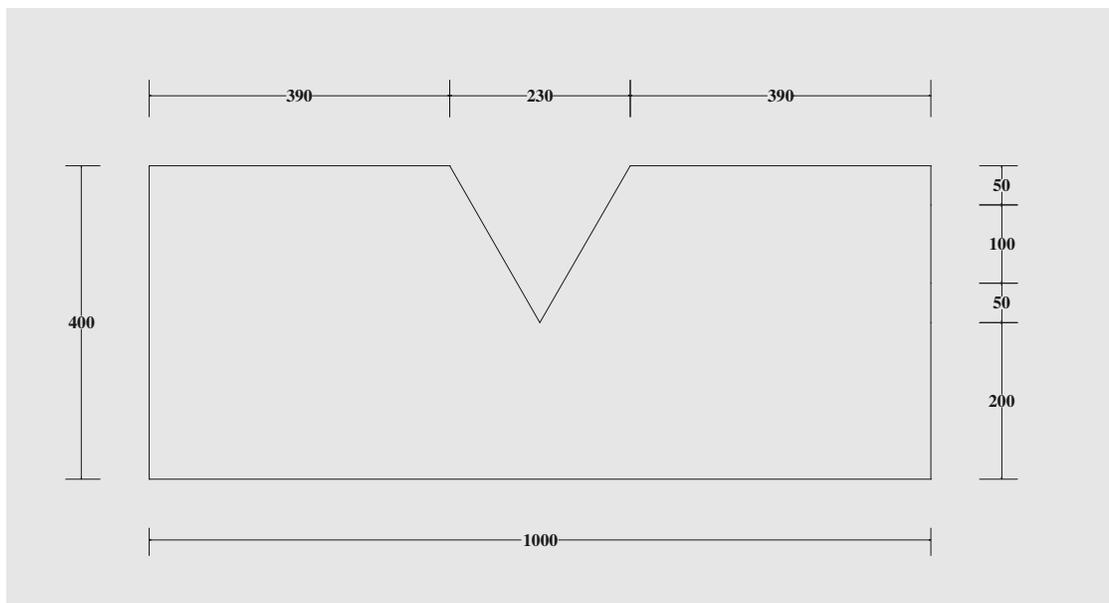
Donde :

$$K = 8/15 \cdot (2g)^3 \cdot C_d \cdot T g(\theta/2) \quad \text{Ec. (31)}$$

C_d : coeficiente de descarga

Diseño del vertedero: el modelo se construyó con un vertedero triangular ya que es el más preciso para la medición de caudales pequeños. Se escogió un ángulo $\theta = 54^\circ$.

Figura 33. Vertedero triangular



Dimensionamiento del vertedero triangular: el dimensionamiento debe cumplir con las siguientes relaciones.

$$h/p \bullet 1.2$$

$$h/B \bullet 0.5$$

$$0.05 \bullet h \bullet 0.61 \text{ m}$$

$$p \bullet 0.09 \text{ m}$$

La altura máxima se determino a partir de la formula general para calcular el gasto en vertederos triangulares: $Q = K \cdot h^{5/2}$ donde K es un coeficiente de tipo experimental y próximo a 0.60. Se tomo un caudal de 4.5 LPS, el cual es el máximo caudal que nos proporciona la motobomba.

$$h_{\text{max.}} = (Q/K)^{2/5}$$

$$h_{\text{max.}} = (0.0045/0.60)^{2/5} .$$

$$h_{\text{max.}} = 0.1413 \text{ m.} = 0.15\text{m.}$$

Como ancho del vertedero se tomo $B = 1.0 \text{ m.}$, luego:

$$h/B = 0.15 / 1.0 = 0.15$$

$$0.15 < 0.50 \text{ ok.}$$

Para $p = 0.20 \text{ m}$ y $h = 0.15$ debe cumplirse que:

$$h/p \bullet 1.2$$

$$0.15 / 0.20 = 0.75 < 1.2$$

Altura mínima del vertedero

$$H_{\min.} = p + h_{\max} + \text{francobordo}$$

$$H_{\min.} = (0.20 + 0.15 + 0.05) \text{ m.}$$

$$H_{\min.} = 0.40 \text{ m.}$$

Para calcular Cd y K se empleó las siguientes formulas:

$$Cd = \frac{15}{8} * \frac{Q}{\sqrt{(2g) * \tan(\theta/2) * H^{5/2}}}$$

$$K = \frac{8}{15} * \sqrt{(2g) * \tan(\theta/2)}$$

Cuadro 4. Coeficientes del vertedero

Q prom(lt/seg)	Cd	K	K prom.
0.2740	0.6296	0.7578	0.785
0.7005	0.6600	0.7945	
0.8118	0.6261	0.7536	
0.9046	0.5797	0.6978	
1.2031	0.6489	0.7810	
1.4445	0.6630	0.7980	
1.6617	0.6554	0.7889	
2.0235	0.6918	0.8327	
2.2980	0.6863	0.8262	
2.5859	0.6794	0.8178	

Con el factor K promedio obtenido, se procede a reemplazar en la ecuación general del gasto de los vertederos triangulares obteniéndose: $Q = 0.785 * H^{5/2}$

Dimensionamiento del tanque: su dimensionamiento se basa en la teoría de vertederos triangulares.

La finalidad de este tanque es la de suministrar el caudal necesario para la alimentación de la motobomba, con la menor turbulencia posible, mediante una cámara de aquietamiento y como tanque de aforo por medio de un vertedero triangular; además servirá como tanque de descarga para cumplir con el propósito de un circuito cerrado.

- Altura del tanque (ht)

Este parámetro de diseño se tomó igual a la altura del vertedero diseñado (40 cm), mas la altura del deposito de alimentación (20cm).

- Ancho del tanque (At)

El ancho del tanque será igual al ancho B del vertedero que es de 1.0 m.

- Longitud total del tanque (Lt)

Esta longitud es igual a la siguiente expresión:

$$L_t = L_1 + L_2 + L_3$$

Para L1 se adoptó una longitud de 0.10 m. que consideramos adecuada para realizar el aquietamiento del flujo.

La longitud L2 según French es de 3 a 4 hmax, pero por la limitación de espacio en el laboratorio se tomó:

$$L2 = 0.30\text{m.}$$

Para la longitud L3 se tiene:

$$X^n = K * h^{(n-1)} * Y$$

Donde:

n = 1.85 y K = 2.0 para las condiciones dadas según Chow.

$$L3 = (K * h^{(n-1)} * Y)^{(1/n)}$$

$$L3 = (2.0 * 0.15^{(1.85-1)} * 0.20)^{(1/1.85)}$$

$$L3 = 0.24 \text{ m}$$

Por construcción y espacio se tomó una dimensión de L3 = 0.15m.

Como longitud total se tiene:

$$Lt = L1 + L2 + L3$$

$$Lt = 0.10 + 0.30 + 0.15$$

$$Lt = 0.65 \text{ m. (Ver figura 35)}$$

Cámara de quietamiento: la finalidad de la cámara es aquietar el flujo en el tanque para disminuir la turbulencia causada por la descarga de la tubería, reduciendo la velocidad del agua.

Para lograr una buena repartición del flujo se adopta un tabique con orificios. El número y tamaño de orificios se calcula para obtener una velocidad de entrada no mayor de 0.30m/s.

Área de orificios

$$A = Q / V$$

$$A = 0.0045 \text{ m}^3/\text{s} / 0.30 \text{ m/s}$$

$$A = 0.015 \text{ m}^2$$

Estimando un coeficiente de contracción igual a 0.61, por contracción de la vena líquida tenemos que:

$$A. \text{ neta} = A. \text{ chorro} / A. \text{ total} = 0.61$$

Por lo tanto el área de orificios se incrementara así:

$$A. \text{ real} = 0.015 \text{ m}^2 / 0.61$$

$$A. \text{ real} = 0.0246 \text{ m}^2$$

Para hallar el número n de orificios, adoptamos un diámetro de orificios de ½ pulgada igual a 0.0127 m.

$$A. \text{ total} = n * \bullet * D^2 / 4$$

$$n = 4 At / (\bullet * D^2)$$

$$n = 4 * 0.0246 \text{ m}^2 / \bullet * (0.0127)^2$$

$$n = 194.2 \bullet 200$$

Como la sección a través de la cual circulará el flujo es bastante amplia y el caudal es considerable se toma 200 orificios con el fin de lograr una mejor distribución del líquido y una mayor eficiencia para la cámara de quietamiento.

Distribución: se dispondrán veinte columnas con diez orificios cada una, así, la distribución para las filas sería la siguiente: $n(A + t) = L$; donde:

A = espaciamiento

t = diámetro de orificios

n = número de orificios

L = longitud

$$A = (L / n) - t$$

$$A = (1 / 20) - 0.0127$$

$$A = 0.0373 \text{ m}$$

$$A + t = 0.05 \text{ m}$$

$$(A + t) / 2 = 0.025 \text{ m}$$

Para las columnas en una altura de 0.30 m. se tiene la siguiente distribución;

$$A = (L / n) - t$$

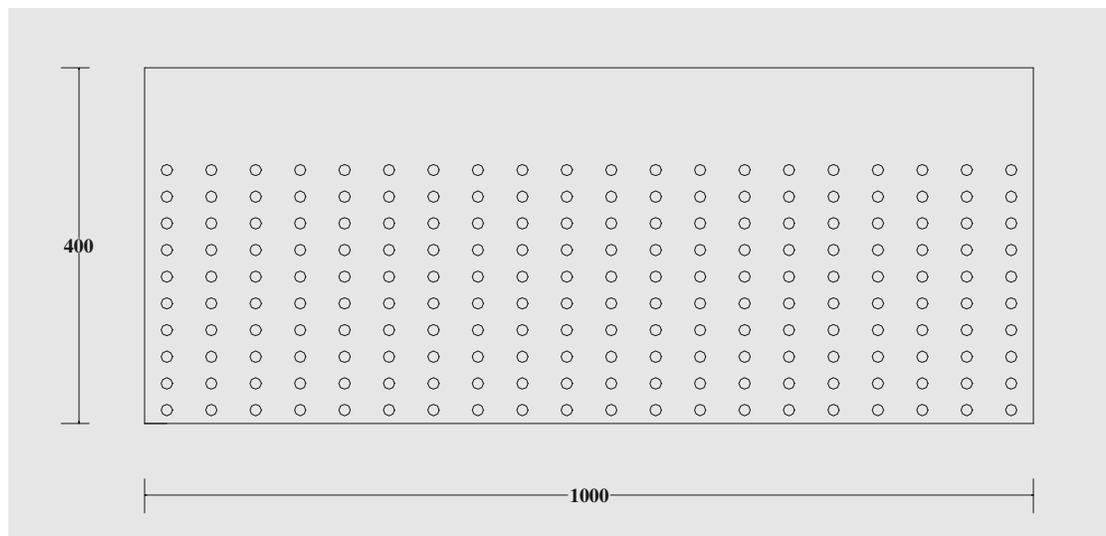
$$A = (0.30 / 10) - 0.0127$$

$$A = 0.0173 \text{ m}$$

$$A + t = 0.03 \text{ m}$$

$$(A + t) / 2 = 0.015 \text{ m (ver figura 34)}$$

Figura 34. Cámara de aquietamiento



El tanque de alimentación se construyó con base en las medidas obtenidas para el vertedero $B = 100 \text{ cm}$ y $L = 55 \text{ cm}$. El volumen del tanque es función del tiempo de retención y del caudal proporcionado por la motobomba (5.5 l/s).

El tiempo de retención es el tiempo que tarda el agua en recorrer todo el circuito; para este caso se asume en 7 segundos.

$$\text{Vol. tanque} = Q * t = 0.0055 \text{ m}^3/\text{s} * 7 \text{ s} = 0.0385 \text{ m}^3$$

$$\text{Altura del tanque} = \text{Vol. Tanque} / \text{Área} = 0.0385 \text{ m}^3 / (1 * 0.55) = 0.07 \text{ m}$$

Se tomó una altura de 7 cm desde el fondo del tanque hasta el tubo de succión, para evitar que los sedimentos entren a la motobomba.

$$\text{Altura total del deposito} = 7\text{cm} + 7\text{cm} = 14 \text{ cm}; \text{ por construcción se tomo } 20 \text{ cm.}$$

Para evitar la entrada de aire al sistema de succión de la motobomba producida por la caída de agua del vertedero se incrementa el volumen de 0.0385 m^3 por encima de la altura total del deposito, a una altura igual:

$$h = V/A = 0.0385 \text{ m}^3 / (1*0.15) = 0.26 \text{ m}$$

Materiales

- Tubo perfil cuadrado de 1" x 1" calibre 18
- Lamina calibre 18
- Soldadura
- Pintura anticorrosiva
- Esmalte azul
- Niple de 1 ½" en HG de 7 cm

Construcción

Con los datos obtenidos en el cálculo del tanque de aforo y alimentación se procedió a cortar y doblar la lamina con sus respectivas medidas, para posteriormente soldar las partes y armar el tanque. Luego fue recubierto con pintura anticorrosiva que a su vez sirvió de base para la aplicación del esmalte de color azul. Para soportar el tanque se adaptaron cuatro tubos cuadrados de lamina en los extremos, con un sistema de nivelación; para desalojar el tanque se le adaptó a este una válvula de $\frac{1}{2}$ ".

Figura 35. Dimensiones tanque

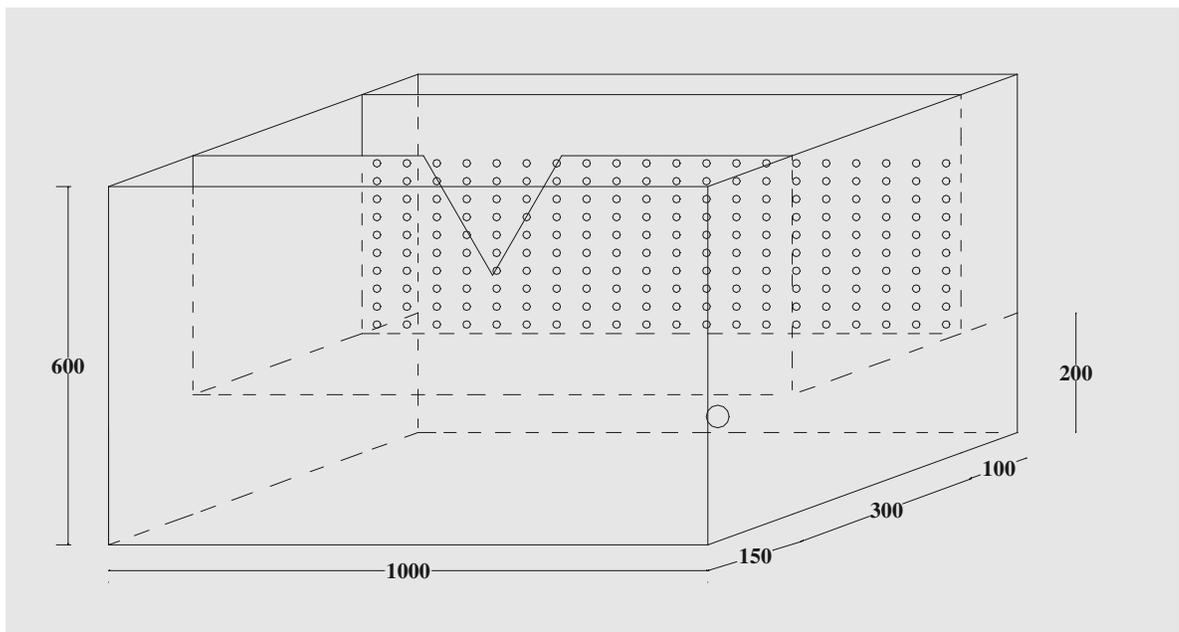
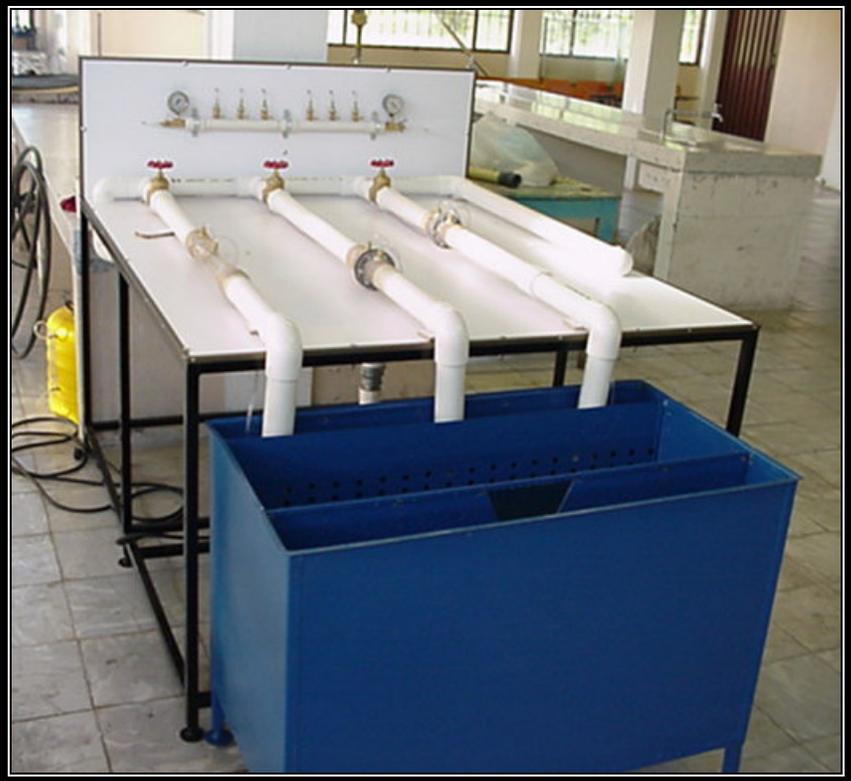


Figura 36. Vista tanque terminado



Figura 37. Banco de pruebas



4. ANALISIS Y PATRONAMIENTO

4.1 CALIBRACIÓN VERTEDERO TRIANGULAR 54°

La calibración se hizo mediante aforos volumétricos tomados a diferentes alturas de H, obteniéndose los siguientes datos.

Cuadro 5. Datos calibración vertedero

CALIBRACION DEL VERTEDERO					
AFORO No.	H (mt)	V (lt)	t (seg)	t.prom(seg)	Q (lt/seg)
1	0.042	1.220	4.45	4.015	0.2742
		0.980	3.58		0.2737
2	0.06	2.380	3.44	2.93	0.6919
		1.690	2.41		0.7012
		2.083	2.94		0.7085
3	0.065	1.870	2.31	2.783	0.8095
		2.440	3.01		0.8106
		2.470	3.03		0.8152
4	0.07	2.036	2.22	2.56	0.9171
		2.385	2.66		0.8966
		2.520	2.8		0.9000
5	0.075	1.970	1.59	1.905	1.2390
		2.310	1.92		1.2031
		2.480	2.11		1.1754
		2.390	2		1.1950
6	0.08	2.385	1.67	1.507	1.4281
		1.825	1.27		1.4370
		2.320	1.58		1.4684
7	0.085	2.690	1.63	1.353	1.6503
		1.900	1.16		1.6379
		2.155	1.27		1.6969
8	0.09	2.130	1.04		2.0481
		2.710	1.34		2.0224

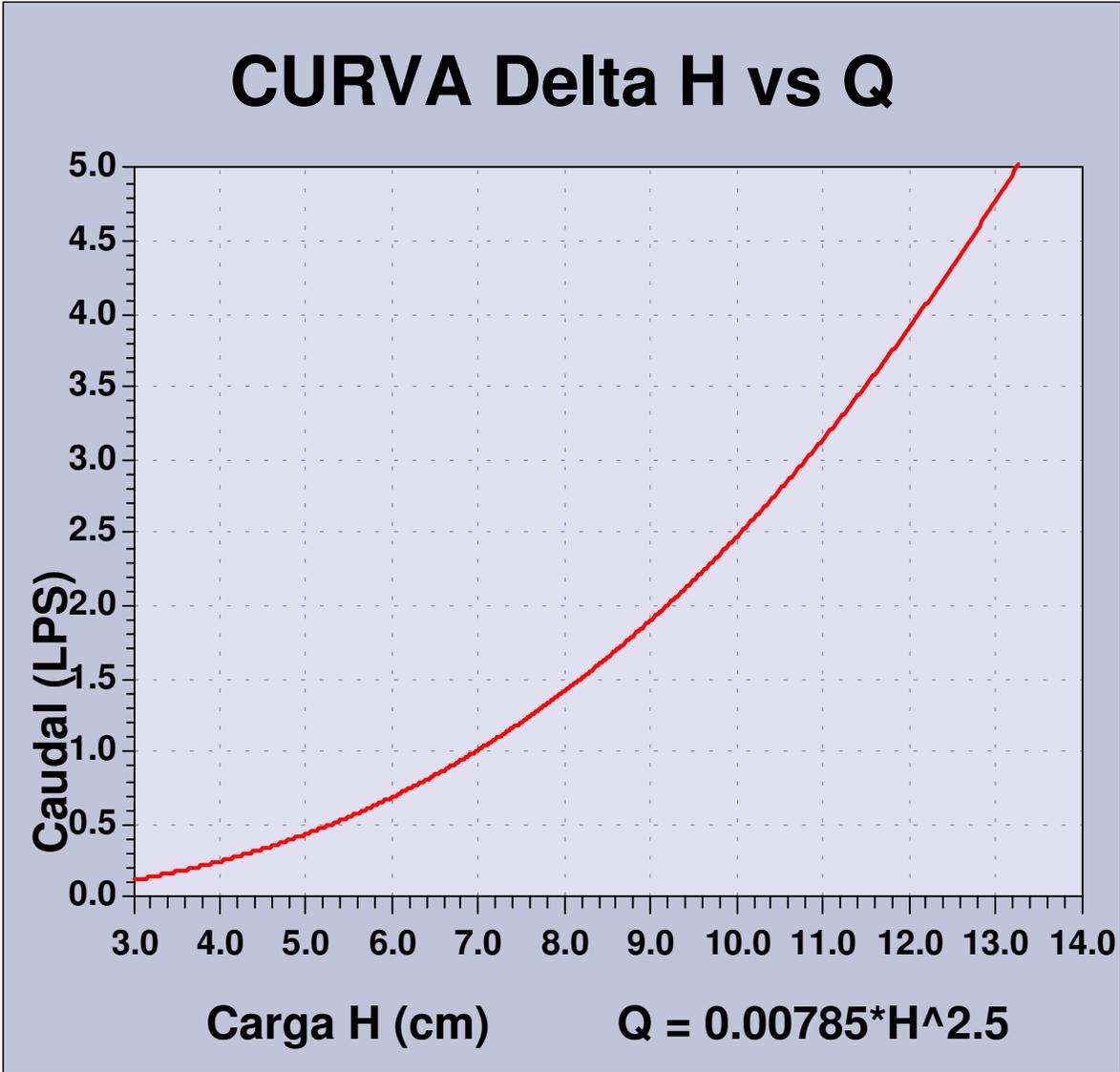
		2.900	1.45	1.277	2.0000
9	0.095	2.130	0.92	1.09	2.3152
		2.680	1.18		2.2712
		2.700	1.17		2.3077
10	0.1	2.430	0.97	1.025	2.5052
		2.880	1.08		2.6667

Con los datos de esta tabla se procede a sacar la ecuación que más se ajuste con la respectiva curva de calibración del vertedero (figura 38), sacando de esta curva los caudales que se pueden medir en el vertedero con sus respectivas alturas las cuales irán ubicadas en el tanque así:

Cuadro 6. Tabla Carga hidráulica vs. Caudal

Carga vertedero H (cm)	Caudal LPS
5.00	0.439
5.50	0.557
6.00	0.692
6.50	0.846
7.00	1.018
7.50	1.209
8.00	1.421
8.50	1.654
9.00	1.908
9.50	2.184
10.0	2.482
10.5	2.804
11.0	3.150
11.5	3.521
12.0	3.916
12.5	4.337
13.0	4.783
13.5	5.257

Figura 38. Curva calibración del vertedero



4.2 CALIBRACION DE DISPOSITIVOS

El patronamiento de estos dispositivos se realizó, tomando datos de presión a diferentes caudales los cuales se hicieron variar mediante una válvula de compuerta ubicada aguas arriba del dispositivo; con estos datos y aplicando la ecuación $Q = K * H^m$ para calibración de este tipo de dispositivos, se procedieron a graficar las curvas ‘Delta H (cm Hg) vs. Caudal (LPS)’ y ‘Reynolds vs. Coeficiente de descarga (Cd)’, con la ayuda de un programa de computador se confrontaron los datos y se encontraron los respectivos coeficientes.

4.2.1 Calibración Venturi

Cuadro 7. Datos calibración venturi

CALIBRACION VENTURI								
T° °C	H.Vert. Mts	Delta H Cm Hg	Delta H Mca	Q Real Lt/seg	Cv	Cd	Viscosidad M2/seg	Reynolds
28	0.0790	3.30	0.4485	1.377	0.768	0.7935	8.39E-07	9.97E+04
28	0.0850	3.80	0.5165	1.654	0.860	0.8879	8.39E-07	1.07E+05
28	0.0910	4.40	0.5981	1.961	0.947	0.9786	8.39E-07	1.15E+05
28	0.0970	5.10	0.6932	2.300	1.032	1.0663	8.39E-07	1.24E+05
23	0.1000	6.00	0.8155	2.482	1.027	1.0608	9.40E-07	1.20E+05
28	0.1000	6.20	0.8427	2.482	1.010	1.0436	8.39E-07	1.37E+05
28	0.1020	5.70	0.7748	2.608	1.107	1.1436	8.39E-07	1.31E+05
23	0.1029	6.70	0.9107	2.666	1.044	1.0783	9.40E-07	1.27E+05
28	0.1050	6.40	0.8699	2.804	1.124	1.1604	8.39E-07	1.39E+05
28	0.1055	7.10	0.9650	2.838	1.079	1.1149	8.39E-07	1.46E+05
23	0.1060	7.00	0.9514	2.872	1.100	1.1362	9.40E-07	1.30E+05

23	0.1085	8.10	1.1010	3.044	1.084	1.1196	9.40E-07	1.39E+05
28	0.1100	8.50	1.1553	3.150	1.095	1.1311	8.39E-07	1.60E+05
23	0.1118	9.40	1.2777	3.281	1.085	1.1201	9.40E-07	1.50E+05
28	0.1140	10.4	1.4136	3.445	1.083	1.1181	8.39E-07	1.77E+05
23	0.1143	10.7	1.4544	3.467	1.074	1.1095	9.40E-07	1.60E+05
23	0.1170	12.0	1.6311	3.676	1.075	1.1107	9.40E-07	1.70E+05
24	0.1199	13.3	1.8078	3.908	1.086	1.1216	9.19E-07	1.83E+05
24	0.1210	14.2	1.9301	3.998	1.075	1.1106	9.19E-07	1.89E+05
28	0.1216	14.4	1.9573	4.048	1.081	1.1165	8.39E-07	2.08E+05
24	0.1236	15.6	2.1204	4.216	1.082	1.1174	9.19E-07	1.98E+05
28	0.1240	15.9	2.1611	4.250	1.080	1.1158	8.39E-07	2.19E+05
24	0.1250	16.9	2.2971	4.337	1.069	1.1042	9.19E-07	2.06E+05
28	0.1255	16.8	2.2835	4.380	1.083	1.1186	8.39E-07	2.25E+05
24	0.1265	17.7	2.4058	4.468	1.076	1.1116	9.19E-07	2.11E+05
29	0.1272	18.0	2.4466	4.530	1.082	1.1176	8.21E-07	2.38E+05
24	0.1279	18.5	2.5145	4.592	1.082	1.1177	9.19E-07	2.15E+05
24	0.1282	19.1	2.5961	4.619	1.071	1.1064	9.19E-07	2.19E+05
29	0.1285	19.1	2.5961	4.647	1.078	1.1129	8.21E-07	2.45E+05
24	0.1290	19.7	2.6776	4.692	1.071	1.1065	9.19E-07	2.22E+05
29	0.1296	19.9	2.7048	4.747	1.078	1.1138	8.21E-07	2.50E+05
24	0.1298	20.4	2.7728	4.765	1.069	1.1043	9.19E-07	2.26E+05
29	0.1300	20.4	2.7728	4.783	1.073	1.1086	8.21E-07	2.53E+05
24	0.1302	20.5	2.7864	4.802	1.075	1.1101	9.19E-07	2.27E+05
24	0.1306	20.8	2.8272	4.839	1.075	1.1106	9.19E-07	2.28E+05
29	0.1309	20.7	2.8136	4.867	1.084	1.1197	8.21E-07	2.55E+05

Figura 39. Curva de calibración ΔH vs. Caudal

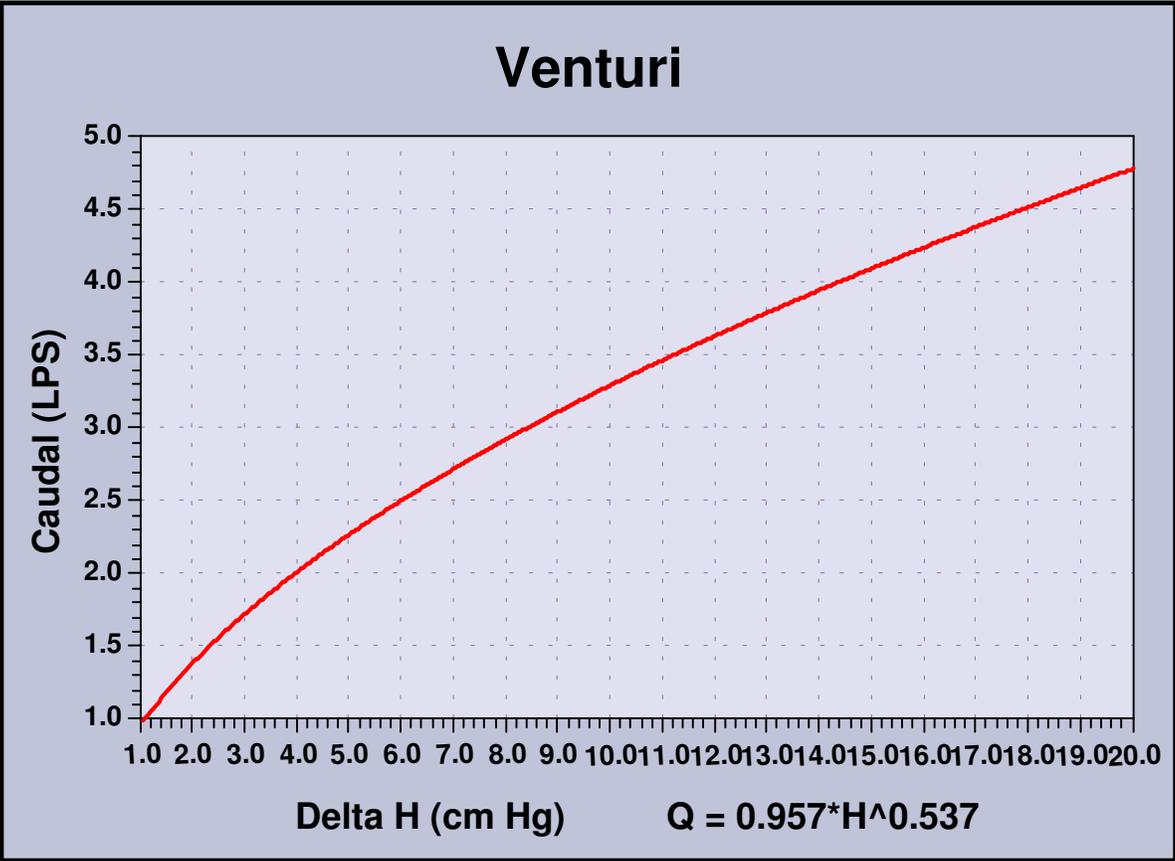
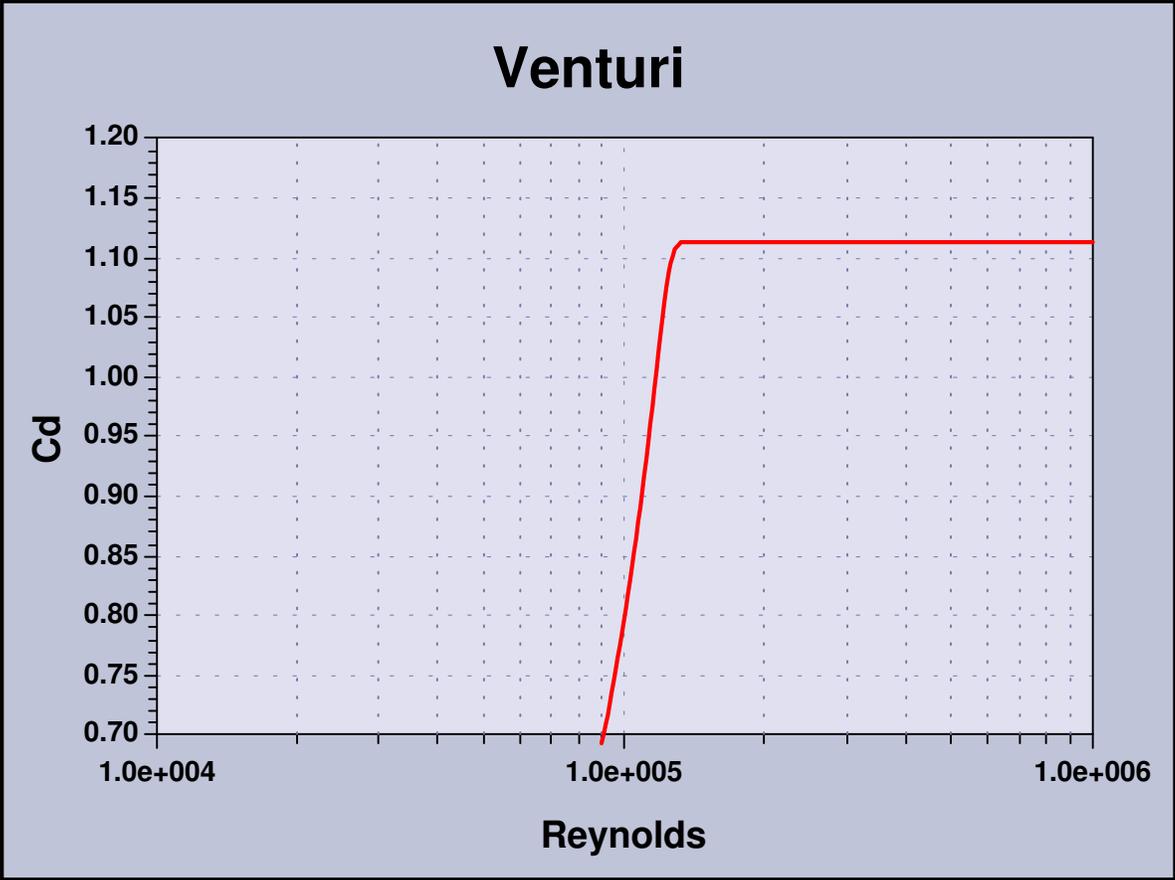


Figura 40. Curva Reynolds vs. coeficiente de descarga Cd



4.2.2 Calibración Tobera

Cuadro 8. Datos calibración tobera

CALIBRACION TOBERA								
T° °C	H.Vert. mts	Delta H Cm Hg	Delta H Mca	Q Real LPS	Cv	Cd	Viscosidad m2/seg	Reynolds
17	0.0690	2.20	0.2990	0.982	0.671	0.6928	1.09E-06	6.27E+04
17	0.0720	2.50	0.3398	1.092	0.700	0.7229	1.09E-06	6.68E+04
25	0.0730	1.90	0.2583	1.130	0.831	0.8583	8.97E-07	7.07E+04
25	0.0818	2.90	0.3942	1.502	0.894	0.9234	8.97E-07	8.74E+04
25	0.0888	4.00	0.5437	1.845	0.935	0.9654	8.97E-07	1.03E+05
17	0.0930	4.10	0.5573	2.071	1.036	1.0704	1.09E-06	8.56E+04
18	0.0940	4.50	0.6116	2.127	1.016	1.0494	1.06E-06	9.20E+04
25	0.0947	5.40	0.7340	2.166	0.945	0.9759	8.97E-07	1.19E+05
18	0.0990	6.00	0.8155	2.421	1.002	1.0345	1.06E-06	1.06E+05
25	0.0998	6.80	0.9243	2.470	0.960	0.9915	8.97E-07	1.34E+05
26	0.1000	6.00	0.8155	2.482	1.027	1.0608	8.77E-07	1.29E+05
18	0.1040	8.00	1.0874	2.738	0.981	1.0133	1.06E-06	1.23E+05
27	0.1050	7.40	1.0058	2.804	1.045	1.0791	8.58E-07	1.46E+05
27	0.1070	8.20	1.1146	2.940	1.041	1.0747	8.58E-07	1.54E+05
19	0.1090	9.90	1.3456	3.079	0.992	1.0244	1.04E-06	1.40E+05
19	0.1105	10.9	1.4815	3.186	0.978	1.0102	1.04E-06	1.47E+05
27	0.1105	9.90	1.3456	3.186	1.026	1.0600	8.58E-07	1.69E+05
26	0.1110	11.5	1.5631	3.222	0.963	0.9947	8.77E-07	1.78E+05
27	0.1120	10.5	1.4272	3.295	1.031	1.0646	8.58E-07	1.74E+05
19	0.1125	12.1	1.6446	3.332	0.971	1.0028	1.04E-06	1.55E+05
26	0.1130	12.6	1.7126	3.3695	0.962	0.9936	8.77E-07	1.86E+05
27	0.1140	11.2	1.5223	3.4445	1.043	1.0774	8.58E-07	1.80E+05
27	0.1150	11.9	1.6175	3.5206	1.034	1.0683	8.58E-07	1.85E+05
26	0.1155	13.5	1.8349	3.5590	0.982	1.0139	8.77E-07	1.93E+05
27	0.1160	12.7	1.7262	3.5976	1.023	1.0567	8.58E-07	1.91E+05
19	0.1170	14.6	1.9844	3.6757	0.975	1.0070	1.04E-06	1.70E+05
27	0.1175	13.0	1.7670	3.7150	1.044	1.0786	8.58E-07	1.93E+05
26	0.1175	14.6	1.9844	3.7150	0.985	1.0177	8.77E-07	2.01E+05
27	0.1180	13.7	1.8621	3.7547	1.028	1.0619	8.58E-07	1.99E+05
19	0.1190	15.8	2.1476	3.8348	0.978	1.0099	1.04E-06	1.77E+05
28	0.1190	14.0	1.9029	3.8348	1.039	1.0728	8.58E-07	2.01E+05
26	0.1199	16.1	2.1883	3.9077	0.987	1.0194	8.77E-07	2.11E+05
19	0.1205	16.7	2.2699	3.9567	0.981	1.0135	1.04E-06	1.82E+05
28	0.1210	15.0	2.0388	3.9979	1.046	1.0805	8.39E-07	2.12E+05

28	0.1215	15.4	2.0932	4.0393	1.043	1.0775	8.39E-07	2.15E+05
28	0.1220	15.9	2.1611	4.0810	1.037	1.0713	8.39E-07	2.19E+05
20	0.1225	17.9	2.4330	4.1230	0.988	1.0201	1.01E-06	1.93E+05
26	0.1225	17.9	2.4330	4.1230	0.988	1.0201	8.77E-07	2.22E+05
20	0.1240	18.6	2.5281	4.2503	0.999	1.0316	1.01E-06	1.97E+05
29	0.1240	17.0	2.3107	4.2503	1.045	1.0791	8.21E-07	2.31E+05
26	0.1245	19.2	2.6097	4.2933	0.993	1.0256	8.77E-07	2.30E+05
20	0.1250	19.4	2.6369	4.3366	0.998	1.0306	1.01E-06	2.01E+05
29	0.1250	17.7	2.4058	4.3366	1.045	1.0790	8.04E-07	2.41E+05
26	0.1252	19.9	2.7048	4.3539	0.989	1.0217	8.77E-07	2.34E+05
20	0.1260	20.3	2.7592	4.4238	0.995	1.0278	1.01E-06	2.05E+05
26	0.1260	20.7	2.8136	4.4238	0.985	1.0178	8.77E-07	2.39E+05
20	0.1269	21.0	2.8543	4.5032	0.996	1.0286	1.01E-06	2.09E+05
27	0.1269	21.1	2.8679	4.5032	0.994	1.0262	8.58E-07	2.46E+05
20	0.1270	21.4	2.9087	4.5121	0.989	1.0210	1.01E-06	2.11E+05
27	0.1271	21.7	2.9495	4.5210	0.984	1.0159	8.58E-07	2.50E+05
20	0.1280	22.0	2.9903	4.6014	0.994	1.0269	1.01E-06	2.14E+05
27	0.1280	22.2	3.0174	4.6014	0.990	1.0223	8.58E-07	2.53E+05
27	0.1285	22.5	3.0582	4.6465	0.993	1.0254	8.58E-07	2.54E+05
21	0.1288	22.4	3.0446	4.6737	1.001	1.0337	9.86E-07	2.21E+05
21	0.1290	22.6	3.0718	4.6918	1.000	1.0331	9.86E-07	2.22E+05
27	0.1294	23.3	3.1670	4.7283	0.993	1.0254	8.58E-07	2.59E+05
21	0.1299	23.2	3.1534	4.7741	1.005	1.0375	9.86E-07	2.25E+05
21	0.1300	23.5	3.1941	4.7833	1.000	1.0329	9.86E-07	2.26E+05
27	0.1300	23.5	3.1941	4.7833	1.000	1.0329	8.58E-07	2.60E+05
21	0.1303	23.7	3.2213	4.8109	1.002	1.0344	9.86E-07	2.27E+05
27	0.1303	23.6	3.2077	4.8109	1.004	1.0366	8.58E-07	2.61E+05
21	0.1306	23.8	3.2349	4.8387	1.005	1.0382	9.86E-07	2.28E+05
27	0.1308	23.7	3.2213	4.8572	1.011	1.0444	8.58E-07	2.61E+05
30	0.1312	22.5	3.0582	4.8945	1.046	1.0801	8.58E-07	2.54E+05
30	0.1320	23.2	3.1534	4.9694	1.046	1.0800	8.58E-07	2.58E+05

Figura 41. Curva de calibración ΔH vs. Caudal

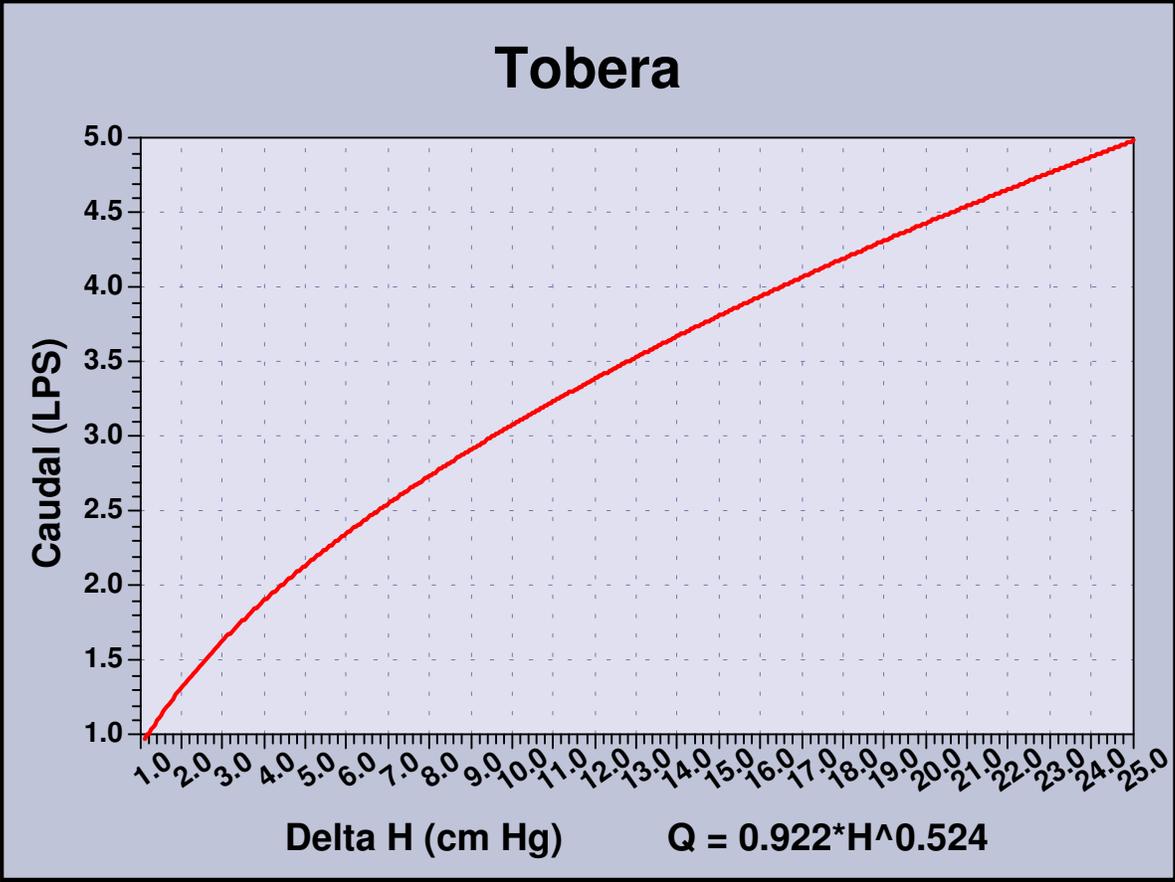
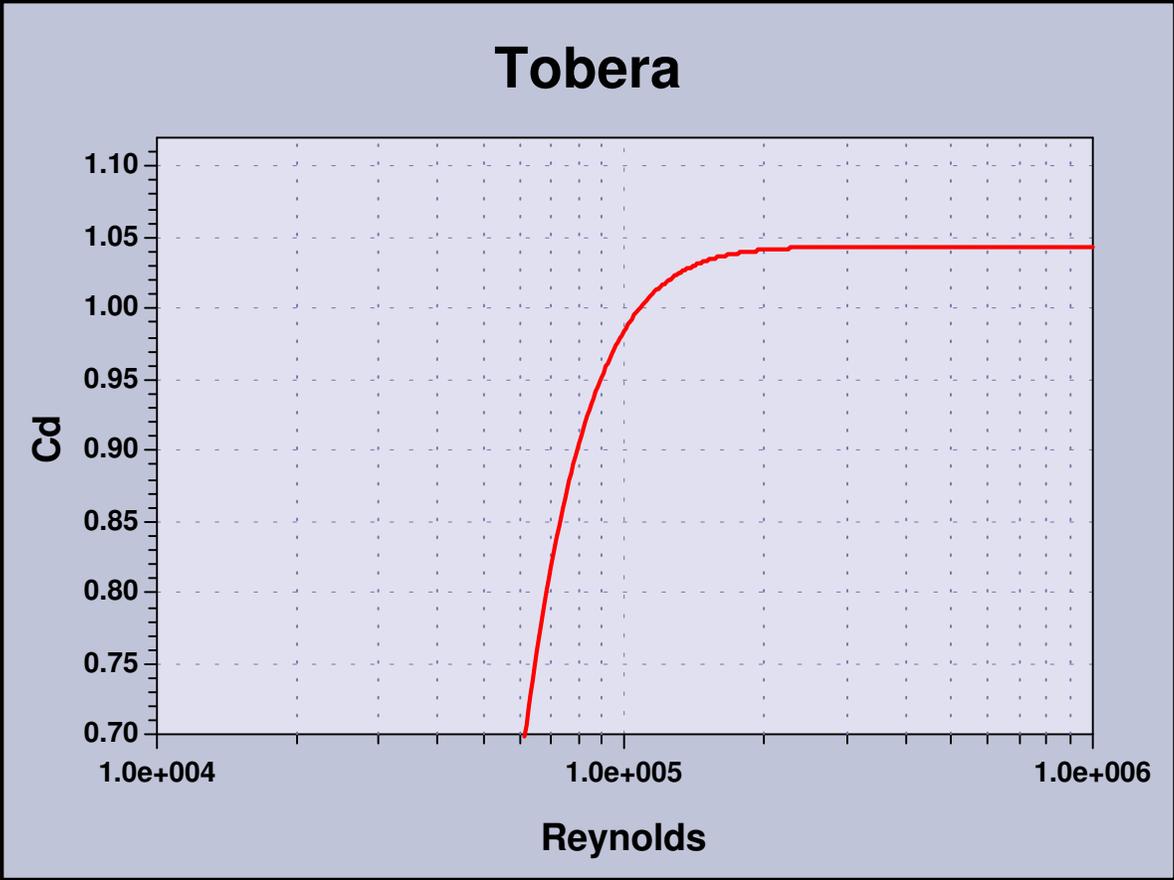


Figura 42. Curva Reynolds vs. coeficiente de descarga Cd



4.2.3 Calibración Diafragma

Cuadro 9. Datos calibración diafragma

CALIBRACION DIAFRAGMA									
T° °C	H.Vert. Mts	Delta H cm Hg	Delta H Mca	Q Real LPS	Cv	Cd	Cc	Viscosidad m2/seg	Reynolds
25	0.0718	3.70	0.5029	1.0844	0.940	0.583	0.62	8.97E-07	9.67E+04
25	0.0758	4.60	0.6252	1.2418	0.966	0.599	0.62	8.97E-07	1.08E+05
29	0.0760	4.80	0.6524	1.2500	0.952	0.590	0.62	8.21E-07	1.20E+05
25	0.0790	5.70	0.7748	1.3770	0.962	0.596	0.62	8.97E-07	1.20E+05
29	0.0799	6.00	0.8155	1.4166	0.965	0.598	0.62	8.21E-07	1.35E+05
25	0.0880	9.50	1.2913	1.8033	0.956	0.593	0.62	8.97E-07	1.58E+05
20	0.0900	10.3	1.4000	1.9076	0.972	0.602	0.62	1.01E-06	1.46E+05
20	0.0910	10.8	1.4679	1.9610	0.975	0.605	0.62	1.01E-06	1.50E+05
29	0.0918	11.6	1.5767	2.0044	0.962	0.596	0.62	8.21E-07	1.91E+05
21	0.0920	11.2	1.5223	2.0153	0.984	0.610	0.62	9.86E-07	1.56E+05
21	0.0930	11.8	1.6039	2.0705	0.985	0.611	0.62	9.86E-07	1.60E+05
21	0.0947	12.8	1.7398	2.1664	0.990	0.614	0.62	9.86E-07	1.67E+05
21	0.0950	13.4	1.8213	2.1836	0.975	0.605	0.62	9.86E-07	1.71E+05
22	0.0960	14.0	1.9029	2.2415	0.979	0.607	0.62	9.63E-07	1.79E+05
22	0.0970	14.8	2.0116	2.3004	0.977	0.606	0.62	9.63E-07	1.84E+05
22	0.0978	15.5	2.1068	2.3481	0.975	0.604	0.62	9.63E-07	1.88E+05
22	0.0990	16.2	2.2019	2.4208	0.983	0.610	0.62	9.63E-07	1.92E+05
22	0.1010	17.3	2.3514	2.5449	1.000	0.620	0.62	9.63E-07	1.99E+05
22	0.1020	18.3	2.4874	2.6084	0.997	0.618	0.62	9.63E-07	2.04E+05
22	0.1030	19.4	2.6369	2.6728	0.992	0.615	0.62	9.63E-07	2.11E+05
23	0.1040	20.2	2.7456	2.7381	0.996	0.617	0.62	9.40E-07	2.20E+05
23	0.1049	21.1	2.8679	2.7977	0.996	0.617	0.62	9.40E-07	2.25E+05
23	0.1060	22.7	3.0854	2.8717	0.985	0.611	0.62	9.40E-07	2.33E+05
23	0.1070	23.5	3.1941	2.9399	0.991	0.615	0.62	9.40E-07	2.37E+05
23	0.1090	25.4	3.4524	3.0792	0.999	0.619	0.62	9.40E-07	2.47E+05
23	0.1100	26.7	3.6291	3.1503	0.997	0.618	0.62	9.40E-07	2.53E+05
23	0.1120	28.6	3.8873	3.2954	1.007	0.625	0.62	9.40E-07	2.62E+05
24	0.1130	30.0	4.0776	3.3695	1.006	0.623	0.62	9.19E-07	2.74E+05
24	0.1140	31.2	4.2407	3.4445	1.008	0.625	0.62	9.19E-07	2.80E+05
24	0.1147	32.7	4.4446	3.4977	1.000	0.620	0.62	9.19E-07	2.86E+05
24	0.1160	35.0	4.7572	3.5976	0.994	0.616	0.62	9.19E-07	2.96E+05
24	0.1170	35.9	4.8796	3.6757	1.003	0.622	0.62	9.19E-07	3.00E+05
24	0.1179	37.5	5.0970	3.7467	1.000	0.620	0.62	9.19E-07	3.07E+05
25	0.1190	38.8	5.2737	3.8348	1.006	0.624	0.62	8.97E-07	3.20E+05

25	0.1200	40.7	5.5320	3.9158	1.003	0.622	0.62	8.97E-07	3.27E+05
25	0.1210	42.0	5.7087	3.9979	1.008	0.625	0.62	8.97E-07	3.33E+05
25	0.1215	43.2	5.8718	4.0393	1.005	0.623	0.62	8.97E-07	3.37E+05
25	0.1230	45.1	6.1300	4.1652	1.014	0.629	0.62	8.97E-07	3.45E+05
25	0.1235	46.4	6.3067	4.2076	1.010	0.626	0.62	8.97E-07	3.50E+05
26	0.1248	48.3	6.5650	4.3192	1.016	0.630	0.62	8.77E-07	3.65E+05
26	0.1255	50.2	6.8232	4.3800	1.011	0.627	0.62	8.77E-07	3.72E+05
26	0.1268	52.4	7.1223	4.4944	1.015	0.629	0.62	8.77E-07	3.80E+05
26	0.1270	53.5	7.2718	4.5121	1.008	0.625	0.62	8.77E-07	3.84E+05
26	0.1279	55.4	7.5300	4.5925	1.009	0.625	0.62	8.77E-07	3.91E+05
27	0.1285	56.5	7.6795	4.6465	1.010	0.627	0.62	8.58E-07	4.03E+05
27	0.1290	57.4	7.8019	4.6918	1.012	0.628	0.62	8.58E-07	4.06E+05
27	0.1298	58.7	7.9786	4.7649	1.017	0.630	0.62	8.58E-07	4.11E+05
27	0.1300	60.2	8.1824	4.7833	1.008	0.625	0.62	8.58E-07	4.16E+05
28	0.1320	64.2	8.7261	4.9694	1.014	0.629	0.62	8.39E-07	4.40E+05

Figura 43. Curva de calibración ΔH vs. Caudal

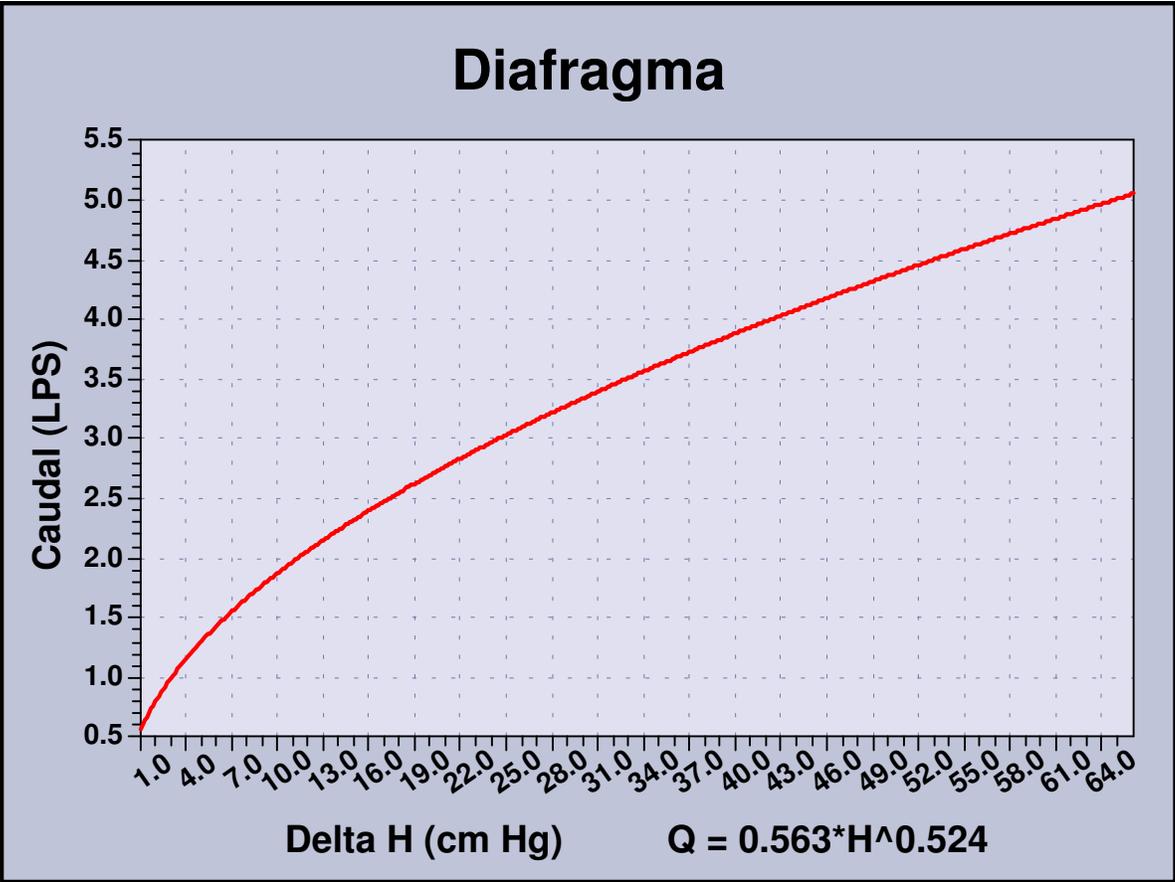
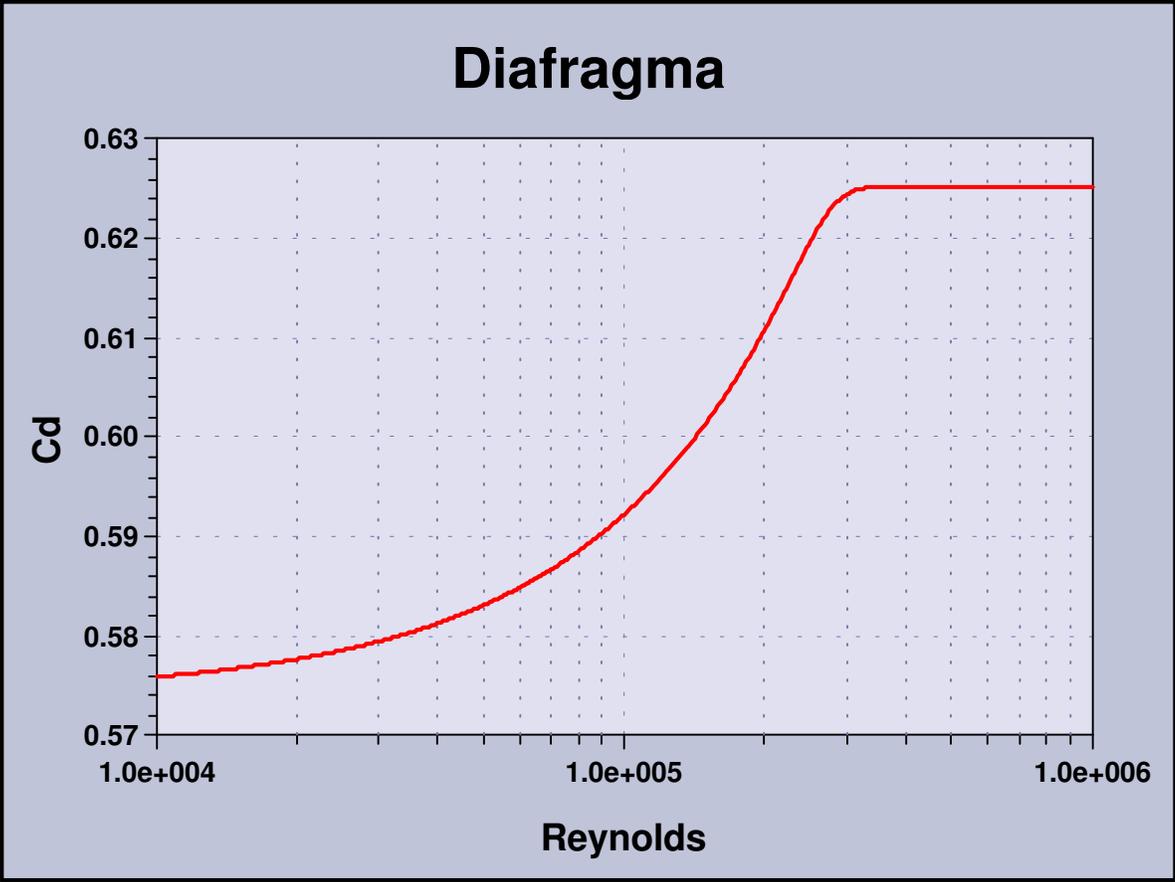


Figura 44. Curva Reynolds vs. coeficiente de descarga Cd



5. GUIA DE LABORATORIO

UNIVERSIDAD DE NARIÑO – FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN



ESTUDIO Y PATRONAMIENTO DE MEDIDORES DE CAUDAL EN CONDUCTOS A
PRESIÓN

1. OBJETIVOS

1.1 General

Capacitar al estudiante en determinar el caudal que pasa por una tubería, utilizando los dispositivos instalados en el banco de pruebas.

1.2 Específicos

Conocer tanto la tobera, el orificio, el venturi y los principios en los cuales esta fundamentado su diseño.

Practicar el uso de los manómetros acoplados a los dispositivos y comprender su relación con la medición.

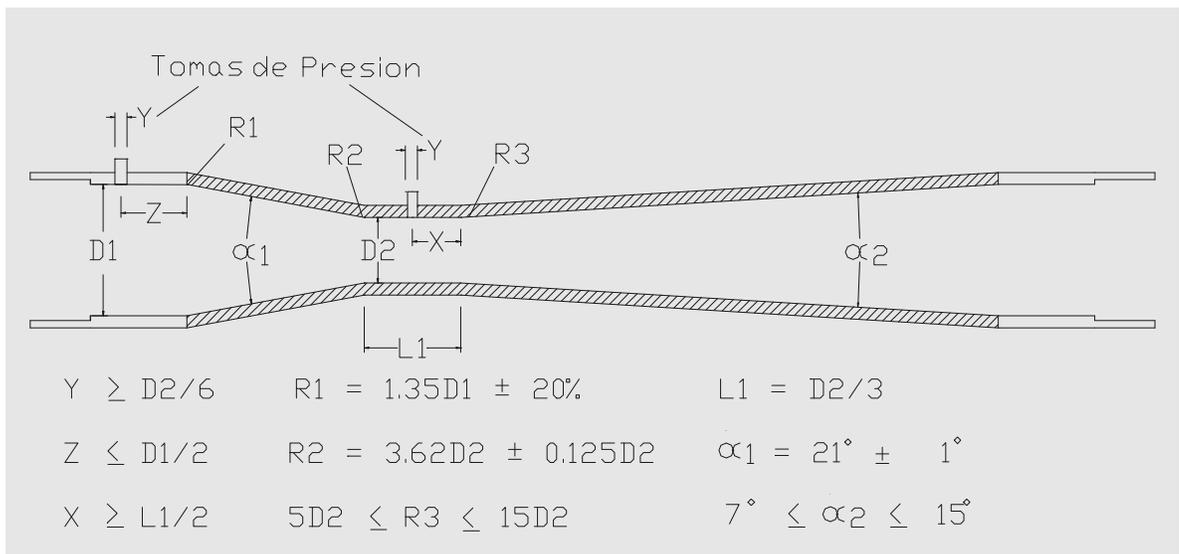
Comprender los conceptos de Coeficientes de descarga, velocidad, contracción, y determinar su valor.

2. GENERALIDADES

En las tuberías a presión es generalmente necesario conocer el caudal que está pasando en un momento dado. Con base en principios hidráulicos muy sencillos se construyen dispositivos que debidamente patronados e instalados, pueden medir el caudal con bastante precisión.

2.1 Tubos Venturi

Figura 1. Tubo venturi de ASME



Constan de tres partes principales:

- ♣ La entrada de forma cónica convergente.
- ♣ La garganta de forma cilíndrica
- ♣ El difusor de forma cónica divergente

El tubo venturi debe estar acompañado de un medidor de presión diferencial adecuado, con el fin de establecer la presión en los puntos indicados. El tubo venturi tiene una porción convergente y una porción divergente. La función de la porción convergente, es incrementar la velocidad del fluido y reducir su presión estática.

En esta forma se establece una diferencia de presiones entre la entrada y la garganta, la cual esta correlacionada con la velocidad del fluido. El difusor o cono divergente sirve para modificar el área de flujo, hasta alcanzar el área de entrada y convertir la energía cinética del fluido en energía de presión. Las pérdidas de energía por fricción en el tubo de venturi deben ser bajas como sea posible.

Ecuación del caudal

Sección (1): a la entrada del venturímetro

Sección (2): en la garganta del venturímetro

D = diámetro de la sección (1)

d = diámetro de la garganta sección (2)

Z_1 = cota del eje de la sección (1)

Z_2 = cota del eje de la sección (2)

P_1/γ = cabeza de presión en la sección (1)

P_2/γ = cabeza de presión en la sección (2)

V_1, V_2 = velocidades en las secciones (1) y (2) respectivamente.

$$h_1 = Z_1 + P_1/\gamma = \text{cota piezométrica en la sección (1)}$$

$$h_2 = Z_2 + P_2/\gamma = \text{cota piezométrica en la sección (2)}$$

$$\Delta h = h_1 - h_2 = \text{diferencia de presiones entre la entrada y la garganta}$$

Ecuación de la energía entre (1) y (2) sin considerar las pérdidas de carga o sea en condiciones teóricas:

$$Z_1 + \frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g}$$

Para tubería horizontal:

$$h_1 + \frac{V_1^2}{2g} = h_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

$$V_2^2 - V_1^2 = 2g \cdot (\Delta h)$$

Por continuidad:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 = Q$$

$$V_1 = \frac{A_2 \cdot V_2}{A_1}$$

$$V_2 = \sqrt{\frac{2g \cdot \Delta h}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}}$$

El caudal teórico:

$$Q_T = A_2 \cdot V_2 = \frac{A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{2g \cdot \Delta h}$$

La velocidad real en (2)

$$V_R = C_V \sqrt{\frac{2g \cdot \Delta h}{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}}$$

El caudal real estará dado por:

$$Q_R = A_2 \cdot V_R = \frac{C_v \cdot A_2}{\sqrt{1 - \left(\frac{A_2}{A_1}\right)^2}} \sqrt{2g \cdot \Delta h}$$

Llamando

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

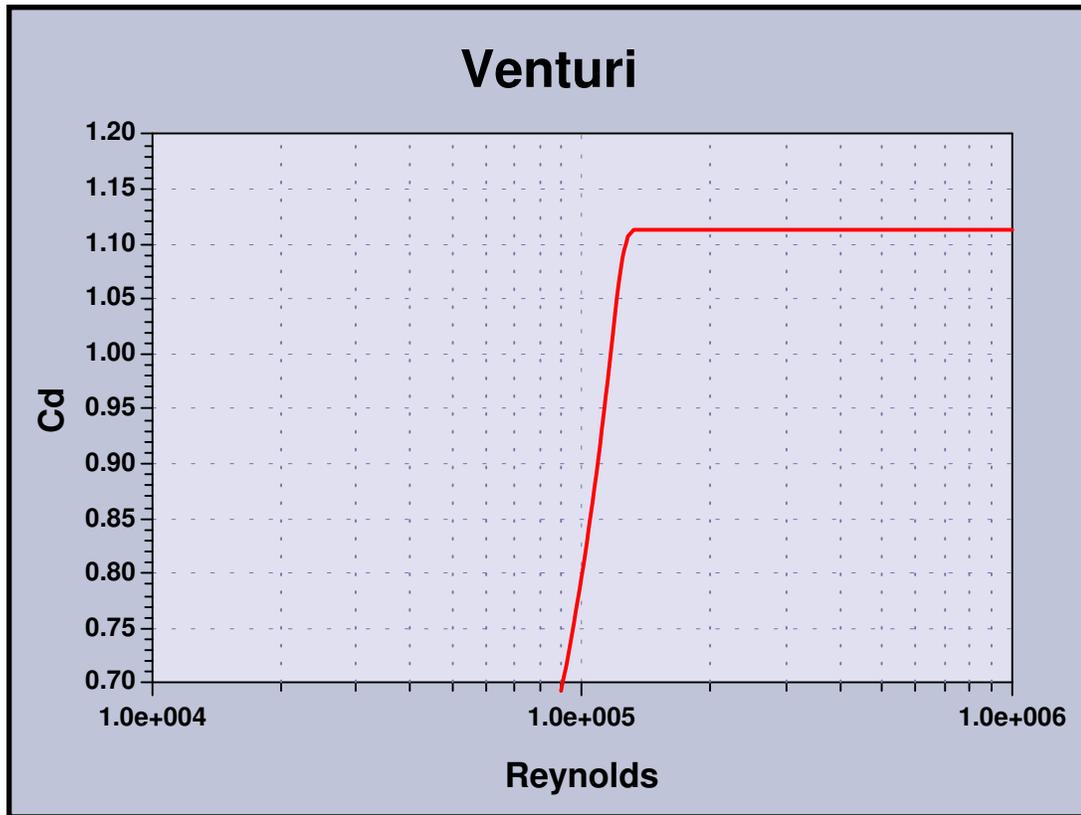
$$Q_R = C_d \cdot A_2 \sqrt{2g \cdot \Delta h}$$

El coeficiente de descarga C_d depende de:

- El grado de estrangulamiento $A_2/A_1 = (d/D)^2$
- La viscosidad del fluido.
- La rugosidad de las paredes internas del tubo.
- Del tipo de medidor Venturi.

Este coeficiente se determina experimentalmente y es característico de cada medidor el cual para valores altos del número de Reynolds tiende a ser constante.

Figura 2. Curva Reynolds vs. Cd



Requisitos de instalación

- Para instalar un tubo Venturi debe seleccionarse un punto en la tubería donde se disponga de la presión suficiente para que se produzca la diferencia de presiones Δh requerida para el caudal máximo.
- La tubería donde se instale debe tener un diámetro igual que el de la entrada del Venturi.

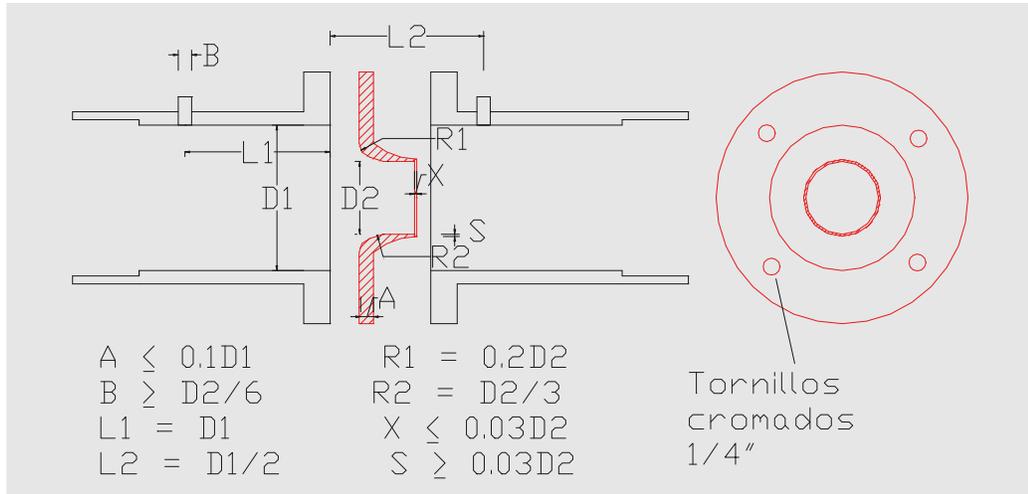
- Deben instalarse en tramos rectilíneos de $6D$ como mínimo aguas arriba y $5D$ aguas abajo.
- No debe haber accesorios en la tubería próximos al Venturi, los cuales ocasionarían perturbaciones en la uniformidad del flujo.

2.2 Toberas

Las toberas son esencialmente dispositivos venturi, en los cuales el tramo divergente ha sido omitido, por tal razón son de esperarse mayores pérdidas en las toberas; sin embargo, esta desventaja es compensada por su costo mas bajo.

La Sociedad Americana de Estándares (ISA) ha realizado extensas investigaciones sobre las toberas y recomiendan algunas dimensiones particulares como las que se presentan en la figura 3.

Figura 3. Medidor tobera ISA



Ecuación de caudal

La tobera en esencia es un tubo venturi sin el cono divergente por tal razón son validas las mismas ecuaciones de los venturímetros.

$$Q_R = C_d \cdot A_0 \sqrt{2g\Delta h}$$

$$C_d = \frac{C_v}{\sqrt{1 + \left(\frac{A_0}{A_1}\right)^2}}$$

Requisitos de instalación

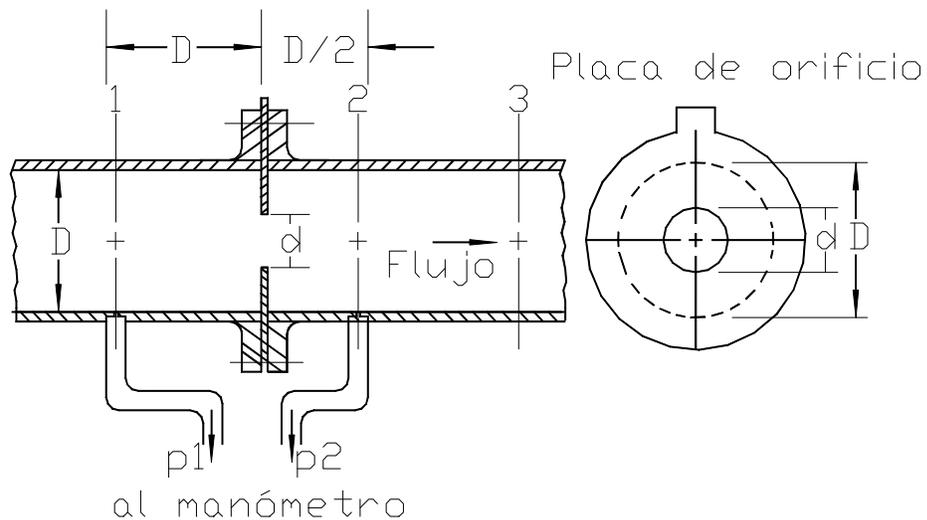
- Se recomiendan para tuberías de diámetros grandes mayores de 30 cms (12"), debido a que en estos diámetros las pérdidas son menores que en diámetros menores.

- Deben instalarse en tramos rectos de $10D$ a $40D$ de longitud aguas arriba y como mínimo $5D$ aguas abajo.

2.3 Diafragmas

Son placas con un orificio en su centro que se insertan dentro de la tubería. Se construyen en bronce o acero inoxidable con espesores desde 2.5 mm. Si se emplean placas de espesor mayor a 5 mm. los bordes del orificio deben biselarse. Su uso esta limitado a tuberías donde se permite una alta pérdida de carga en el sistema de aforo, se diferencia de una tobera porque la sección de área mínima no se presenta en el tubo sino aguas abajo de la contracción debido a la formación de una vena contracta.

Figura 4. Diafragma



Requisitos de instalación

- Los diafragmas deben instalarse donde la pérdida de carga no sea una limitante debido a que es bastante alta.
- La relación entre el diámetro D_o del orificio y el de la tubería D donde se instale, debe estar entre 0.80 y 0.30.
- Deben ubicarse en tramos rectilíneos ya sean horizontales o verticales.
- Antes y después del diafragma no deben existir aditamentos que causen perturbación en el flujo. La longitud mínima libre se da en la Tabla 1.

Cuadro 1. Longitud mínima libre de instalación de los diafragmas

RELACIÓN DE DIÁMETROS	LONGITUD LIBRE DE ADIMENTOS	
D_o orificio/ D tubo	AGUAS ABAJO	AGUAS ARRIBA
0.80	20.D	5.D
0.70	12.D	4.D
0.50	7.D	3.5.D
0.30	3.D	3.D

Ecuación del caudal

Aplicando Bernoulli desde la sección 1 hasta la vena contracta, sección 2:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g}$$

La ecuación de continuidad relaciona V_1 y V_2 con el coeficiente de contracción

$$C_c = A_2/A_0 \quad \text{así:}$$

$$A_1 V_1 = C_c A_2 V_2 = Q$$

$$V_{2t} = \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1 - C_c^2 (A_0/A_1)^2}}$$

Multiplicando por C_v para obtener la velocidad real en la vena contracta:

$$V_R = C_v \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1 - C_c^2 (A_0/A_1)^2}}$$

Y finalmente, multiplicando por el área del chorro, $C_c A_0$, se encuentra el caudal real Q en el cual $C_d = C_v \cdot C_c$:

$$Q = C_d A_0 \sqrt{\frac{2g\Delta h}{1 - C_c^2 (A_0/A_1)^2}}$$

$C_c = A_2/A_0 =$ Coeficiente de contracción

$C_v =$ Coeficiente de velocidad

$C_d = C_c * C_v =$ Coeficiente de descarga

En los diafragmas no es posible localizar la toma piezométrica correspondiente a la sección (2) exactamente en la sección de la vena contracta, por tal razón se localiza a una proporción fija del diámetro del tubo aguas abajo de la placa del diafragma. La conexión en la sección (1) se localiza a 1 diámetro (1D) aguas arriba de la placa.

La ecuación de patronamiento de estos dispositivos de medición esta dada por la expresión:

$$Q = K \cdot \Delta h^{1/2}$$

$$K = C_d \cdot A_2 \sqrt{2g}$$

3. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

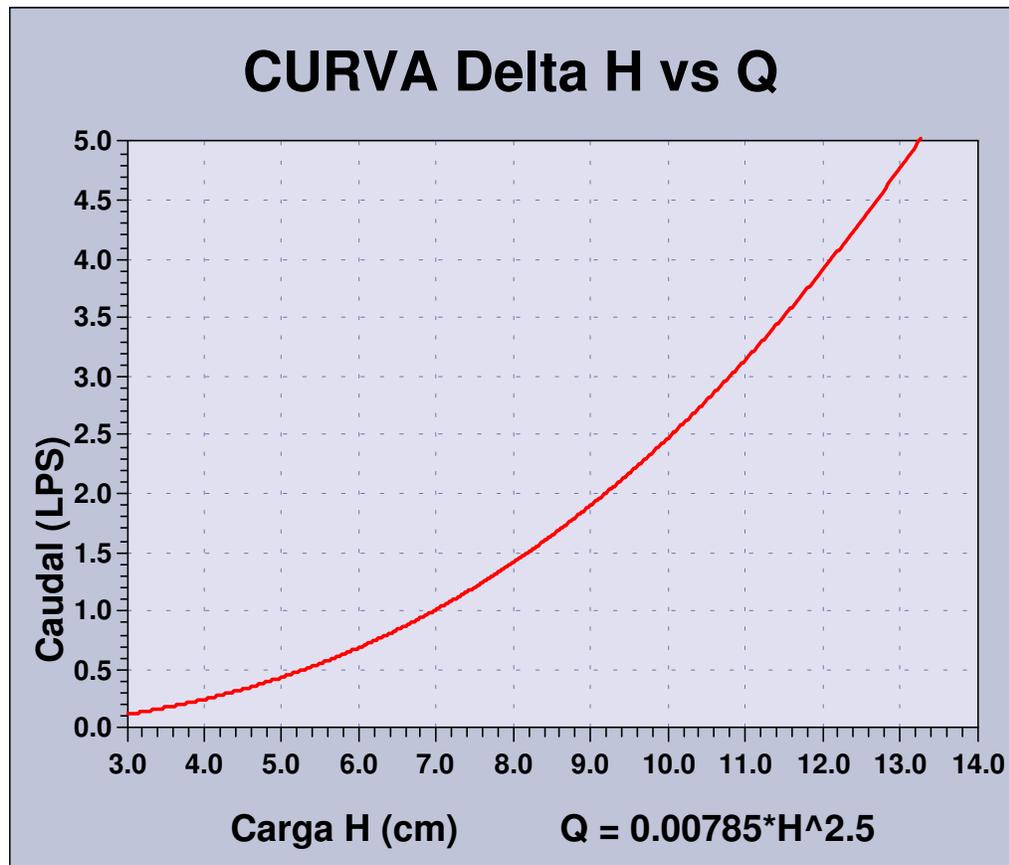
El banco de pruebas consta de las siguientes partes:

- Tanque de alimentación y aforo
- Motobomba
- Dispositivos de medición
- Flauta manométrica
- Manómetro y vacuometro metálicos
- Manómetro en U

4. TRABAJO DE LABORATORIO

Antes de proceder a la realización de las pruebas el estudiante deberá leer las siguientes instrucciones y atender a las explicaciones del profesor y/o laboratorista sobre el manejo del equipo.

- Verificar que el nivel de agua en el tanque este a una altura de 6 cm en la escala del vertedero.
- Abrir parcialmente las válvulas de compuerta de todos los dispositivos para llenar las tuberías.
- Arranque la motobomba.
- Sacar el aire que se encuentra en el sistema y en el manómetro.
- Revisar que las columnas de mercurio del manómetro en U se encuentren en equilibrio.
- Cerrar las válvulas de los dispositivos que no se analizarán.
- Tomar la temperatura del agua que marca el termómetro.
- Variar el caudal mínimo 5 veces para cada dispositivo y tome las medidas del manómetro en U y del vertedero calculando el caudal con la siguiente curva o ecuación.



4.1 TABLA DE DATOS

5. INFORME DE LABORATORIO

1. Para cada caudal del ensayo y Δh correspondientes, calcule el C_d y el número de Reynolds, en el estrechamiento para la tobera y el venturi y en la vena contracta para el diafragma tomando $C_c=0.62$.
2. Dibuje en papel semi-logaritmico la curva C_d Vs. Re (Re en la escala logarítmica y C_d en la escala natural).
3. Analice la curva anterior y determine el valor C_d que se puede tomar como constante para cada medidor.
4. Con el valor C_d determinado en el punto anterior calcule la constante K de cada medidor y dé las ecuaciones de patronamiento para Q en l/s y Δh en mca.
5. Con base en las ecuaciones anteriores, dibuje en papel milimetrado las curvas de patronamiento para cada medidor. Ubique en el mismo gráfico los puntos experimentales $(Q_i, \Delta h_i)$.
6. Según los resultados, saque sus propias observaciones y conclusiones y discútalas con sus compañeros y el profesor.

6. CONCLUSIONES

Con base en el trabajo experimental realizado se pueden extraer las siguientes conclusiones:

- Conforme a las pruebas realizadas al Banco podemos decir que los dispositivos se comportan con un rango de eficiencias dentro de lo normal para aparatos contruidos artesanalmente.
- La pérdida de presión depende de la forma del orificio o garganta y de la relación de diámetros en la contracción.
- El coeficiente de descarga C_d , depende no solo de la geometría de los dispositivos y de la rugosidad de las paredes sino también del número de Reynolds que incluye el efecto de viscosidad del flujo.
- Debido a las bajas presiones que se presentaron en los dispositivos, el manómetro en U de mercurio fué el que más precisión proporcionó en las lecturas que los manómetros metálicos.
- A partir de un numero de Reynolds mayor de 10×10^5 donde el flujo se torna turbulento, el coeficiente de descarga C_d se mantuvo constante para los tres dispositivos.
- El medidor venturi es el dispositivo que menos pérdidas nos genera y el diafragma debido al cambio brusco de diámetro es el que mayores pérdidas presenta con un mismo caudal.

- Después de realizar el análisis de los datos, y de haber comparado resultados, se encontró que el dispositivo que menor porcentaje de error presentó es el diafragma, aunque es el que genera las mayores pérdidas.
- El banco de pruebas fué construido con las longitudes de desarrollo mínimas para cada dispositivo, esto con el fin de reducir el espacio ocupado por éste en el laboratorio, por esta razón la presión esperada se vio reducida.
- El tanque de alimentación y aforo se construyó con longitudes mínimas debido al limitado espacio en el laboratorio de hidráulica, las cuales pueden generar un margen de error, que no alteran los resultados finales.
- Después de realizar un análisis estadístico se estableció que los dispositivos presentarán un porcentaje de error del 4%, frente al caudal real, debido a factores tanto instrumentales, personales y fortuitos.

7. RECOMENDACIONES

- Para un mejor funcionamiento del banco se debe sacar completamente el aire del sistema antes de empezar la toma de datos, esto para evitar errores en las lecturas.
- Cuando se haga variar el caudal, se recomienda esperar hasta que el nivel del agua en el vertedero se mantenga constante para realizar la lectura de la carga hidráulica.
- Antes de tomar lecturas de presión en el manómetro en U, verificar que las columnas de mercurio se encuentren a nivel.
- Tomar un mínimo de 5 datos por cada dispositivo para que al hacer el análisis de datos los resultados sean confiables.
- Se recomienda no tomar la presión 1 y la presión 2 de los dispositivos de manera independiente sino tomar el Δh total, esto para evitar un error mayor en la toma de datos por separado.
- En el momento de realizar la toma de datos se debe tener en cuenta la variación de la temperatura del agua, para que esta no sobrepase los 25 °C evitando de esta manera el calentamiento de la motobomba.
- Para la toma de datos en los dispositivos se recomienda realizar las lecturas de presión a partir de un caudal de 1.5 LPS que en el vertedero representa una carga hidráulica de 8 cm, ya que a caudales inferiores se presenta un error considerable respecto al caudal real.

BIBLIOGRAFÍA

FRANZINI, Joseph y FINNEMORE, John. Mecánica de Fluidos con aplicaciones en Ingeniería. 9. ed. España : Mc. Graw Hill, 1999. p. 319 – 333.

MATAIX, Claudio. Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas. 2. ed. México: Harla Editores, 1989. p. 141 – 148.

MOTT, Robert. Mecánica de Fluidos aplicada. 4. ed. México : Prentice Hall, 1990.

SOTELO, Gilberto. Hidráulica General. Vol. 1. México : Limusa Noriega Editores, 1985. p. 323 – 328.

STREETER, Víctor. Mecánica de Fluidos. 9. ed. Bogotá : Mc. Graw Hill, 1971. p. 470 – 478.

UNIVERSIDAD DEL CAUCA, Popayán. Medidores de caudal, Departamento de Hidráulica, 2002.

UNIVERSIDAD DEL VALLE, Cali. Medición de caudal, Departamento de mecánica de fluidos y ciencias térmicas, 2002.

PAGINAS WEB

www.Imnoeng.com

www.geocities.com/medicioneinstrumentacion

www.gunt.de

www.rocaroibas.com