

300618
200
201



UNIVERSIDAD LA SALLE

ESCUELA DE QUIMICA
INCORPORADA A LA U.N.A.M.

DISEÑO DE UN EQUIPO PARA PRACTICAS DE FLUJO DE FLUIDOS EN EL LABORATORIO DE INGENIERIA QUIMICA DE LA UNIVERSIDAD LA SALLE

TESIS PROFESIONAL

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO QUIMICO
P r e s e n t a
MACEDONIO JR. ORTEGA TINAJERO

MC. ANTONIO VALIENTE B.
DIRECTOR DE TESIS

México, D.F.

1993

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

I N D I C E

PAG.

INTRODUCCION.

CAPITULO I. GENERALIDADES SOBRE MEDIDORES DE FLUJO EN TUBERIAS....	7
1.1 La Ciencia de la Hidráulica y Fluidos.....	8
1.2 Tuberías.....	9
1.3 Propiedades Físicas de los Fluidos.....	10
1.4 Regímenes de Flujo de Fluidos en Tuberías: Laminar y Turbulento.....	15
1.5 Ecuación de Bernoulli.....	16
1.6 Medición de la Presión de Fluidos.....	18
1.7 Fórmula de Darcy. Ecuación General de Flujo de Fluidos	28
1.8 Ecuación General de los Medidores de Area Fija	31
1.9 Medidores de Flujo	34
CAPITULO II. DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL EQUIPO.....	48
2.1 Consideraciones.....	49
2.2 Diseño.....	49
2.3 Descripción de los Medidores de Flujo.....	50
2.4 Dibujo Isométrico del Equipo Instalado en el Laboratorio de Ingeniería Química de La Universidad La Salle.....	52
2.5 Análisis de Costos.....	54
CAPITULO III. EXPERIMENTACION Y ANALISIS DE LOS EXPERIMENTOS.....	56
3.1 Consideraciones Teóricas.....	57
3.2 Datos Experimentales Obtenidos en el tubo Venturi... ..	59
3.3 Cálculos Basados en Fórmulas para el tubo Venturi.	61
3.4 Datos Experimentales Obtenidos en el Medidor de Orificio.....	66
3.5 Cálculos Basados en Fórmulas para el Medidor de Orificio.....	68

	PAG.
CAPITULO IV. PRACTICA PROPUESTA.....	73
A) Objetivos.....	74
B) Introducción.....	75
C) Técnica de Operación.....	76
D) Material Necesario.....	76
E) Trabajo Posterior a la Práctica.....	77
F) Cuestionario.....	78
CONCLUSIONES.....	79
APENDICE.....	81
BIBLIOGRAFIA.....	100

I N T R O D U C C I O N

INTRODUCCION

La medición del movimiento de fluidos es importante en aplicaciones que varían desde mediciones de la velocidad de la circulación de la sangre en una arteria humana, hasta la medición de la circulación de oxígeno líquido de un cohete.

Muchos proyectos de investigación de procesos industriales dependen de una medición del flujo de fluidos, a fin de proporcionar datos importantes para ser analizados. En algunos casos se exige extrema precisión en la medición del movimiento de fluidos, en tanto que en otros no es necesaria una gran precisión.

Muchas variables, incluyendo el costo, son determinantes para la selección del instrumento de medición de flujo apropiado para una aplicación particular.

En muchas operaciones industriales, la exactitud de la medición del flujo de un fluido se relaciona de manera directa con la utilidad del proceso; como ejemplo sencillo tenemos la bomba de gasolina en una estación de servicio o el medidor de agua en el hogar. Un pequeño error al medir el gasto o flujo en una tubería de gas natural o petróleo puede significar una diferencia de grandes sumas de dinero en un corto período.

El científico en el laboratorio no es la única persona preocupada por la medición exacta del flujo; en general todo ingeniero relacionado con algún proceso debe estar interesado por el efecto que pueda tener las mediciones de flujo en la declaración de utilidades y pérdidas de una compañía.

Actualmente los ingenieros tienen que calcular y diseñar enormes ductos con capacidad para conducir desde agua y aire hasta petróleo y gas natural y puedan ser transportados a través de cientos de miles de kilómetros, atravesando la orografía terrestre.

Para lograr el transporte de fluidos se puede aprovechar de los desniveles o pendientes entre dos puntos, usar bombas, compresores, sopladores, etc. para moverlos y llevarlos de una presión a otra o a diferente altitud.

Cabe mencionar que, el número de fluidos que se manejan en la industria es cercano a diez mil, siendo el agua (H₂O) uno de los fluidos más antiguos en transportarse. Los imperios Egipcios, Mesopotámicos y culturas Mesoamericanas ya transportaban este líquido por medio de canales de riego, acueductos, diques y colectores de aguas negras.

Entre los fluidos más comunes que son manejados a nivel industrial destacan los siguientes: Agua, aire, petróleo, ácido sulfúrico, gasolina, amoníaco, hidrógeno, lodos de perforación, sangre, sosa cáustica, jugo de piña, puré de manzana, gas industrial, entre otros.

El método más común para transportar fluidos de un punto a otro es impulsarlo a través de un sistema de tuberías, siendo las tuberías de sección circular las más frecuentes para estos procesos, ya que esta forma ofrece no sólo mayor resistencia estructural, sino también mayor sección transversal para el mismo perímetro exterior que cualquier otra forma.

El flujo o gasto se expresa en unidades de volumen de masa en los diferentes sistemas de medición.

El objetivo del presente trabajo es presentar una amplia referencia de las mediciones de flujo o gasto e indicar los principios de operación de los dispositivos de medición más usados, tanto en la industria, como a nivel laboratorio.

También se presentan algunos métodos de cálculo para velocidades de flujo, gasto másico o volumétrico, etc., relacionados con algunos de los dispositivos instalados en el sistema de tubería del laboratorio de Ingeniería Química de La Universidad La Salle.

En el capítulo III se ofrece una comparación entre los datos experimentales obtenidos directamente en el rotámetro y medidor de paletas (Desplazamiento positivo) contra datos obtenidos en forma indirecta mediante fórmulas reportadas en la literatura para el medidor de orificio y venturímetro.

CAPITULO I

GENERALIDADES SOBRE MEDIDORES

DE FLUJO EN TUBERIAS

1.1 LA CIENCIA DE LA HIDRAULICA Y FLUIDOS

HIDRAULICA

La hidráulica se define como la ciencia que trata del agua u otros fluidos en movimiento. Uno de los requisitos previos para entender el movimiento de los fluidos es conocer la presión ejercida por los fluidos en reposo. A este estudio se le denomina HIDROSTATICA y es incluida comúnmente en la Hidráulica. El campo de la Hidráulica incluye también la HIDRODINAMICA, que se relaciona con las fuerzas ejercidas por los fluidos en movimiento o sobre ellos.

FLUIDOS

Se denomina FLUIDO a sustancias capaces de fluir con partículas que se mueven y cambian su posición relativa con facilidad sin separación de las masas. Los fluidos no ofrecen prácticamente resistencia al cambio de forma. Toman con facilidad la configuración del cuerpo sólido con el que entran en contacto.

Los fluidos se pueden dividir en líquidos y gases. Las principales diferencias entre ellos son:

A) Un líquido tiene una superficie libre y cierta masa de éste ocupa solo un volumen dado en un recipiente, mientras que un gas no tiene una superficie libre y una masa dada ocupa todas las porciones de cualquier recipiente, cualquiera que sea su tamaño.

B) Los líquidos son prácticamente incompresibles y generalmente se pueden considerar así, sin incurrir en errores; por otro lado los gases son compresibles y deben ser considerados así.

Es preciso tomar en cuenta también las diferencias entre un sólido y un fluido:

A) Un esfuerzo de corte deforma un sólido y la cantidad de deformación unitaria es hasta cierto punto proporcional al esfuerzo unitario; un esfuerzo de corte deforma también un fluido, pero a una razón de tiempo de deformación que es proporcional al esfuerzo.

B) Si no se sobrepasa el límite elástico, la aplicación de un esfuerzo de corte unitario dado a un sólido produce cierta deformación unitaria, que no depende del tiempo de aplicación de la fuerza y cuando se retira el esfuerzo el sólido vuelve a su forma original. Por otra parte, aplicando un esfuerzo de corte dado a un fluido, la deformación se sigue produciendo a una razón uniforme con el tiempo y cuando se retira el esfuerzo, el fluido no vuelve a su forma original mediante fuerzas contenidas en su interior.

La aplicación de suficiente cantidad de calor hará que muchos sólidos se conviertan en fluidos. El acero más duro se puede fundir de modo que fluya con facilidad. Un bloque de alquitrán frío tiene propiedades de sólido, pero si se calienta se licúa y se puede vaciar en pequeñas grietas del concreto.

El paso de la roca sólida a lava fundida es un ejemplo muy conocido que se produce por la naturaleza. Para esos cambios se requieren temperaturas relativamente altas.

1.2 TUBERIAS

Una TUBERIA se puede definir como un ducto cerrado a través del cual fluyen líquidos o gases. En hidráulica se entiende comúnmente que las tuberías son ductos de sección transversal circular que llevan flujo completo.

Como ejemplos de tuberías tenemos las líneas principales de agua y gas de las ciudades donde el flujo se produce a presión.

Algunos procesos químicos frecuentemente se efectúan en estado fluido y usualmente éste es transportado de una parte del proceso a otra mediante tuberías de sección transversal circular.

Muchos casos de flujo en Ingeniería requieren el uso de ductos cerrados más que de canales abiertos. La tubería puede ser fabricada de cualquier material de construcción disponible, dependiendo de las propiedades corrosivas del fluido que va a ser manejado y de la presión de flujo. Tales materiales como vidrio, concreto, asbestos, acero, plásticos, madera y muchos otros son usados con frecuencia en la construcción de tuberías; mientras que, el acero, fierro, cobre y latón son los materiales de tubería más comunes encontrados en la industria de proceso.

Como se mencionó anteriormente, la selección depende de la aplicación.

Las secciones de tuberías pueden ser unidas por diferentes técnicas, encontrando así tuberías roscadas, soldadas o bridadas. Debido a que el tubo puede ser fabricado en diferentes diámetros y espesores debe haber una estandarización y método de identificación de tamaños de tubería, establecido ya por la "American Society for Testing Materials" (ASTM).

Por convención, el tamaño de tubería y accesorios está definido en términos de un diámetro nominal y un espesor de pared. Para tubos de acero, los diámetros nominales pueden variar desde 1/8" hasta 30".

El diámetro nominal no es ni el diámetro interno ni el externo, pero sí una aproximación del diámetro interno. En vista de las diferencias de espesores de las tuberías los tubos del mismo diámetro nominal tienen el mismo diámetro exterior, permitiendo el intercambio de conexiones.

El espesor de pared del tubo es indicado por un número de cédula, el cual es función de la presión interna y de la resistencia permisible.

Ecuación 1.1

$$\text{No. de Cédula} = 1000 P_i / S$$

Donde: P_i = Presión interna de trabajo $\frac{\text{Kg}}{\text{Cm}^2}$
 S = Resistencia permisible $\frac{\text{Kg}}{\text{Cm}^2}$

Los números de cédula más comunes son los siguientes: 10, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 140 y 160.

Los espesores de pared del tubo se incrementan con el tubo de cédula. Para tuberías de acero, la cédula 40 corresponde a la tubería estándar.

De acuerdo con el material de construcción, las tuberías pueden dividirse en metálicas, no metálicas y recubiertas.

1.3 PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS FLUIDOS

La solución de cualquier problema de flujo de fluidos requiere un conocimiento previo de las propiedades físicas del fluido en cuestión. Valores exactos de las propiedades de los fluidos que afectan a su flujo, principalmente la viscosidad y el peso específico, han sido establecidos por muchas autoridades en la materia para todos los fluidos que son utilizados normalmente.

VISCOSIDAD

La VISCOSIDAD expresa la facilidad que tiene un fluido para fluir cuando se le aplica una fuerza externa. El coeficiente de viscosidad absoluta, o simplemente la viscosidad absoluta de un fluido es una medida de su resistencia al deslizamiento o a sufrir deformaciones internas. La mezcla es un fluido muy viscoso en comparación con el agua, a su vez, los gases son menos viscosos en comparación con el agua.

Se puede predecir la viscosidad de la mayor parte de los fluidos, en algunos esta propiedad depende del trabajo que se haya realizado sobre ellos.

VISCOSIDAD ABSOLUTA O DINAMICA

La unidad de VISCOSIDAD DINAMICA en el sistema internacional (SI) es el Pascal segundo (Pa . s) o también Newton segundo por metro cuadrado ($N s / m^2$), o sea kilogramo por metro segundo ($Kg / m s$).

El Poise es la unidad correspondiente en el sistema CGS de unidades y tiene dimensiones de dina segundo por centímetro cuadrado o de gramos por centímetro segundo. El submúltiplo centipoise (Cp), 10^{-2} poises, es la unidad más utilizada para expresar la viscosidad dinámica.

La relación entre el Pascal segundo y el centipoise es:

$$\begin{aligned} 1 \text{ Pa.s} &= 1 \text{ N s} / \text{m}^2 = 1 \text{ Kg} / \text{m s} = 10^3 \text{ Cp} \\ 1 \text{ Cp} &= 10^{-3} \text{ Pa.s} \end{aligned}$$

La viscosidad del agua a 20 grados centígrados es muy cercana a un centipoise, según el "Handbook of Chemistry & Physics" es igual a 1.002 centipoise, equivalente a 0.001 Pascal segundo.

VISCOSIDAD CINEMATICA

Es el cociente entre la viscosidad dinámica y la densidad. En el Sistema Internacional (SI) la unidad de viscosidad cinemática es el metro cuadrado por segundo (m^2 / s). La unidad (CGS) correspondiente es el Stoke (St) con dimensiones de centímetro cuadrado por segundo y el centistoke (cSt), 10^{-2} stokes, que es el submúltiplo más utilizado.

Ecuación 1.2

$$(\text{Centistoke}) = \frac{(\text{Centipoise})}{(\text{Gramos} / \text{Cm}^3)}$$

$$\begin{aligned} 1 \text{ m}^2/\text{s} &= 10^6 \text{ cSt} \\ 1 \text{ cSt} &= 10^{-6} \text{ m}^2 / \text{s} \end{aligned}$$

La medida de la viscosidad absoluta de los fluidos (especialmente de gases y vapores) requiere de instrumental adecuado y de una considerable habilidad experimental. Por otro lado, se puede utilizar un instrumento muy simple, como es el viscosímetro de tubo para medir la viscosidad cinemática de los aceites y otros líquidos viscosos. Con este tipo de instrumentos se determina el tiempo que necesita un volumen pequeño de líquido para fluir por un orificio y la medida de la viscosidad cinemática se expresa en términos de segundos.

Se usan varios tipos de viscosímetros de tubo con escalas empíricas, tales como Saybolt Universal, Saybolt Furol (para líquidos muy viscosos), Redwood No. 1 y 2 y Engler.

DENSIDAD, VOLUMEN ESPECIFICO Y PESO ESPECIFICO

La densidad de una sustancia es su masa por unidad de volumen. La unidad de densidad en el SI es el kilogramo por metro cúbico y se denota por ρ (Rho).

Otras unidades métricas también usadas son:

$$\begin{aligned} & 1 \text{ Gr} / \text{cm}^3 \\ & 1 \text{ Gr} / \text{ml} \\ & = 1000 \text{ Kg} / \text{m}^3 \end{aligned}$$

La unidad correspondiente en el SI para volumen específico V , que es el inverso de la densidad, es el metro cúbico por kilogramo (m^3/Kg).

Ecuación 1.3

$$\bar{v} = \frac{1}{\rho} \qquad \rho = \frac{1}{\bar{v}}$$

Frecuentemente para volumen específico también son usadas las siguientes unidades:

$$\begin{aligned} & 1 \text{ Litro} / \text{Kg} \\ & 1 \text{ Dm}^3 / \text{Kg} \\ & = 0.001 \text{ m}^3 / \text{Kg} \end{aligned}$$

El peso específico (densidad relativa) es una medida relativa de la densidad. Como la presión tiene un efecto insignificante sobre la densidad de los líquidos, la temperatura es la única variable que se debe tomar en cuenta al sentar las bases para el peso específico. La densidad relativa de un líquido es la relación de su densidad a cierta temperatura con respecto al agua a una temperatura normalizada. A menudo estas temperaturas son las mismas y suele utilizarse $60^\circ\text{F} / 60^\circ\text{F}$ ($15.6^\circ\text{C} / 15.6^\circ\text{C}$).

Al redondear 15.0°C /15.0°C no se introduce ningún error apreciable.

Cualquier líquido a:

$$Pe = \frac{\rho_{\text{Cierta temperatura}}}{\rho_{\text{Agua a 15° C (60° F)}}$$

Se usa un hidrómetro para medir directamente la densidad relativa de un líquido. Normalmente se utilizan dos escalas hidrométricas a saber:

La escala API se utiliza para productos de petróleo y las escalas Baumé que a su vez usan dos tipos: Una para líquidos más densos que el agua y otra para líquidos más ligeros que ésta.

Las relaciones entre estas escalas hidrométricas y el peso específico son:

Para productos de petróleo:

$$Pe (60° F / 60° F) = \frac{141.5}{131.5 + \text{Grados API}}$$

Para líquidos más ligeros que el agua:

$$Pe (60° F / 60° F) = \frac{140}{130 + \text{Grados Baumé}}$$

Para líquidos más pesados que el agua:

$$Pe (60° F / 60° F) = \frac{145}{145 + \text{Grados Baumé}}$$

VELOCIDAD MEDIA DE FLUJO

El término "VELOCIDAD", a menos que se diga otra cosa, se refiere a la velocidad media o promedio de cierta sección transversal dada por la ecuación de continuidad para un flujo estacionario:

Ecuación 1.4

$$v = \frac{Gv}{A}$$

Donde: v = Velocidad media de flujo en m/s.
 Gv = Caudal en m^3/s en las condiciones de flujo.
 A = Area de la sección transversal de la tubería u orificio en m^2 .

NUMERO DE REYNOLDS

Las investigaciones realizadas por Osborne Reynolds han demostrado que en tuberías el régimen de flujo laminar o turbulento, depende del diámetro de la tubería, de la densidad, la viscosidad del fluido y de la velocidad de flujo. El valor numérico de una combinación adimensional de estas cuatro variables es conocido como EL NUMERO DE REYNOLDS. Puede considerarse como la relación de las fuerzas dinámicas de la masa del fluido respecto a los esfuerzos de deformación ocasionados por la viscosidad.

El Número de Reynolds esta dado por:

Ecuación 1.5

$$Re = \frac{D v f}{\mu}$$

μ Esta dada en (N s / m²) ó (Pa·s)

Para usos prácticos, el régimen de flujo en tuberías se considera como laminar si el número de Reynolds es menor que 2,000 y turbulento si éste es superior a 4,000. Entre estos dos valores esta la zona denominada "CRITICA", donde el régimen de flujo es impredecible, pudiendo ser laminar, turbulento o de transición, dependiendo de muchas condiciones con posibles variaciones. La experimentación cuidadosa ha determinado que la zona laminar puede terminar en Re tan bajos como 1,200 o extenderse hasta los 40,000, aunque estas condiciones no se presentan en la práctica.

RADIO HIDRAULICO

En ocasiones se tienen ductos con sección transversal que no es circular. Para calcular el número de Reynolds en estas condiciones, el diámetro circular es sustituido por el diámetro equivalente (cuatro veces el radio hidráulico).

$$Rh = \frac{\text{Superficie de la sección transversal de la vena líquida}}{\text{Perímetro mojado}}$$

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

La siguiente fórmula sirve para calcular el caudal:

Ecuación 1.6

$$Gv = 0.2087 d^2 \sqrt{\frac{h_c D}{f L}}$$

Donde:

- d = Diámetro interior de la tubería en (mm).
 h_c = Pérdida de carga debido al flujo de fluido (m).
 D = Diámetro interior de la tubería en (m).
 f = Factor de fricción (ver apéndice).
 L = Longitud de la tubería en (m).

d^2 Esta basado en un diámetro equivalente de la sección transversal del flujo y D se sustituye por $4Rh$.

1.4 REGIMENES DE FLUJO DE FLUIDO EN TUBERIAS: LAMINAR Y TURBULENTO

Un experimento simple, como el de la figura (1.1), muestra que existen dos diferentes tipos de flujo de fluidos en tuberías, el cual consiste en inyectar pequeñas cantidades de fluido coloreado en un líquido que circula por una tubería transparente y observar el comportamiento de los filamentos coloreados en diferentes zonas después de los puntos de inyección.



Figura 1.1 a
Flujo laminar
Fotografía que muestra como los filamentos coloreados se transportan en turbulencia por la corriente de agua.

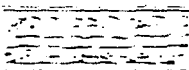


Figura 1.1 b
Flujo en la zona crítica, entre las zonas laminar y de transición
A la velocidad crítica los filamentos comienzan a romperse, indicando que el flujo comienza a ser turbulento

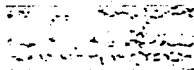


Figura 1.1 c
Flujo turbulento
Esta fotografía muestra como la turbulencia en la corriente dispersa completamente los filamentos coloreados a poca distancia del punto de inyección.

Figura (1.1)

Si la descarga o la velocidad media es pequeña, las láminas de fluido coloreado se desplazan en líneas rectas como se ve en la figura (1.1a). A medida que el caudal se incrementa estas láminas continúan moviéndose en líneas rectas hasta que se alcanza una velocidad en donde estas comienzan a ondularse y se rompen en forma brusca y difusa como lo muestra la figura (1.1b). Este cambio ocurre en la

llamada velocidad crítica. A velocidades mayores que la crítica los filamentos se dispersan de manera indeterminada a través de toda la corriente, según se indica en la figura (1.1c).

El tipo de flujo que existe a velocidades más bajas que la crítica se conoce como REGIMEN LAMINAR y a veces como régimen viscoso. El régimen laminar se caracteriza por el deslizamiento de capas en forma de "cilindros" concéntricos una sobre otra de manera ordenada. La velocidad del flujo es máxima en el eje de la tubería y disminuye rápidamente hasta anularse en la pared de la tubería.

A velocidades mayores que la crítica, el régimen es llamado TURBULENTO. En este régimen hay un movimiento irregular e indeterminado de las partículas del fluido en direcciones transversales a la dirección principal del flujo, la distribución de velocidades en el régimen turbulento es más uniforme a través del diámetro de la tubería que en el régimen laminar. A pesar de que existe un movimiento turbulento a través de la mayor parte del diámetro de la tubería, siempre hay una capa de fluido en la pared de la tubería, que se conoce como "capa periférica" o "subcapa laminar" la cual se mueve en régimen laminar.

1.5 ECUACION DE BERNOULLI

Las energías tales como la de superficie, la química, etc., no se consideran importantes en el balance de energía en la mayor parte de los procesos en los cuales se transporta un fluido.

De acuerdo con lo anterior las formas de energía que debemos considerar son:

- A) Energía Interna.
- B) Energía Cinética.
- C) Energía Potencial.
- D) Energía de Flujo (debido a los cambios de presión).
- E) Energía Calorífica.
- F) Trabajo hecho sobre el Sistema.

Si hacemos un balance de energía entre los puntos 1 y 2 para un sistema como el que se muestra a continuación:

- A) DEPOSITO
B) BOMBA
C) CAMBIADOR
D) TANQUE

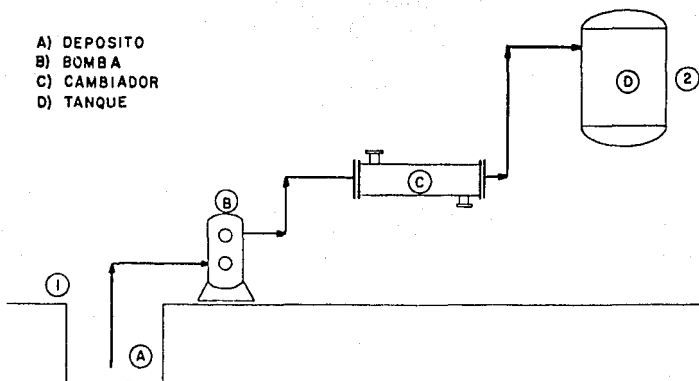


Figura (1.2)

La ecuación de balance de energía toma la siguiente forma:

Ecuación (1.7)

$$E_1 + \frac{v_1^2}{2g_c} + \frac{z_1 g}{g_c} + \frac{p_1}{\rho_1} + Q' = E_2 + \frac{v_2^2}{2g_c} + \frac{z_2 g}{g_c} + \frac{p_2}{\rho_2} + T$$

En donde z_1 y z_2 son las alturas respectivas de los límites del sistema referido a un nivel cualquiera.

Arreglando la ecuación (1.7) y expresándola en función de incrementos, se tendrá por unidad de masa fluente:

Ecuación (1.8)

$$\Delta E + \frac{g}{g} \Delta z + \frac{P}{\rho} + \Delta E_c = Q' - T$$

Termodinámicamente se define a la entalpía como:

Ecuación (1.9)

$$H = E + PV$$

Sustituyendo la ecuación (1.9) en la (1.8) tenemos:

Ecuación (1.10)

$$\Delta H + \frac{g}{g_c} \Delta z + Ec = Q' - T$$

Nomenclatura usada:

- H = Entalpía.
 p = Presión absoluta en el punto de referencia.
 = Densidad del fluido.
 V = Velocidad del fluido en el punto 1 ó 2.
 Q' = Calor proveniente del exterior.
 T = Trabajo hecho sobre el sistema.
 Ec = Energía cinética.

Un fluido ideal es aquel incapaz de mantener esfuerzos cortantes en su trayectoria y por tanto se haya libre de fricciones internas.

El balance de energía para este tipo de fluidos solamente toma en cuenta energías: Cinética, Potencial y de Flujo, en este caso, si no se adiciona calor o energía al sistema, la ecuación de balance nos queda:

Ecuación (1.11)

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{z_1 g}{g_c} + \frac{V_1^2}{2 g_c} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{z_2 g}{g_c} + \frac{V_2^2}{2 g_c}$$

La ecuación anterior se conoce como ECUACION DE BERNOULLI, sólo de interés teórico, ya que en la realidad no se encuentra ningún fluido que se comporte totalmente como un fluido ideal.

1.6 MEDICION DE LA PRESION DE FLUIDOS**PRESION**

Cuando un cuerpo obra con una determinada fuerza sobre otro, la fuerza se transmite mediante una área determinada, esta fuerza ejercida por unidad de área recibe el nombre de PRESION.

$$P = \frac{F}{A}$$

- P = Presión
 F = Fuerza
 A = Área

PRESION ESTATICA

La estática de los fluidos se relaciona con las propiedades de los líquidos en reposo y en este caso recibe el nombre de HIDROSTATICA. Un fluido en equilibrio recibe solo fuerzas de compresión, la intensidad de esta fuerza recibe el nombre de PRESION ESTATICA, la cual mide la presión que tiene un fluido en una línea o recipiente, expresándose en Kg / m^2 , N / m^2 ó en Lb / m^2 (Psi).

PRINCIPIO DE PASCAL

Una presión que se aplica en un punto de un líquido se transmite de igual valor a todos los puntos del fluido. Esto permite por ejemplo el diseño y construcción de las prensas hidráulicas.

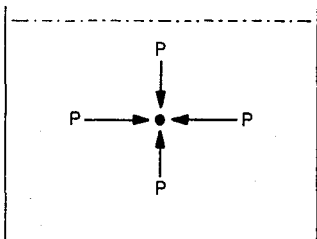


Figura (1.3)

La presión es la misma en todas las direcciones para un punto del interior de un fluido en reposo y depende de la profundidad a que se encuentre.

PRESION HIDROSTATICA

Basados en el principio de Pascal se concluye que la presión sobre una superficie considerada en el interior de un líquido es proporcional a la profundidad a la que se encuentra.

$$P = P_e \cdot h$$

P = Presión
 P_e = Peso Especifico
 h = Altura

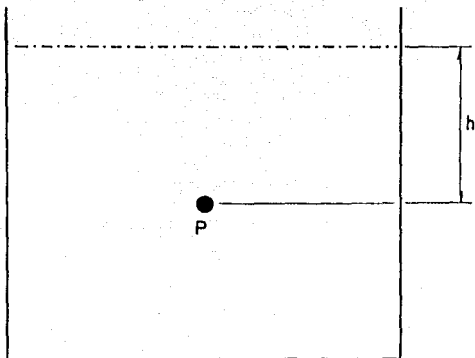


Figura (1.4)

PRESION DINAMICA

La presión dinámica mide la presión ocasionada por la velocidad con que se desplaza el fluido en una línea, más la presión en el interior de la misma.

PRESION BAROMETRICA

Es el nivel de la presión atmosférica por encima del vacío perfecto. La presión atmosférica normalizada es de 1.01325 bar ó 760 mm de mercurio.

PRESION MANOMETRICA

Es la presión medida por encima de la atmosférica, mientras que la presión absoluta se refiere siempre al vacío perfecto.

VACIO

Es la depresión por debajo del nivel atmosférico. La referencia a las condiciones de vacío se hace a menudo expresando la presión absoluta en términos de altura de columna de mercurio o de agua. Las unidades utilizadas normalmente son milímetros de mercurio, micras de mercurio, pulgadas de agua y pulgadas de mercurio.

$$P \text{ absoluta} = P \text{ manométrica} + P \text{ atmosférica}$$

En la figura (1.5) se ilustra gráficamente la relación entre las presiones absoluta y manométrica. El vacío perfecto no puede existir en la superficie de la tierra, pero sin embargo, es un punto de referencia conveniente para la medición de la presión.

RELACION ENTRE LAS PRESIONES MANOMETRICA Y ABSOLUTA

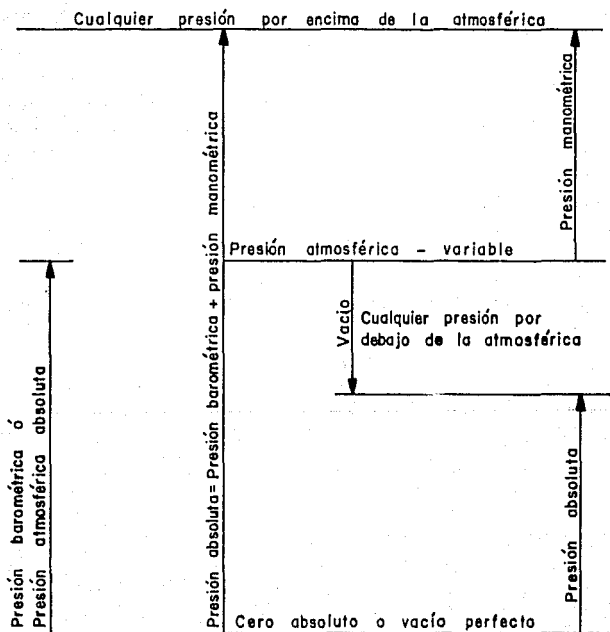


Figura (1.5)

Se utilizan varios dispositivos mecánicos para la medición de presiones de fluidos. El más común entre ellos es el manómetro de Bourdon, que consiste en un tubo hueco cerrado en un extremo y doblado en forma de C. El extremo abierto del tubo se expone al fluido cuya presión se desea medir; a medida que aumenta la presión, el tubo tiende a enderezarse provocando la rotación de un indicador unido al tubo (Figura 1.6).

Los manómetros se emplean para la medición de presiones de fluidos desde un vacío casi total hasta aproximadamente 7000 atmósferas. Las mediciones más exactas de presiones por debajo de 3 atmósferas se obtienen mediante el uso de manómetros de vidrio.

Un manómetro es un tubo en forma de U, parcialmente lleno con un líquido de densidad conocida (fluido manométrico). Cuando se exponen los extremos del tubo a presiones diferentes, el nivel del fluido cae en la rama de presión alta y sube en la rama de presión baja. La diferencia entre las presiones puede calcularse a partir de la diferencia medida entre los niveles de líquido en ambas ramas.

Los manómetros se emplean en diferentes formas, tal como se muestra en la figura (1.7). En cada uno de los diagramas, la presión P_1 es mayor que P_2 .

La figura (1.7a) muestra un manómetro de extremo abierto; un extremo se haya expuesto a un fluido cuya presión se desea medir, mientras que en el otro extremo se encuentra abierto a la atmósfera. La figura (1.7b), muestra un manómetro diferencial, empleando para medir la diferencia de presión entre dos puntos de una línea de proceso. La figura (1.7c), muestra un manómetro de extremo sellado, que en un extremo encierra una cámara de vacío. Si el extremo abierto de un manómetro de extremo sellado se expone a la atmósfera ($P_1 = P_{atm}$), el dispositivo funciona como barómetro.

La fórmula que relaciona la diferencia de presión $P_1 - P_2$ con la diferencia entre los niveles de fluido manométrico se basa en el principio de que la presión del fluido debe ser la misma en cualquiera de los dos puntos a la misma altura en un fluido continuo: en particular, la presión a la altura de la superficie inferior de un fluido manométrico es la misma en ambas ramas del manómetro (figura 1.8).

La escritura e igualación de expresiones para las presiones en los puntos (A) y (B) en la figura (1.8) da origen a la ecuación general de los manómetros.

Ecuación (1.12)

$$p_1 - \int_1 \frac{g \, d1}{g_c} = p_2 + \int_2 \frac{g \, d2}{g_c} + \int_f \frac{g}{g_c} h$$

En un manómetro diferencial los fluidos 1 y 2 son los mismos y consecuentemente $\rho_1 = \rho_2 = \rho$. La ecuación general para los manómetros se reduce entonces a:

Ecuación (1.13)

$$p_1 - p_2 = (\rho_f - \rho) \frac{g}{g_c} h$$

Si alguno de los fluidos 1 ó 2 es un gas a una presión moderada (ejemplo: si una rama se encuentra abierta a la atmósfera), la densidad de este fluido es de 100 a 1000 veces menor que la densidad del fluido manométrico, de modo que el término $\rho gh / g_c$ correspondiente a la ecuación general de los manómetros puede despreciarse sin incurrir en errores. Si ambos fluidos son gases, la ecuación correspondiente es:

Ecuación (1.14)

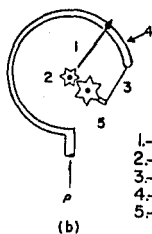
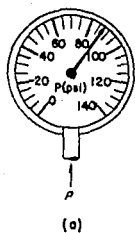
$$p_1 - p_2 = \rho_f \frac{g}{g_c} h$$

Y si tanto p_1 como p_2 se expresan como alturas del fluido manométrico, entonces:

Ecuación (1.15)

$$p_1 - p_2 = h$$

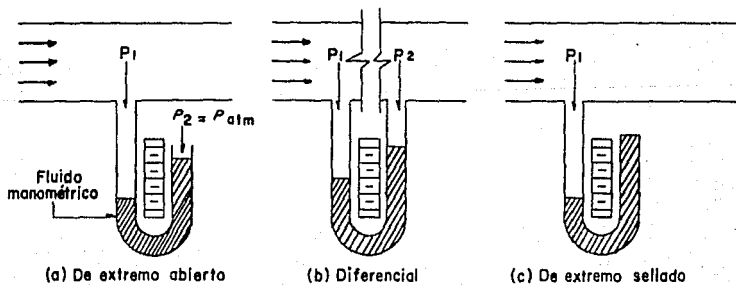
Si p_2 es la presión atmosférica, entonces la presión manométrica en el punto (1) es simplemente la diferencia en los niveles del fluido manométrico.



- 1.-Señalador
- 2.-Piñón
- 3.-Unión
- 4.-Tubo de bourdon
- 5.-Compas de proporción

Manómetro de bourdon.

Fig. (1.6)



Manómetros.

Fig. (1.7).

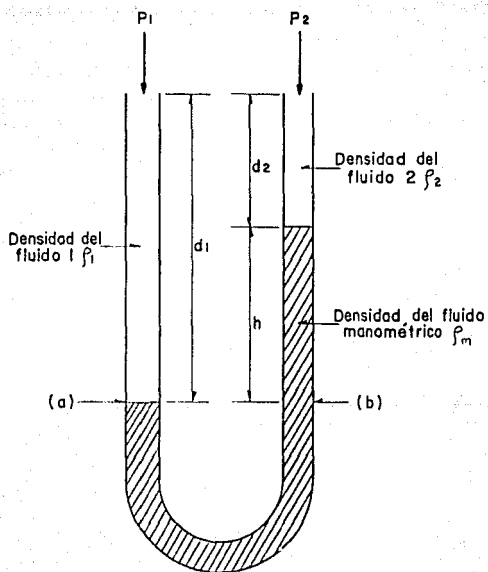


Fig. (1.8) Variables de un manómetro.

MANOMETRO DIFERENCIAL INCLINADO

Para la medida de presiones pequeñas se puede utilizar el manómetro de tubo inclinado, con el cual se obtiene una escala ampliada de lectura. Consta de un pequeño depósito que lleva conectado un tubo acodado formando un determinado ángulo con la horizontal, permitiéndonos este dispositivo aumentar la lectura entre los niveles del líquido manométrico (figura 1.8a).

El depósito debe tener una sección suficiente para que el nivel del líquido manométrico en el mismo permanezca prácticamente constante al desplazarse éste a lo largo del tubo inclinado.

La diferencia de presiones viene dada por la expresión.

$$P = P_2 - P_1 = \rho_m \cdot h \cdot \text{sen } \theta \quad (\rho_m - \rho_a)$$

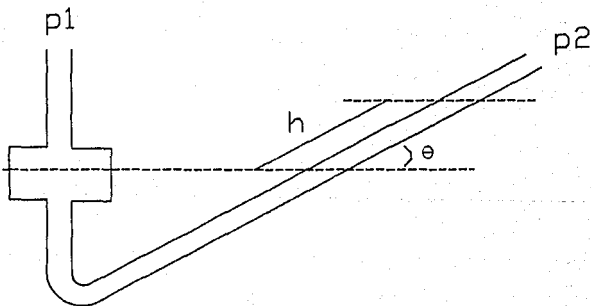


Fig. (1.8a) Manómetro Diferencial Inclinado.

1.7 FORMULA DE DARCY. ECUACION GENERAL DE FLUJO DE FLUIDOS

El flujo de fluidos en tuberías está siempre acompañado de rozamiento de las partículas del fluido entre sí y, consecuentemente, tiene que existir una pérdida de presión en el sentido del flujo. Si conectamos dos manómetros Bourdon en una tubería por la que pasa un fluido como se indica en la siguiente figura:

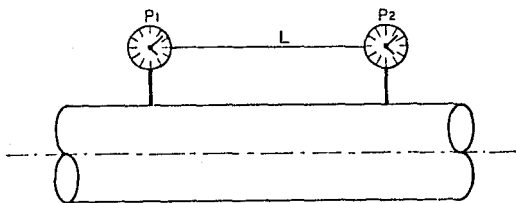


Figura (1.9)

El manómetro p_1 indicaría una presión estática mayor que el manómetro p_2 .

La ecuación general de la pérdida de presión, conocida como la fórmula de Darcy y que se expresa en metros de fluido, es:

Ecuación (1.16)

$$H_1 = fL \frac{v^2}{D2g}$$

Donde:

- H_1 = Pérdida de carga debida al flujo de fluidos.
- f = Factor de fricción.
- L = Longitud de tubería en metros.
- v = Viscosidad cinemática en centistokes.
- D = Diámetro interior de tubería en metros.
- g = Aceleración de la gravedad.

Esta ecuación también puede escribirse para obtener la pérdida de presión en Newtons por m^2 (Pascals) sustituyendo las unidades correspondientes de la manera siguiente:

Ecuación (1.17)

$$\Delta p = \frac{\rho f L v}{2D} \quad (\text{ya que } \Delta p = H_1 \times \rho \times g)$$

La ecuación de Darcy es válida tanto para flujo laminar como turbulento de cualquier líquido en una tubería; sin embargo, puede suceder que debido a velocidades extremas, la presión corriente abajo disminuya de tal manera que llegue a igualar la presión de vapor del líquido, apareciendo el fenómeno conocido como cavitación y los caudales obtenidos por cálculo serán inexactos. Con las restricciones necesarias, la ecuación de Darcy puede utilizarse con gases y vapores (fluidos compresibles).

Con la ecuación (1.17) se obtiene la pérdida de presión, debido al rozamiento y se aplica a tubería de diámetro constante por la que pasa un fluido, cuya densidad permanece razonablemente constante a través de una tubería recta ya sea horizontal, vertical o inclinada. Para tuberías verticales, inclinadas o de diámetro variable, el cambio de presión debido a cambios de elevación, velocidad o densidad del fluido debe hacerse de acuerdo al teorema de Bernoulli.

Factor de fricción. La fórmula de Darcy puede deducirse por análisis dimensional con la excepción del factor de fricción " f ", que debe ser determinado experimentalmente. El factor de fricción para condiciones de flujo laminar ($Re < 2000$) es función solo del número de Reynolds; mientras que para el flujo turbulento ($Re > 4000$) es también función del tipo de pared de la tubería.

La región que se conoce como la "zona crítica" aparece entre los números de Reynolds de 2000 a 4000. En esta región el flujo puede ser tanto laminar como turbulento, dependiendo de varios factores; éstos incluyen cambios de sección, de dirección del flujo y obstrucciones, tales como válvulas corriente arriba de la zona considerada. El factor de fricción en esta región es indeterminado y tiene límites más bajos si el flujo es laminar y más altos si el flujo es turbulento.

Para números de Reynolds superiores a 4000 las condiciones de flujo vuelven a ser más estables y pueden establecerse factores de rozamiento definitivos. Esto es importante, ya que permite al Ingeniero determinar las características del flujo de cualquier fluido que se mueva por una tubería, suponiendo conocidas la viscosidad y la densidad en las condiciones de flujo. Por esta razón la ecuación (1.17) se recomienda con preferencia sobre alguna de las ecuaciones empíricas usadas normalmente para el agua, petróleo y otros líquidos, así como para el flujo de fluidos compresibles, teniendo en cuenta las restricciones citadas.

Si el flujo es laminar ($Re < 2000$), el factor de fricción puede determinarse a partir de la ecuación:

Ecuación (1.18)

$$f = \frac{64}{Re} = \frac{64 \cdot \mu'}{D v \rho} = \frac{64 \mu}{d v \rho}$$

Donde:

- Re = Número de Reynolds.
- μ' = Viscosidad absoluta en Newtons segundo por m².
- μ = Viscosidad absoluta (dinámica) en centipoises.
- D = Diámetro interior de la tubería en metros.
- d = Diámetro interior de la tubería en milímetros.
- ρ = Densidad del fluido en kilogramos por m³.
- v = Velocidad media de flujo en metros por seg.

Si esta ecuación se sustituye en la ecuación (1.17), la pérdida de presión en Newtons por m² es:

Ecuación (1.19)

$$\Delta p = 32000 \frac{\mu' L v}{d^2}$$

Ley de Poiseville para flujo laminar

Cuando el flujo es turbulento ($Re > 4000$) el factor de fricción depende no sólo del número de Reynolds, sino también de la rugosidad relativa de las paredes de la tubería, (ϵ/d), es decir la rugosidad de las paredes de la tubería (ϵ) comparada con el diámetro de la tubería (d). Para tuberías muy lisas como las de latón extruido o vidrio, el factor de fricción disminuye más rápidamente con el aumento del número de Reynolds que para tuberías con paredes más rugosas.

Como el tipo de la superficie interna de la tubería comercial es prácticamente independiente del diámetro, la rugosidad de las paredes tiene mayor efecto en el factor de fricción para diámetros pequeños. En consecuencia las tuberías de pequeño diámetro se acercan a la condición de gran rugosidad y en general tienen mayores factores de fricción que tuberías del mismo material, pero de mayores diámetros.

La información más útil y universalmente aceptada sobre factores de fricción que se utiliza en la fórmula de Darcy la presentó L.F. Moody. El profesor Moody mejoró la información en comparación con los conocidos diagramas de factores de fricción de Pigott y Kemler, incorporando investigaciones más recientes y aportaciones de muchos científicos de gran nivel.

El factor de fricción (f) se grafica con base a la rugosidad relativa y el número de Reynolds. El valor (f) se determina por la proyección horizontal de la intersección de la curva (ϵ/d) según el número de Reynolds calculado en la escala vertical a la izquierda (ver gráfica en el apéndice).

Efecto del tiempo y uso en la fricción de tuberías. Las pérdidas por fricción en tuberías son muy sensibles a los cambios de diámetro y rugosidad de las paredes. Para un caudal determinado y un factor de fricción fijo, la pérdida de presión por metro de tubería varía inversamente a la quinta potencia del diámetro, por ejemplo, si se reduce en 2% el diámetro, causa un incremento de la pérdida de presión del 11%; a su vez una reducción del 5% produce un incremento del 29%. En muchos de los servicios el interior de la tubería se va incrustando con cascarilla, tierra y otros materiales extraños, por lo cual es una práctica prudente dar margen para reducciones del diámetro de paso.

Los técnicos experimentales indican que la rugosidad puede incrementarse con el uso (debido a la corrosión o incrustación) en una proporción determinada por el material de la tubería y la naturaleza del fluido.

1.8 ECUACION GENERAL DE LOS MEDIDORES DE AREA FIJA

La deducción de esta ecuación tiene como base la ecuación de Bernoulli. Si se tiene un medidor instalado en una tubería como se muestra en la siguiente figura:

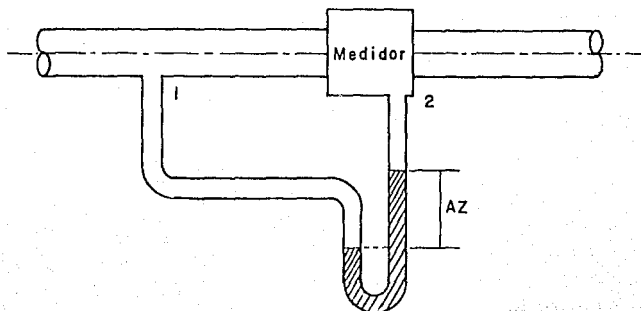


Figura (1.10)

Si se hace un balance entre los puntos 1 y 2 que están separados entre sí por una distancia despreciable comparada con la longitud total del sistema en donde no existe trabajo de bomba, se tiene:

Ecuación (1.20)

$$\frac{p_2}{\rho} + \frac{v_2^2}{2g_c} + F = \frac{p_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2g_c}$$

$$\frac{p_2 - p_1}{\rho} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g_c} + F = 0$$

$$\frac{v_2^2 - v_1^2}{2g_c} = \frac{p_1 - p_2}{\rho} - F$$

$$v_2^2 - v_1^2 = 2g_c \left(\frac{p_1 - p_2}{\rho} - F \right)$$

Mediante la ecuación de continuidad se tiene:

Ecuación (1.21)

$$Gm_1 = Gm_2 = v_1 A_1 \rho = v_2 A_2 \rho$$

Ecuación (1.22)

$$v_1 = \frac{v_2 A_2}{A_1} \quad ; \quad v_1^2 = \frac{v_2^2 A_2^2}{A_1^2}$$

Sustituyendo la ecuación (1.22) en la ecuación (1.20):

Ecuación (1.23)

$$v_2^2 - v_2^2 \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 = 2g_c \left(\frac{p_1 - p_2}{\rho} - F \right)$$

Factorizando se tiene:

Ecuación (1.24)

$$v_2^2 \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right] = 2g_c \left(\frac{p_1 - p_2}{\rho} - F \right)$$

Ecuación (1.25)

$$v_2^2 = \frac{2g_c \left[\left(\frac{p_1 - p_2}{\rho} \right) - F \right]}{1 - (A_2/A_1)^2}$$

El término entre corchetes [] representa la caída de presión atribuida a los cambios de energía cinética entre los puntos 1 y 2.

Por definición de gasto volumétrico:

Ecuación (1.26)

$$Gv_2 = v_2 A_2$$

Sustituyendo la ecuación (1.25) en (1.26) se obtiene:

Ecuación (1.27)

$$Gv_2 = \frac{A_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{2g_c \left[\frac{p_1 - p_2}{\rho} - F \right]}$$

La ecuación (1.27) es general para los medidores de área fija. La diferencia de presión medida por el manómetro es provocada por dos efectos: El cambio de energía cinética producida por un cambio de velocidad en el área de flujo y la pérdida de presión permanente, debido a la fricción de forma y de pared, de manera que, el término $(p_1 - p_2/\rho - F)$ representa una disminución de presión atribuible exclusivamente a cambios de energía cinética entre los puntos 1 y 2.

En la ecuación (1.27) todos los términos que aparecen en ella pueden determinarse, a excepción de las pérdidas de energía por fricción, de tal manera que para tener una verdadera equivalencia entre la caída de presión medida por el manómetro y el gasto volumétrico, se introduce una constante específica para cada aparato de medición de flujo.

1.9 MEDIDORES DE FLUJO

Un medidor de flujo es un aparato que determina generalmente por una simple medida, la cantidad (en peso o volumen), que por unidad de tiempo pasa a través de una sección transversal dada. Entre estos medidores de caudal están el orificio de aforo, la tobera, el venturímetro, el rotámetro, el vertedero de aforo y medidor de desplazamiento positivo, entre otros. A continuación se describen algunos de estos dispositivos de medición.

MEDIDORES DE AREA FIJA

1) PLACA DE ORIFICIO

Consiste en una placa de metal con una abertura u orificio que se coloca mediante dos bridas en la tubería. En la figura (1.11) se muestra la placa de orificio instalada y sus tomas de presión.

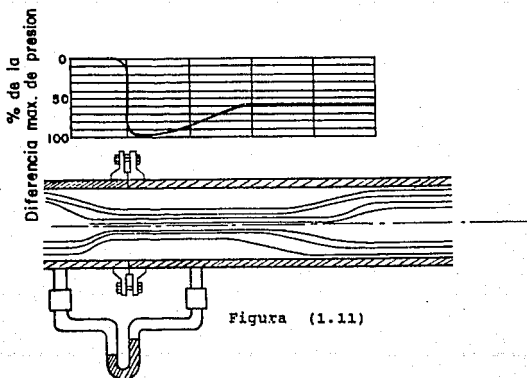


Figura (1.11)

La separación de la capa límite ocurre después de la placa y la pérdida por fricción es considerable. Las líneas de flujo alcanzan un mínimo de sección transversal después de la placa y este punto es conocido como "vena contracta", en donde se tiene la máxima caída de presión como se observa en la gráfica de la figura anterior. La localización de la vena contracta es una función de la velocidad del fluido, así como de la relación de diámetros de orificio a tubo. La toma de presión en la vena contracta es aproximada.

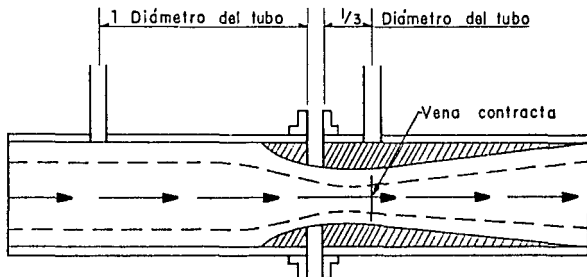


Figura (1.12)

La posición de las tomas de presión es arbitraria y el coeficiente del aparato depende de la posición de ellas. Las que se presentan en las figuras anteriores son de vena contracta. A continuación se anotan las distancias de las tomas a la placa para cada uno de los tipos de tomas que se encuentran en la práctica.

Tipo de toma	Distancia a la toma anterior desde la cara anterior de la placa de orificio.	Distancia a la toma posterior desde la cara anterior de la placa de orificio.
En las Bridas	Una pulgada	Una pulgada
En la vena Contracta	1 diámetro de tubería (interior)	0.3 a 0.8 diámetros interiores de tubería, dependiendo de la relación de diámetros.
En la tubería	2 1/2 diámetros nominales de tubería.	8 diámetros nominales de tubería.

El fundamento del medidor de orificio es idéntico al del tubo venturi y sus características son las siguientes:

- Máxima pérdida de presión permanente.
- Mayor facilidad en su instalación que el venturi.
- Es el medidor de más bajo costo.
- Requiere inspección periódica.
- Fácilmente maquinable.

Aplicando el teorema de Bernoulli y haciendo un balance entre el orificio (punto 1) y la sección posterior al orificio (punto 2), y despreciando las pérdidas por fricción, nos queda:

Ecuación (1.28)

$$\frac{v_1^2}{2 g_c} + \frac{p_1}{\rho} = \frac{v_2^2}{2 g_c} + \frac{p_2}{\rho}$$

Para un fluido incompresible:

$$v_2 = v_1 \left(\frac{D_1}{D_0} \right)^2$$

Sustituyendo:

Ecuación (1.29)

$$\frac{1}{2 g_c} \left[v_1^2 - v_1^2 \left(\frac{D_1}{D_0} \right)^4 \right] = \frac{\Delta P}{\rho}$$

Despejando v_1 y sabiendo que D_0 = Diámetro del orificio

Ecuación (1.30)

$$v_1 = \sqrt{\frac{2 g_c (\Delta P / \rho)}{1 - (D_0 / D_1)^4}}$$

En caso de que se consideren las pérdidas por fricción, se debe agregar el coeficiente de orificio (C_o); tenemos:

Ecuación (1.31)

$$v_1 = C_o \sqrt{\frac{2 g_c \Delta P / \rho}{1 - (D_0 / D_1)^4}}$$

Si se desea obtener el caudal:

Ecuación (1.32)

$$G_v = C_o A \sqrt{\frac{2 g_c (\Delta p / \rho)}{1 - (D_o/D_1)^4}}$$

Donde:

- v1 = Velocidad del fluido en el orificio.
- D0 = Diámetro del orificio.
- D1 = Diámetro de la tubería.
- A = Área de la sección transversal del orificio.
- C0 = Coeficiente de orificio o coeficiente de descarga para el caudal. Su valor varía entre 0.62 - 0.6 para orificios concéntricos de bordes afilados, si el número de Re > 20000 y con toma posterior en la vena contracta.

Usualmente el diámetro del orificio oscila entre 50 y 75 % del diámetro de la tubería. La toma de presión antes del orificio debe quedar a una distancia correspondiente a un diámetro de la tubería de la cara del orificio y la corriente abajo a una distancia de 0.5 D0.

En los medidores instalados la manera más simple de obtener la caída de presión consiste en el empleo de un manómetro en forma de U o inclinado, si la caída de presión es pequeña.

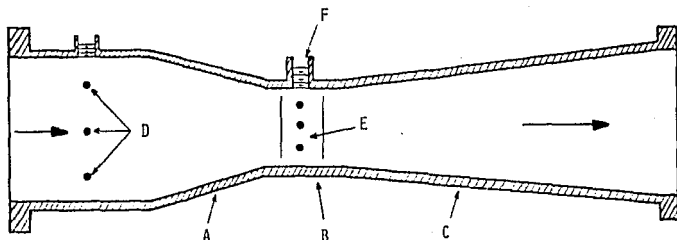
La pérdida de carga o pérdida permanentes por fricción se obtienen por gráficas o por fórmulas, como la siguiente:

Ecuación (1.33)

$$\Delta p \text{ (permanente)} = \Delta p \text{ (medido)} \left[1 - \left(\frac{D_o}{D_1} \right)^4 \right]$$

2) TUBO VENTURI

Este medidor está formado básicamente por dos conos y una garganta como se muestra en la figura (1.13):



Medidor venturi

Figura (1.13).

- A) Sección de entrada.
- B) Sección de la garganta.
- C) Sección de salida.
- D) Orificios de las cámaras piezométricas.
- E) Recubrimiento.
- F) Toma de presión.

En el tubo venturi la velocidad aumenta a lo largo del cono anterior y la presión disminuye, localizándose en la garganta la máxima velocidad y la mínima presión.

Pasado el estrechamiento la velocidad disminuye y se recupera en el cono posterior en gran parte la presión original. La diferencia de presión no recuperada se debe a la fricción ocasionada por el aparato.

El ángulo de convergencia es de 25 a 30 grados y el del cono de divergencia no excede de 7 grados y una sección intermedia que constituye la garganta.

Las principales características de un tubo venturi son las siguientes:

- Requiere poco mantenimiento.
- Tiene mínima pérdida de presión permanente.
- Permite el paso de 1.6 veces más fluido que la placa de orificio (bajo la misma caída de presión).
- Presenta mayor dificultad en su instalación que la placa de orificio.

La ecuación para obtener la velocidad y caudal se obtiene de manera similar a la de la placa de orificio.

Ecuación (1.34)

$$v_1 = C_v \sqrt{\frac{2 g_c (\Delta P/\rho)}{1 - (D_0/D_1)^4}}$$

Ecuación (1.35)

$$GV = C_v A \sqrt{\frac{2 g_c (\Delta P/\rho)}{1 - (D_0/D_1)^4}}$$

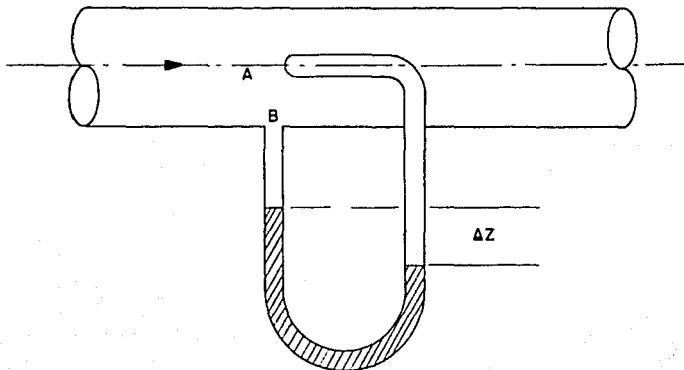
Donde:

- C_v = Coeficiente del venturi (valor medio 0.98).
- v_1 = Velocidad en la garganta del venturi.
- D_0 = Diámetro garganta.
- D_1 = Diámetro tubería.

Las pérdidas de presión no recuperables son equivalentes al 10% de la caída de presión marcada en el manómetro diferencial.

3) TUBO PITOT

Es un aparato que sirve para medir la velocidad local a lo largo de una línea de corriente. En la figura (1.14), se muestra un esquema del tubo Pitot y la abertura del tubo de impacto (A), perpendicular a la dirección del flujo, mientras que la abertura del tubo estático (B) es paralela.

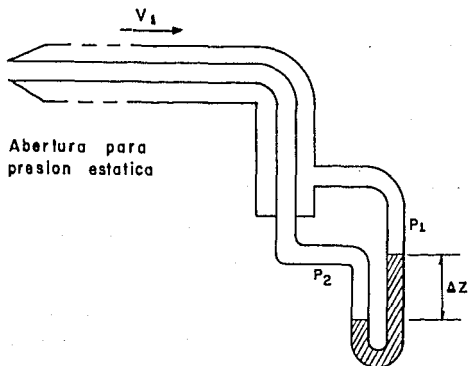


Esquema del tubo pitot.

Figura (1.14)

Los dos tubos están conectados a las ramas de un manómetro diferencial que opera bajo el principio de balance entre dos presiones, u otro sistema equivalente de medida de pequeñas diferencias de presión. La abertura de impacto contiene un punto de estancamiento (A) y la línea de corriente (AA') termina en ese punto.

En la práctica no se utilizan tubos Pitot como el de la figura anterior, sino un tubo estándar formado por dos tubos concéntricos, que en el tubo interno tiene la abertura dirigida a la corriente del fluido mientras que en el tubo exterior tiene pequeñas perforaciones en la pared por medio de las cuales se transmite la presión estática. Por medio de la abertura en el tubo interno se transmite la presión del fluido más la equivalente a la energía cinética del fluido en movimiento (por el choque del mismo), de tal forma que la diferencia de presión entre los tubos concéntricos será proporcional a la velocidad de impacto en el punto (A). En la figura (1.15) se muestra un esquema como el tubo Pitot anteriormente descrito.



Tubo pitot

Figura (1.15)

La desventaja del tubo Pitot es que mide solamente velocidades locales, por lo que es más adecuado su empleo en flujo de gases.

Este medidor es recomendable siempre y cuando la distribución de velocidades sea uniforme y si no hay sólidos en suspensión.

La fórmula para calcular la velocidad está dada por:

Ecuación (1.36)

$$v_1 = \sqrt{\frac{\Delta P \cdot 2 \cdot g_c}{\rho}}$$

Ecuación (1.37)

$$v_1 = C_{pit} \sqrt{\frac{\Delta P \cdot 2 \cdot g_c}{\rho}}$$

Donde:

C_{pit} = Coeficiente de tubo de Pitot.

La velocidad en el punto A (abertura de impacto), a diferencia de los otros medidores, es cero y es ahí donde se tiene la máxima presión, debido a que la energía de velocidad se transforma en energía de presión como se indicó antes.

MEDIDORES DE AREA VARIABLE

1) ROTAMETRO

El Rotámetro es un instrumento de medición de fluidos en estado líquido o gaseoso, cuya característica principal es tener un área variable de flujo.

Consta principalmente de un tubo de vidrio de sección cónica montado sobre un cuerpo metálico denominado carcaza. Dentro de este tubo se encuentra el elemento de medición llamado "flotador", el cual genera una caída de presión constante al paso del líquido entre la pared del tubo y el diámetro del flotador. En los extremos de la carcaza se encuentran dos cabezales metálicos generalmente del mismo material que la tubería donde están montados dos topes (superior e inferior), para que el flotador no escape por efecto de la corriente del fluido, cuenta también con sus respectivos sellos para evitar fugas.

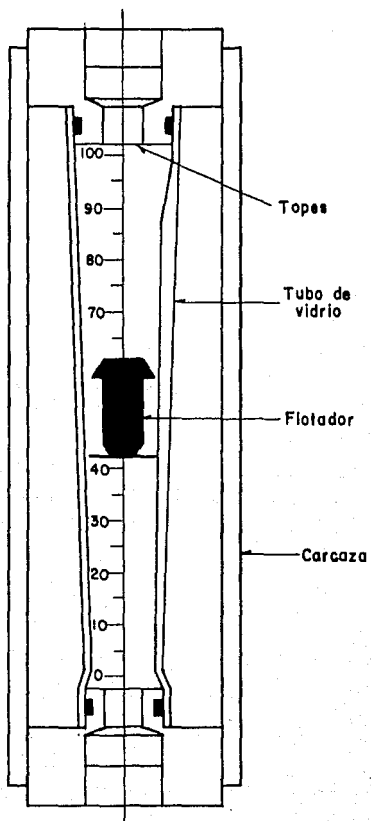
El tubo de vidrio está graduado con una escala que puede indicar directamente el gasto o el porcentaje del flujo, tomando como referencia la capacidad de medida del instrumento.

El rotámetro se instala siempre en posición vertical y de tal modo que el fluido que va a ser medido pase de la parte inferior a la superior y así el fluido ejerce un impulso sobre el flotador, el cual asciende a una cierta altura que es proporcional al gasto volumétrico del fluido; de esta manera el flotador permanecerá suspendido mientras el flujo se mantenga constante. La calibración debe efectuarse en base a la lectura en la escala del tubo de vidrio. En la figura (1.16) se muestra un rotámetro y sus partes.

Es posible encontrar rotámetros con tubos que no sean de vidrio para casos como el de líquidos opacos, líquidos calientes, o cuando se tienen altas presiones que pueden dañar al vidrio, en este caso el flotador está provisto de un indicador que hace posible la medición.

Las principales características para un rotámetro son las siguientes:

- Facilidad de lectura.
- Facilidad en su instalación.
- Buena exactitud.
- Bajo costo de mantenimiento.
- costo inicial elevado.



Rotámetro y sus partes principales

Fig. (1.16)

PRINCIPIO DE OPERACION

Haciendo un balance de fuerzas a través del flotador y considerando como punto 1 la parte inferior y punto 2 la parte superior, se tiene:

Ecuación (1.38)

$$p_1 A_f - p_2 A_f + v_f p_e - v_f p_{ef} = 0$$

En donde el subíndice (f) se refiere al flotador. Despejando (p1- p2) la caída de presión que genera el flotador se obtiene:

Ecuación (1.39)

$$p_1 - p_2 = \frac{v_f}{A_f} (p_{ef} - p_e)$$

Para un medidor operando sobre un fluido definido el lado derecho de la ecuación (1.39) es constante y por lo tanto, la caída de la presión es independiente del gasto volumétrico manejado.

Los fabricantes de rotámetros dan la siguiente fórmula empírica para conocer el gasto volumétrico de un fluido cualquiera (x), que pasa por el aparato, siempre y cuando se conozca el gasto de agua para la misma posición del flotador.

Ecuación (1.40)

$$(Gv)_x = (Gv)_{\text{agua}} \sqrt{\frac{p_{ef} - p_{ex}}{7.09 p_{ex}}}$$

MEDIDORES DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO

Un medidor de desplazamiento positivo es un aparato que consta de émbolos o tabiques que son desplazados por la corriente fluida y de un mecanismo contador que registra el número de desplazamientos en una unidad conveniente como litros o metros cúbicos.

El gasto de un líquido no volátil como el agua, puede medirse mediante una técnica de peso directo. El tiempo necesario para almacenar una cantidad de líquido en un tanque se mide y entonces se efectúa una medición exacta del peso del líquido reunido; la tasa promedio del flujo se calcula entonces fácilmente. Puede mejorarse la exactitud mediante el uso de periodos más largos o más precisos. Con frecuencia la técnica de pesado directo se emplea a fin de calibrar medidores para flujo de agua y otros líquidos y por lo tanto, puede tomarse como una técnica estandar de calibración.

Por lo general los medidores de flujo de desplazamiento positivo se usan en aplicaciones donde se desea alta exactitud en condiciones de flujo constante. Un dispositivo típico de desplazamiento positivo es el "disco", que se muestra en la figura (1.17), usado en la mayoría de los sistemas domésticos de distribución de agua.

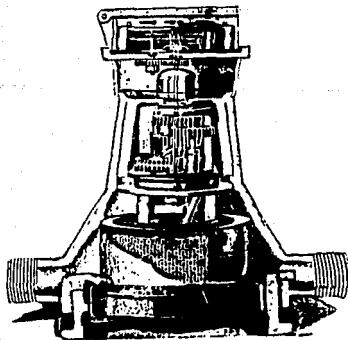


Figura (1.17) Medidor de disco

Este medidor opera con el principio de disco oscilante. El agua entra por el lado izquierdo del medidor y choca con el disco, el cual está montado excéntricamente, con objeto de que el fluido se mueva por el medidor y el disco pueda "cabecear" u oscilar sobre su eje vertical, ya que la parte superior y el fondo del disco permanecen en contacto con la cámara de montaje.

Una pared separa las cámaras de entrada y salida del disco. Conforme el disco oscila da una indicación directa del volumen del líquido que pasa por el medidor; la indicación del flujo volumétrico le da un arreglo al tren de engranes y registrador conectado con el disco que oscila. El medidor con disco oscilante puede dar mediciones de flujo confiables de 1%. Después de mucho uso el error puede ser muy grande para fluidos pequeños.

El volumen del gas de uso doméstico a bajas presiones se mide generalmente por un medidor volumétrico con tabique móvil. El tabique se desplaza cuando el gas entra por un extremo del recipiente en el que está colocado; después por un cambio de válvulas se vuelve a desplazar en sentido opuesto. Estos desplazamientos actúan sobre un mecanismo contador.

Otro medidor de desplazamiento positivo es el medidor de aspas rotatorias (fig. 1.18), las aspas están cargadas con resorte, de modo que mantiene contacto continuo con el cuerpo del medidor. Se encierra una cantidad fija de fluido en cada sección conforme el tambor excéntrico gira; este fluido finalmente encuentra su camino a la salida, un registrador conectado al eje del tambor excéntrico registra el volumen del fluido desplazado. La incertidumbre de los medidores de aspas rotatorias están dentro del orden de 0.5% y los medidores son relativamente insensibles a la viscosidad, ya que las aspas siempre mantienen contacto con el interior del cuerpo del medidor.

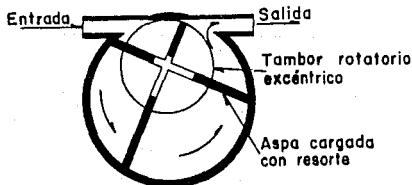


Figura (1.18) Medidor de Flujo con Aspas Rotatorias

El medidor con impulsor de lóbulos, mostrado en la figura (1.19), puede usarse para mediciones de flujo de gases o líquidos. El impulsor y el cuerpo se maquinan con cuidado, de modo que se mantenga un ajuste exacto; en esta forma el líquido que entra siempre está encerrado entre los dos rotores y se transporta a la salida como resultado de su rotación. El número de revoluciones de los rotores es una indicación del flujo volumétrico.

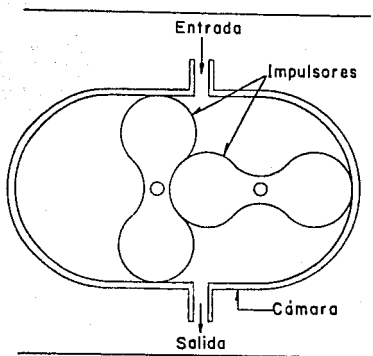


Figura (1.19) Medidor de Flujo con Lóbulos Impulsores

CAPITULO IIDISEÑO Y CONSTRUCCION DEL EQUIPO

2.1 CONSIDERACIONES

A) En la construcción y diseño del sistema de tubería para realizar prácticas sobre flujo de fluidos (agua), en el laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad La Salle se dispuso de un espacio relativamente pequeño para instalar dicho sistema con cuatro diferentes dispositivos de medición.

Las dimensiones del sistema son:

Altura : 2.20 mts.
 Longitud : 2.50 mts.
 Area total : 5.59 mts.

B) Debido a que este equipo se usará 1 ó 2 veces por ciclo escolar para realizar prácticas, la placa de orificio y el venturímetro se adquirieron en acero inoxidable 304 para evitar mantenimientos frecuentes por incrustación u otros desperfectos.

C) El sistema de tubería instalado en el laboratorio debe contar mínimo con cuatro dispositivos de medición de flujo:

- 1) Rotámetro (área variable).
- 2) Placa de Orificio (área fija).
- 3) Venturímetro (área fija).
- 4) Medidor de Desplazamiento Positivo
o de paletas deslizantes.

2.2 DISEÑO

El equipo para la medición de flujo de fluidos consta de un sistema de tubería de cobre cédula 40 y diámetro de una pulgada. Cuenta con dos ramales de tubería unidas entre sí en dos puntos; esto se aprecia mejor en el dibujo isométrico que se muestra en el inciso (2.4). En la tubería están conectadas varias válvulas que permiten regular el flujo, según las necesidades de operación, así como escoger el ramal con el cual se quiera trabajar.

En el ramal (A) se encuentra conectado un rotámetro que permite medir el caudal (rango 1 - 7.5 LPM) directamente y una placa de orificio que tiene conectado un manómetro de tubo inclinado a 45 grados con Hg que nos da la medición del diferencial de presión (Δp).

En el ramal (B) se encuentra conectado en primera instancia un medidor de desplazamiento positivo, seguido de un tubo venturí o venturímetro con un manómetro de tubo inclinado a 50 grados con Hg para tomar mediciones de diferencial de presión (Δp).

Los dispositivos conectados en el sistema nos permitirán hacer una comparación entre sí y poder analizar ventajas y desventajas reportadas en la literatura.

2.3 DESCRIPCION DE LOS MEDIDORES DE FLUJO

1) ROTAMETRO

El rotámetro es un medidor de área fija. El instalado en el sistema corresponde al modelo CF - 45376LHN - 6 con una escala en la medición de flujo de 1 - 7.5 LPM (0.2 - 2.0 GPM) y longitud nominal de 80 mm con flotador en acero inoxidable 316.

El tubo cónico transparente es a base de polisulfono, termoplástico que ofrece excelente resistencia al calor, abrasión y a la agresividad del medio ambiente. Las características del polisulfono ayudan a reemplazar las unidades de vidrio y metal más costosas en muchas aplicaciones.

Se debe tener cuidado en el uso del rotámetro dentro del rango propuesto por el fabricante, ya que hay muchos factores que influyen en la integridad del medidor, como pueden ser: El esfuerzo que resulta de la conexión del medidor, daño debido a la vibración o deterioro excesivo causado por el contacto de abrasivos o de ciertos materiales químicos.

Las condiciones de trabajo recomendadas para el rotámetro conectado en el sistema son:

- a) Temperatura máxima de trabajo : 240 grados F.
- b) Presión máxima de trabajo : 250 Psi.

2) PLACA DE ORIFICIO

Medidor de área fija con placa de orificio en acero inoxidable 304 con un diámetro de orificio de 1/2" en 150 libras y 1/8" de espesor para ser conectada en tubería de 1".

Este dispositivo cuenta con bridas portaplaca de orificio en acero al carbón de cuello soldable, 300 libras de 1" de diámetro.

Para usos prácticos, la relación de diámetros se obtiene de la siguiente forma:

$$\beta = \frac{D0}{D1} = \frac{0.5''}{1.0''} = 0.5$$

D0 = Diámetro del orificio (=) Pulgadas

D1 = Diámetro de la tubería (=) Pulgadas

Es decir el diámetro del orificio esta a 50% del diámetro de la tubería.

Las tomas de presión están situadas en las bridas, una antes y otra después de la placa de orificio.

3) MEDIDOR DE DESPLAZAMIENTO POSITIVO (PALETAS DESLIZANTES)

Un medidor típico de este tipo, es el que se usa en los sistemas domésticos de distribución de agua.

Este medidor es de acero al carbón y cuello soldable. Cuenta con una carátula en la parte superior, la cual en su parte media cuenta con un contador con capacidad de medición de hasta 5,000 lts. (5 m cúbicos) y en el borde está graduado tipo reloj con un rango de 0 - 100 litros.

La lectura en este medidor es visual y se debe contar con un cronómetro para reportar la medición en unidad de tiempo.

4) TUBO VENTURI O VENTURIMETRO

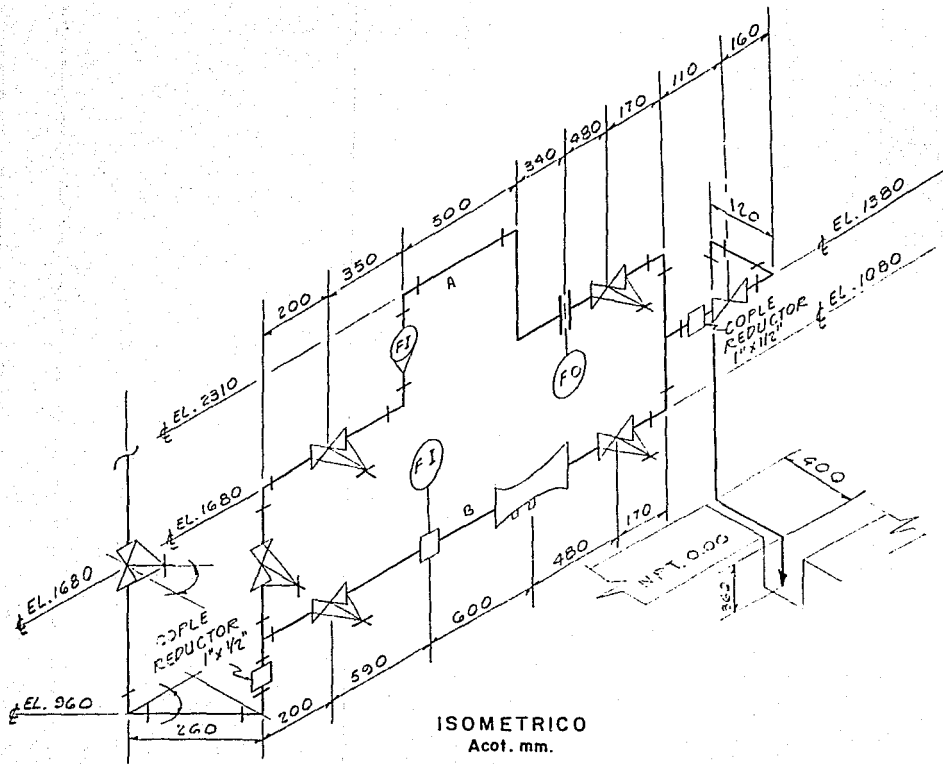
Medidor de área fija, hecho en material de acero inoxidable 304, cédula 40 para ser instalado en tubería de 1" con un flujo máximo de 3 metros cúbicos por segundo; para trabajar con fluido líquido (agua) cuya densidad aproximada es de 1 gramo por centímetro cúbico a una temperatura de operación aproximada a 22 grados centígrados y con una presión de caída libre.

El orificio del tubo venturi es de 1/2" de diámetro, de tal manera que la relación de diámetros queda de la siguiente manera:

$$k = \frac{D0}{D1} = \frac{0.5''}{1.0''} = 0.5$$

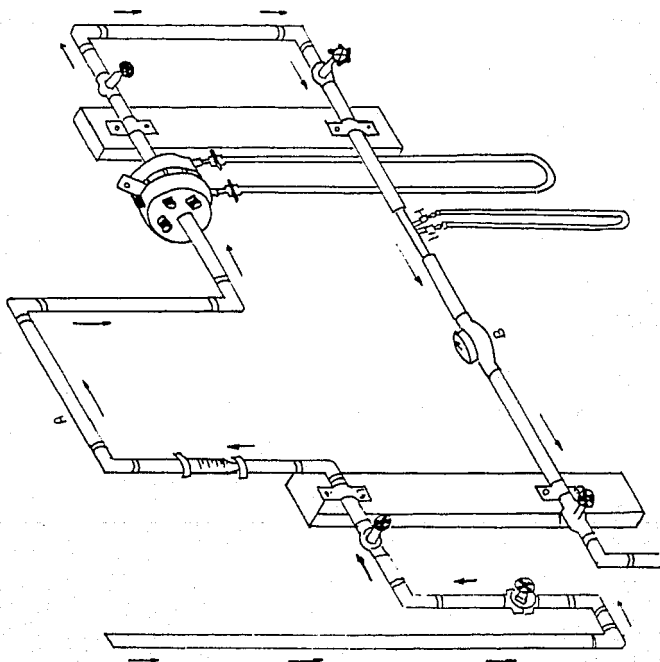
D0 = Diámetro del orificio (=) pulgadas.

D1 = Diámetro de la tubería (=) pulgadas.



ISOMETRICO
Acot. mm.

Fig. (2.1)

DIBUJO DEL SISTEMA INSTALADO

2.5 ANALISIS DE COSTOS

Para la construcción del sistema de tubería con los diferentes medidores de flujo para realizar prácticas sobre flujo de fluidos se ha requerido de algunos materiales e instrumentos de medición y mano de obra, cada uno de ellos se describe a continuación:

<u>CANTIDAD</u>	<u>UNIDAD</u>	<u>DESCRIPCION</u>	<u>P. UNITARIO</u>	<u>COSTO TOTAL (M.N.)</u>
1	Pieza	Tubo Venturi en acero inox. 304.	\$ 621,000.0	\$ 621,000.0
1	Pieza	Rotámetro graduado en polisulfono.	330,993.0	330,993.0
1	Pieza	Placa de orificio en acero inox. 304.	106,490.0	106,490.0
1	Pieza	Brida Portaplaca de orificio en acero al carbón.	404,685.0	404,685.0
1	Pieza	Medidor de flujo Paletas Deslizantes en acero al carbón.	120,000.0	120,000.0
2	Piezas	Manómetro de vidrio tubo inclinado.	60,000.0	120,000.0
8	Metros	Tubo de cobre de 1" de diámetro.	7,000.0	56,000.0
2	Metros	Tubo de cobre de 1/2" de diámetro.	13,400.0	26,800.0
3	Piezas	Válvula compuerta 1" diámetro en bronce.	32,000.0	96,000.0
2	Piezas	Válvula compuerta 1/2" diámetro en bronce.	36,000.0	72,000.0
2	Piezas	Válvula de paso 1/2" de diámetro en bronce.	25,000.0	50,000.0
7	Piezas	Codo 90 grados 1" de diámetro en cobre.	1,000.0	7,000.0

5	Piezas	Codo 90 grados 1/2" de diámetro en cobre.	1,200.0	6,000.0
6	Piezas	Reducción de 1" x 3/4" diám. en cobre.	2,200.0	13,200.0
2	Piezas	Reducción de 1" x 1/2" diám. en cobre.	2,300.0	4,600.0
2	Piezas	Cople de 1" diám. en cobre.	1,200.0	2,400.0
2	Piezas	T de 1" diám. en cobre.	600.0	1,200.0
Mano de obra para la instalación				120,000.0
otros gastos				60,000.0
COSTO TOTAL				<u>\$ 2'218,368.0</u>

CAPITULO III
EXPERIMENTACION Y ANALISIS
DE LOS EXPERIMENTOS

3.1 CONSIDERACIONES TEORICAS

Para el desarrollo del siguiente capítulo se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones teóricas:

a) FORMULAS:

*** Diferencial de Presiones:**

$$\Delta p = h \operatorname{sen} \Theta (\rho_m - \rho_a) \quad (=) \frac{g}{\operatorname{cm}^2}$$

*** Número de Reynolds:**

$$Re = \frac{D_o v \rho_a}{\mu_a} \quad (=) \text{Adimensional}$$

*** Velocidad:**

$$v = C_o \left[\frac{(2) (g_c) (\Delta p / \rho_a)}{1 - (D_o / D_1)^4} \right]^{1/2} \quad (=) \frac{\operatorname{cm}}{\operatorname{seg.}} \quad \text{PLACA DE ROIFICIO}$$

$$v = C_v \left[\frac{(2) (g_c) (\Delta p / \rho_a)}{1 - (D_o / D_1)^4} \right]^{1/2} \quad (=) \frac{\operatorname{cm}}{\operatorname{seg.}} \quad \text{VENTURIMETRO}$$

*** Gasto Volumétrico:**

$$G_v = C_o A_o \left[\frac{(2) (g_c) (\Delta p / \rho_a)}{1 - (D_o / D_1)^4} \right] \quad (=) \frac{\operatorname{cm}^3}{\operatorname{seg.}} \quad \text{PLACA DE ORIFICIO}$$

$$G_v = C_v A_o \left[\frac{(2) (g_c) (\Delta p / \rho_a)}{1 - (D_o / D_1)^4} \right] \quad (=) \frac{\operatorname{cm}^3}{\operatorname{seg.}} \quad \text{VENTURIMETRO}$$

b) Tomando como base una temperatura de 22 grados centígrados la densidad para el agua y mercurio es la siguiente:

- 1) Densidad del agua = 0.9978158 g/cm^3 .
- 2) Densidad del mercurio = 13.5409 g/cm^3 .

c) NOMENCLATURA USADA:

T_r = Temperatura de trabajo (=) 22 grados centígrados.

Δp = Diferencial de presiones (=) g / cm^2 .

h = Longitud de Hg desplazado en el manómetro (=) cm.

Θ = Angulo de inclinación del manómetro de tubo de vidrio.

ρ_m = Densidad del fluido medidor, Hg (=) 13.5409 g / cm^3 .

ρ_a = Densidad del agua (=) 0.9978 g / cm^3 .

Re = Número de Reynolds (=) adimensional.

D_0 = Diámetro del orificio (=) 1.3031 cm.

D_1 = Diámetro de la tubería (=) 2.6062 cm.

v = Velocidad del fluido en el orificio (=) cm / seg .

μ_a = Viscosidad del fluido (=) 0.001 g / cm seg .

gc = Aceleración de la gravedad (=) $980.66 \text{ cm / seg}^2$.

Co = Coeficiente de orificio. Valor medio = 0.62 si $Re > 20,000$.

Cv = Coeficiente del venturímetro. Valor medio = 0.98.

A_0 = Area del orificio (=) 1.3136 cm^2 .

T A B L A I

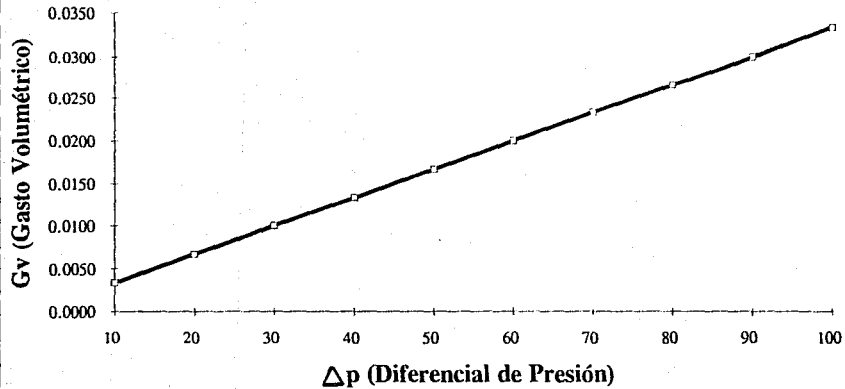
3.2 DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS EN EL TUBO VENTURI

m ³	seg.	Gv(m ³ /seg)	h(cmHg)	Δp (g/cm ²)
0.001	14.0	0.0043	0.30	2.90
0.004	64.0	0.0037	0.50	4.80
0.003	15.0	0.0120	0.70	6.72
0.003	15.0	0.0120	0.90	8.64
0.005	21.0	0.0140	1.10	9.60
0.001	4.0	0.0150	1.00	9.60
0.002	9.0	0.0133	1.10	10.56
0.005	15.0	0.0200	1.90	18.25
0.002	8.0	0.0500	1.90	18.25
0.003	10.0	0.0180	2.00	19.21
0.002	5.0	0.0240	2.70	25.94
0.010	32.0	0.0190	2.80	26.90
0.010	28.0	0.0210	2.90	27.86
0.003	8.0	0.0225	3.20	30.74
0.003	7.0	0.0260	3.30	31.70
0.010	11.0	0.0550	3.50	32.62
0.003	34.0	0.0053	3.40	32.66
0.003	7.0	0.0260	3.70	35.55
0.010	23.0	0.0260	3.90	37.47
0.005	10.0	0.0300	4.30	41.31
0.005	11.0	0.0270	4.50	43.23
0.004	7.0	0.0340	5.60	53.80
0.010	18.0	0.0330	6.00	57.65
0.005	9.0	0.0333	6.50	62.45
0.010	17.0	0.0350	7.30	70.14
0.005	8.0	0.0370	7.30	70.14
0.005	7.0	0.0430	8.90	85.51
0.005	8.0	0.0370	9.00	86.47
0.010	15.0	0.0400	9.30	89.35
0.010	15.0	0.0400	9.60	92.24

- NOTAS:
- 1) Las medidas de Δp fueron tomadas en manómetro de tubo inclinado a 50 grados.
 - 2) La lectura de Gv fue tomada en el medidor de desplazamiento positivo.

GRAFICA No. 1

Datos Experimentales (Tubo Venturi)



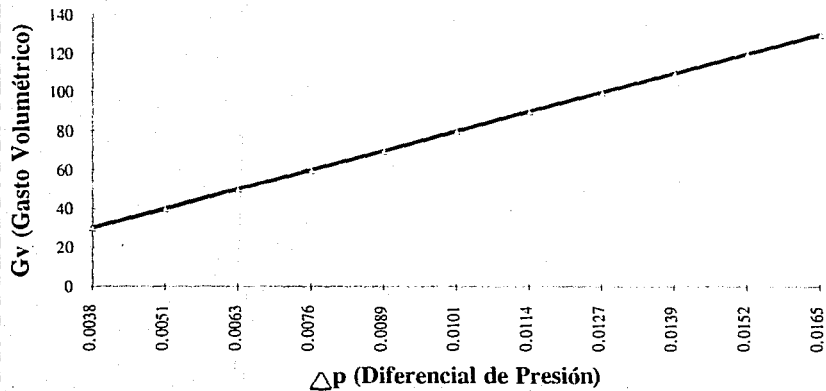
T A B L A II

3.3 CALCULOS BASADOS EN FORMULAS PARA EL TUBO VENTURI

Δp (g/cm ²)	V (cm/seg)	Re	Gv (m ³ /min)
2.90	76.42	99,364	0.0061
4.80	98.31	127,826	0.0078
6.72	116.33	151,256	0.0093
8.64	131.90	171,501	0.0100
9.60	139.04	180,794	0.0110
9.60	139.04	180,784	0.0110
10.56	145.82	189,600	0.0110
18.25	191.70	249,255	0.0150
18.25	191.70	249,255	0.0150
19.21	196.68	255,730	0.0160
25.94	228.55	297,168	0.0180
26.90	232.74	302,616	0.0190
27.86	236.85	307,960	0.0190
30.74	248.79	323,485	0.0200
31.70	252.65	328,504	0.0200
32.62	256.29	333,237	0.0200
32.66	256.45	333,445	0.0200
35.55	267.55	347,877	0.0210
37.47	274.68	357,148	0.0220
41.31	298.42	375,013	0.0230
43.23	294.04	362,320	0.0240
53.80	329.14	427,959	0.0260
57.65	314.72	443,015	0.0270
62.45	354.62	461,089	0.0280
70.14	375.82	488,654	0.0300
70.14	375.82	488,654	0.0300
85.51	414.96	539,545	0.0330
86.47	417.28	542,561	0.0330
89.35	424.17	551,520	0.0340
92.24	430.97	560,361	0.0340

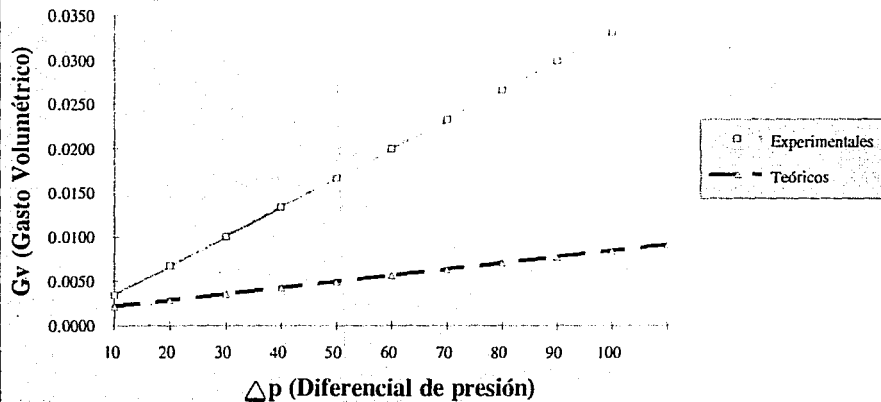
GRAFICA No. 2

Datos Teóricos (Tubo Venturi)



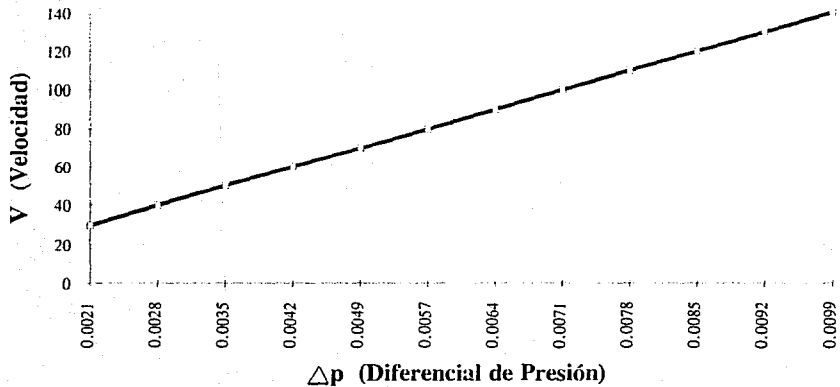
GRAFICA No. 3

Comparación de Datos



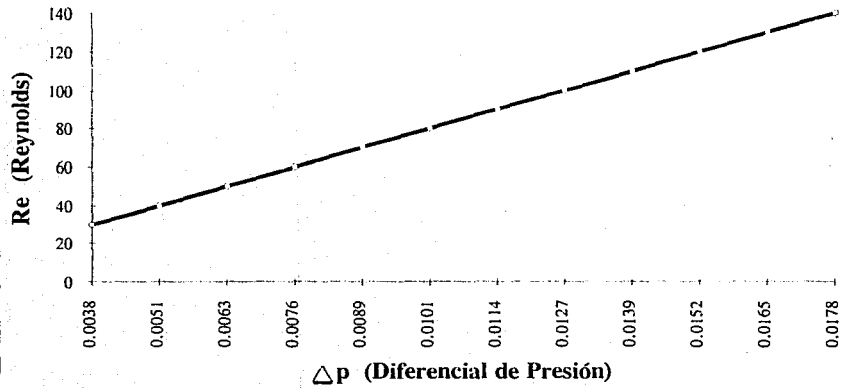
GRAFICA No. 4

Tubo Venturi



GRAFICA No. 5

Tubo Venturi



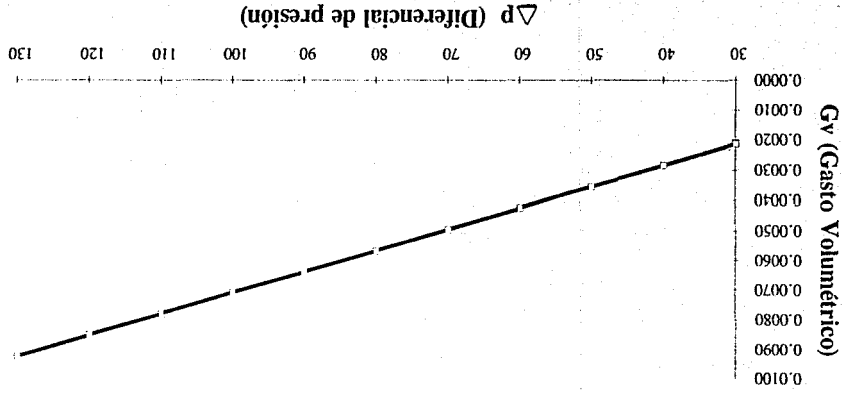
T A B L A III

3.4 DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS EN EL MEDIDOR DE ORIFICIO.

Gv (m ³ /seg)	h (cmHg)	ΔP (g/cm ²)
0.0010	4.0	35.48
0.0010	4.0	35.48
0.0150	4.0	35.48
0.0020	5.0	44.35
0.0020	5.0	44.35
0.0020	5.0	44.35
0.0150	5.0	44.35
0.0020	6.0	53.22
0.0035	6.0	53.22
0.0030	7.7	62.10
0.0030	7.0	62.10
0.0035	7.0	62.10
0.0040	7.0	62.10
0.0040	7.0	62.10
0.0040	7.0	62.10
0.0050	8.0	70.95
0.0050	8.0	70.95
0.0050	8.0	70.95
0.0050	8.0	70.95
0.0055	9.0	79.82
0.0065	10.0	88.70
0.0065	10.0	88.70
0.0065	11.0	97.60
0.0070	12.0	106.43
0.0070	12.0	106.43
0.0070	12.0	106.43
0.0075	14.0	124.20
0.0075	14.0	124.20
0.0075	14.0	124.20
0.0075	16.0	141.90

- NOTAS:
- 1) Las medidas de Δp fueron tomadas en manómetro de tubo inclinado a 45 grados.
 - 2) La lectura de gasto volumétrico (Gv) fue tomada en el rotámetro.

Datos Experimentales (Medidor de Orificio)



GRAFICA No. 6

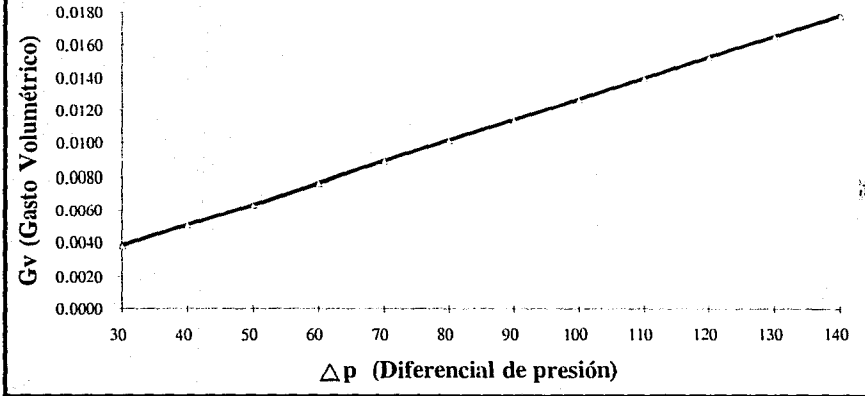
T A B L A IV

3,5 CALCULOS BASADOS EN FORMULAS PARA EL MEDIDOR DE ORIFICIO

Δp (g/cm ²)	V (cm/seg)	Re	Gv (m ³ /min)
35.48	169.10	219,869	0.01333
35.48	169.10	219,869	0.01333
35.48	169.10	219,869	0.01333
44.35	189.10	245,874	0.01490
44.35	189.10	245,874	0.01490
44.35	189.10	245,874	0.01490
44.35	189.10	245,874	0.01490
53.22	207.11	269,291	0.01632
53.22	207.11	269,291	0.01632
62.10	223.72	290,888	0.01763
62.10	223.72	290,888	0.01763
62.10	223.72	290,888	0.01763
62.10	223.72	290,888	0.01763
62.10	223.72	290,888	0.01763
62.10	223.72	290,888	0.01763
70.95	239.13	310,925	0.01885
70.95	239.13	310,925	0.01885
70.95	239.13	310,925	0.01885
70.95	239.13	310,925	0.01885
79.82	253.64	329,791	0.01999
88.70	267.37	347,643	0.02107
88.70	267.37	347,643	0.02107
97.60	280.47	364,676	0.02210
106.43	292.88	380,812	0.02308
106.43	292.88	380,812	0.02308
106.43	292.88	380,812	0.02308
124.20	316.39	411,381	0.02494
124.20	316.39	411,381	0.02494
124.20	316.39	411,381	0.02494
141.90	338.18	439,713	0.02665

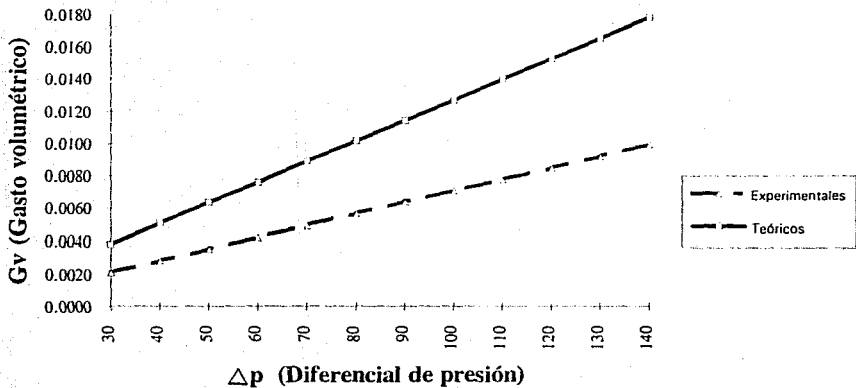
GRAFICA No. 7

Datos Teóricos (Medidor de orificio)



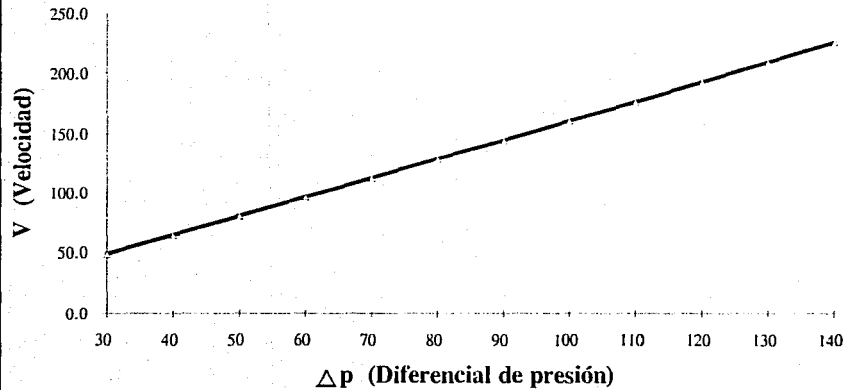
GRAFICA No. 8

Comparación de Datos



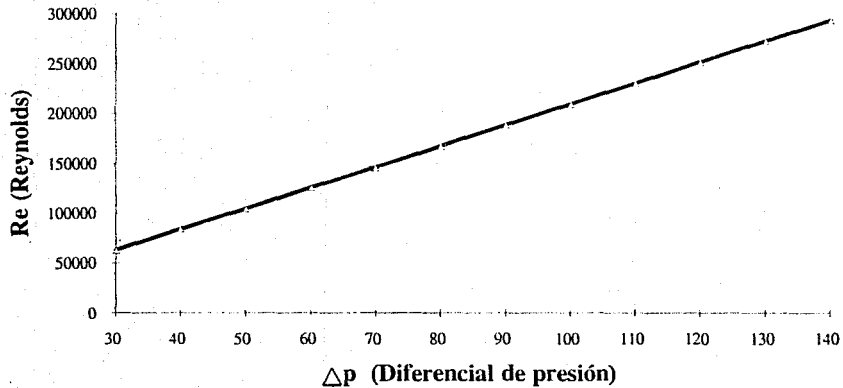
GRAFICA No. 9

Medidor de Orificio



GRAFICA No. 10

Medidor de Orificio



CAPITULO IV
PRACTICA PROPUESTA

PRACTICA PROPUESTA**MEDIDORES DE FLUJO Y BALANCE DE MATERIA****OBJETIVOS:**

- A) Mostrar a los alumnos de Ingeniería Química diferentes medidores de flujo.
- B) Obtener medidas de caídas de presión en el venturímetro y en la placa de orificio y transformarlas en caudales.
- C) Comprobar ventajas y desventajas entre los diferentes medidores de flujo instalados en el sistema de tubería.

INTRODUCCION :

Una de las variables fundamentales en los balances de materia es el gasto o cantidad de materia que se procesa por unidad de tiempo.

En general tenemos:

$$a) \quad G = \text{kg/h} \quad \text{Gasto Másico.}$$

$$b) \quad G = \text{Kg mol/h} \quad \text{Gasto Molar.}$$

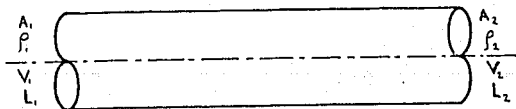
$$c) \quad Gv = \text{m}^3/\text{h} \quad \text{Gasto Volumétrico.}$$

La relación existente entre las variables antes mencionadas es la siguiente:

$$G = Gv \rho = G \text{ PM}$$

Donde: ρ = Densidad y PM = Peso Molecular.

Para una tubería (x) el balance de materia se convierte en la ecuación de continuidad.



Si consideramos que el régimen es permanente:

$$L1 = L2$$

$$v1 \rho_1 A1 = v2 \rho_2 A2$$

En donde (v) es la velocidad y (A) es el área de flujo.

En la industria son contados los equipos que miden la cantidad de materia que pasa por un punto por unidad de tiempo (Gasto másico, G), siendo más frecuentes los equipos que miden el caudal (Gasto Volumétrico, Gv) o la velocidad en la línea.

Entre los medidores de flujo o caudalímetros más comunes se tienen los rotámetros, medidores de paletas deslizantes, Tubos venturi (venturímetros), Placa de orificio, tubo Pitot, etc.

Muchos de los medidores de flujo producen un estrangulamiento en la tubería, lo que a su vez produce una caída de presión en la tubería. El Δp producido puede convertirse en velocidad o caudal mediante la aplicación de la ecuación de balance de energía.

TECNICA DE OPERACION

Los alumnos operarán un sistema de flujo de fluidos, en el cual están instalados varios medidores de flujo. Tomarán las mediciones necesarias de tiempo, caídas de presión, diámetros, etc., asegurándose de que tienen los datos necesarios para calcular el flujo másico, molar y volumétrico.

MATERIAL NECESARIO:

- Probetas de 2 litros.
- Vernier.
- Cronómetro.

TRABAJO POSTERIOR A LA REALIZACION DE LA PRACTICA

- 1) Entregar el cuestionario resuelto.
- 2) Hacer un dibujo isométrico del sistema de flujo de fluidos instalado en el laboratorio y entregar en forma de tabla los datos experimentales obtenidos en la práctica.
- 3) Presentar gráfica de velocidad Vs Δp en el tubo venturi y placa de orificio.
- 4) Presentar gráfica de G_v Vs ΔP para el tubo venturi y placa de orificio.
- 5) Entregar cálculos del gasto volumétrico obtenidos en el tubo venturi y compararlos con el caudal medido en el medidor de paletas deslizantes.
- 6) Entregar cálculos del gasto volumétrico obtenidos en el medidor de orificio y compararlos con el caudal obtenido en el rotámetro.
- 7) Hacer conclusiones y recomendaciones que crea convenientes.
- 8) Bibliografía.

CUESTIONARIO :

- 1.- ¿ A qué se le llama medidor de flujo ?
- 2.- Mencione y describa por lo menos 3 medidores de flujo.
- 3.- ¿ Qué ventajas y desventajas tiene el tubo venturi con respecto a la placa de orificio ?
- 4.- ¿ Qué es la vena contracta y dónde se localiza ?
- 5.- ¿ Cómo funciona un medidor de paletas deslizantes ?
- 6.- ¿ Cómo funciona un medidor de tubo Pitot ?
- 7.- ¿Cuál es la ecuación para obtener el caudal en un tubo Pitot ?
- 8.- Describir esquemáticamente un rotámetro.
- 9.- ¿ Bajo qué principio opera un medidor tipo rotámetro ?
- 10.- ¿Cuál es la ecuación que relaciona el caudal en un rotámetro ?
- 11.- ¿ Cómo funciona un tubo venturi ?
- 12.- ¿ Qué ecuación relaciona el caudal en un tubo venturi ?
- 13.- ¿ Cómo funciona un medidor de placa de orificio ?
- 14.- ¿Cuál es la ecuación para el caudal en una placa de orificio ?
- 15.- ¿ A qué se deben las pérdidas permanentes de presión de un medidor de placa de orificio ?
- 16.- Si no se dispone de un medidor de flujo en el sistema a manejar, ¿ De qué manera se puede medir el gasto ?
- 17.- Mencione los diferentes tipos de errores experimentales comunes en la medición de flujo y cómo se calculan ?
- 18.- ¿ Puede variar las condiciones de presión dentro del sistema a operar ? ¿ De qué manera ?
- 19.- ¿ Qué es un anemómetro ?
- 20.- ¿ Cómo funciona un anemómetro de hilo caliente ?

ESTA TESIS NO DEBE
SALIR DE LA BIBLIOTECA

79

CONCLUSIONES

CONCLUSIONES

En base a la información y datos presentados en este trabajo podemos concluir:

El conocimiento del principio de funcionamiento de los medidores de flujo de fluidos es básico para un estudiante de ingeniería química y en general para toda aquella persona involucrada en los procesos industriales, o que tenga que ver con alguna medición de flujo, ya que en el campo práctico la utilización de los mismos es necesaria para un buen desarrollo de las diferentes operaciones que se realizan en el transporte de fluidos, siendo fundamental en algunas ocasiones para el costo-beneficio de algún proceso.

El sistema diseñado e instalado en el Laboratorio de Ingeniería Química de la Universidad La Salle, cumple totalmente con el objetivo de transmitir y reafirmar el conocimiento sobre medidores de flujo de fluidos al estudiante de Ingeniería Química. Esto se logra al contar dentro de un mismo sistema con los medidores de flujo de fluidos más comunes, así como la teoría recopilada de diferentes fuentes en el presente trabajo, que nos permitirá hacer una clara diferenciación de las ventajas y desventajas que tiene cada uno de los medidores durante su funcionamiento y comprobar, comparando los resultados obtenidos experimentalmente con las ecuaciones teóricas reportadas en la literatura.

APENDICE

A 1. Viscosidades del agua líquida.

Temperatura °C	Viscosidad en Cp	Temperatura °C	Viscosidad en Cp	Temperatura °C	Viscosidad en Cp
0	1.792	33	0.7523	67	0.3233
1	1.731	34	0.7371	68	0.3174
2	1.673	35	0.7225	69	0.3117
3	1.619	36	0.7085	70	0.3061
4	1.567	37	0.6947	71	0.3006
5	1.519	38	0.6814	72	0.2952
6	1.473	39	0.6685	73	0.2900
7	1.428	40	0.6560	74	0.2849
8	1.386	41	0.6439	75	0.2799
9	1.346	42	0.6321	76	0.2750
10	1.308	43	0.6207	77	0.2702
11	1.271	44	0.6097	78	0.2655
12	1.236	45	0.5988	79	0.2610
13	1.203	46	0.5883	80	0.2565
14	1.171	47	0.5782	81	0.2521
15	1.140	48	0.5683	82	0.2478
16	1.111	49	0.5588	83	0.2436
17	1.083	50	0.5494	84	0.2395
18	1.056	51	0.5404	85	0.2355
19	1.030	52	0.5315	86	0.2315
20	1.005	53	0.5229	87	0.2276
20.2	1.000	54	0.5146	88	0.2239
21	0.9810	55	0.5064	89	0.2203
22	0.9579	56	0.4985	90	0.2165
23	0.9358	57	0.4907	91	0.2130
24	0.9142	58	0.4832	92	0.2095
25	0.8937	59	0.4759	93	0.2060
26	0.8737	60	0.4688	94	0.2027
27	0.8545	61	0.4618	95	0.1994
28	0.8360	62	0.4550	96	0.1962
29	0.8180	63	0.4483	97	0.1930
30	0.8007	64	0.4418	98	0.1899
31	0.7840	65	0.4355	99	0.1868
32	0.7679	66	0.4293	100	0.1838

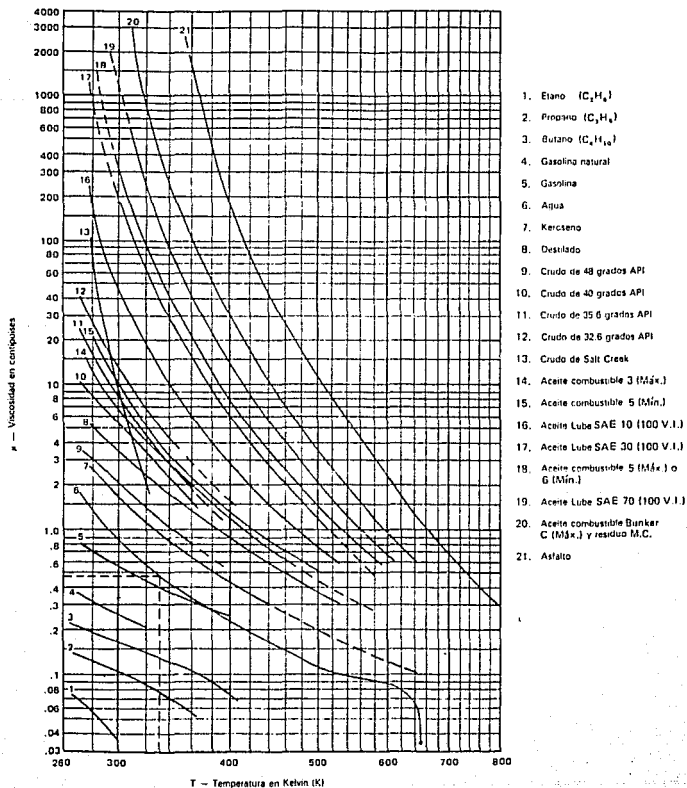
A II. Viscosidad del agua y del vapor de agua, en centipoises (μ)

Temp. °C	Presión, Bar absoluto														
	1	5	10	25	50	75	100	150	200	300	400	500	600	700	800
0	1.750	1.750	1.750	1.750	1.750	1.750	1.750	1.740	1.740	1.740	1.730	1.720	1.720	1.710	1.710
50	.544	.544	.544	.544	.545	.545	.545	.546	.546	.547	.548	.549	.550	.551	.552
100	.212	.219	.229	.280	.280	.280	.281	.282	.283	.285	.287	.289	.291	.293	.295
150	.014	.181	.181	.182	.182	.183	.183	.184	.186	.188	.190	.192	.194	.197	.199
200	.016	.016	.016	.134	.135	.135	.136	.137	.138	.140	.143	.145	.148	.150	.152
250	.018	.018	.018	.018	.107	.108	.108	.110	.111	.113	.116	.118	.121	.123	.126
300	.020	.020	.020	.020	.020	.020	.090	.092	.093	.095	.098	.101	.103	.106	.108
350	.022								.073	.078	.082	.085	.087	.089	.091
375	.023	.023	.023	.024	.024	.024	.025	.026	.029 ^a	.066	.072	.076	.079	.082	.085
400	.024	.024	.024	.025	.025	.025	.026	.027	.029	.046	.063	.069	.074	.077	.080
425	.025	.025	.025	.026	.026	.026	.027	.028	.029	.034	.050	.061	.067	.071	.075
450	.026	.026	.026	.027	.027	.027	.028	.028	.030	.033	.041	.052	.060	.065	.069
475	.027	.027	.027	.028	.028	.028	.029	.029	.030	.033	.038	.046	.053	.060	.064
500	.028	.028	.028	.029	.029	.029	.029	.030	.031	.033	.037	.042	.048	.054	.060
550	.030	.030	.030	.031	.031	.031	.031	.032	.033	.035	.037	.040	.044	.048	.053
600	.032	.032	.033	.033	.033	.033	.033	.034	.034	.036	.038	.040	.043	.046	.049
650	.034	.034	.035	.035	.035	.035	.035	.036	.036	.038	.039	.041	.043	.045	.048
700	.036	.037	.037	.037	.037	.037	.037	.038	.038	.039	.041	.042	.044	.046	.048

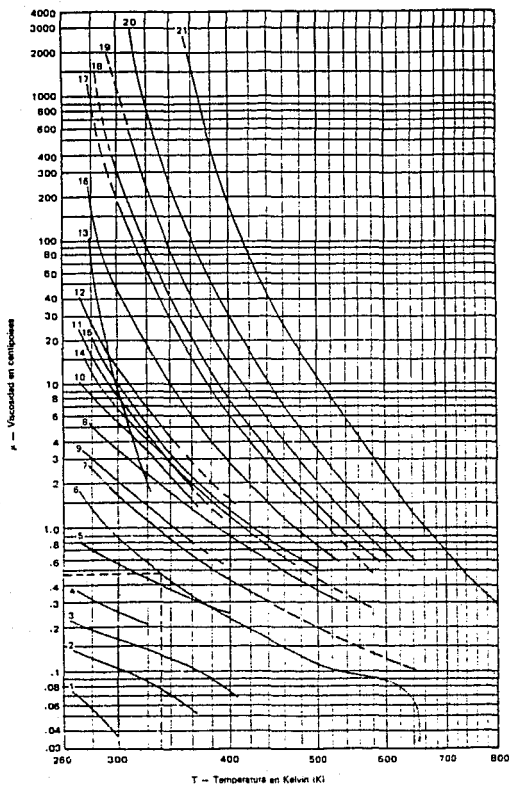
Notas: (1) El vapor para 0°C y 1 bar se refiere a un estado líquido metaestable. Aquí el estado estable es el sólido.

(2) e Punto crítico, 374.15°C, 221.2 bar

A III. Viscosidad del agua y de líquidos derivados del petróleo



A IV. Viscosidad del agua y de líquidos derivados del petróleo



1. Etano (C_2H_6)
2. Propano (C_3H_8)
3. Butano (C_4H_{10})
4. Gasolina natural
5. Gasolina
6. Agua
7. Keroseno
8. Destilado
9. Crudo de 48 grados API
10. Crudo de 40 grados API
11. Crudo de 35.6 grados API
12. Crudo de 32.6 grados API
13. Crudo de Salt Creek
14. Acete combustible 3 (Máx.)
15. Acete combustible 5 (Mín.)
16. Acete Lube SAE 10 (100 V.I.)
17. Acete Lube SAE 30 (100 V.I.)
18. Acete combustible 5 (Máx.) o 6 (Mín.)
19. Acete Lube SAE 70 (100 V.I.)
20. Acete combustible Bunker C (Máx.) y residuo M.C.
21. Asfalto

A VI. Equivalencias de viscosidad absoluta (dinámica)

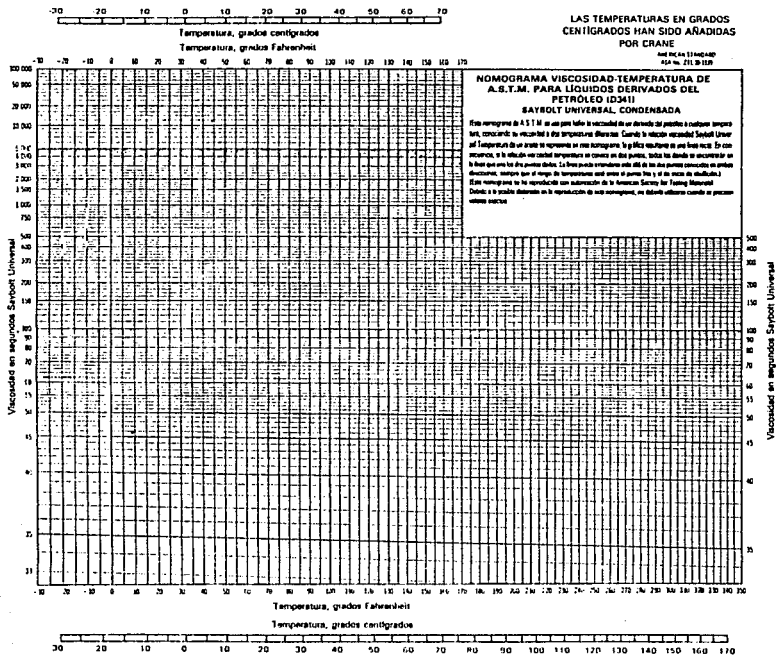
PARA OBTENER MULTIPLIQUESE por	Pascal segundo Pa s	Centipoise cP	Poundal segundo por pie cuadrado pdl s/ft ²	Libra-fuerza segundo por pie cuadrado lbf s/ft ²	Kilogramo-fuerza segundo por metro cuadrado kgf s/m ²
1 pascal segundo (= 1 N s/m ²) Pa s	= 1	1000	0.672	2.09×10^{-3}	0.102
1 centipoise cP	= 0.001	1	6.72×10^{-4}	2.09×10^{-3}	1.02×10^{-4}
1 poundal segundo pie cuadrado (= 1 lb/(ft s)) pdl s/ft ²	= 1.488	1488	1	0.031	0.152
1 libra-fuerza segundo por pie cuadrado (= 1 slug/(ft s)) lbf s/ft ²	= 47.88	47 880	32.174	1	4.882
1 kilogramo-fuerza segundo por metro cuadrado kgf s/m ²	= 9.807	9807	6.590	0.205	1

Para convertir viscosidades absoluta o dinámicas de unas unidades a otras, localícese la unidad dada en la columna de la izquierda y multiplíquese su valor numérico por el factor que se encuentra en la columna encabezada por la unidad que se desea obtener.

Equivalencias de viscosidad cinemática

PARA OBTENER MULTIPLIQUESE por	Metro cuadrado por segundo m ² /s	Centistokes cSt	Pulgada cuadrada por segundo in ² /s	Pie cuadrado por segundo ft ² /s
1 metro cuadrado por segundo m ² /s	= 1	1×10^6	1550	10.764
1 centistokes cSt	= 1×10^{-6}	1	1.55×10^{-3}	1.0764×10^{-1}
1 pulgada cuadrada por segundo in ² /s	= 6.452×10^{-4}	645.2	1	6.944×10^{-1}
1 pie cuadrado por segundo ft ² /s	= 9.290×10^{-2}	92 903	144	1

Para convertir viscosidades cinemáticas de unas unidades a otras, localícese la unidad dada en la columna de la izquierda y multiplíquese su valor numérico por el factor que se encuentra en la columna encabezada por la unidad que se desea obtener.



A VII. Nomograma de viscosidad Saybolt Universal

A VIII. Propiedades físicas del agua

Temperatura del agua	Presión de saturación	Volumen específico	Densidad
t	p^*	$v \times 10^3$	ρ
Grados centígrados	Bar absolutos	Decímetros cúbicos por kilogramo	Kilogramos por metro cúbico
.01	.006112	1.0002	999.8
5	.008719	1.0001	999.9
10	.012271	1.0003	999.7
15	.017041	1.0010	999.0
20	.023368	1.0018	998.2
25	.031663	1.0030	997.0
30	.042418	1.0044	995.6
35	.056217	1.0060	994.0
40	.073750	1.0079	992.2
45	.09582	1.0099	990.2
50	.12335	1.0121	988.0
55	.15740	1.0145	985.7
60	.19919	1.0171	983.2
65	.25008	1.0199	980.5
70	.31160	1.0228	977.7
75	.38547	1.0258	974.8
80	.47359	1.0290	971.8
85	.57803	1.0324	968.6
90	.70109	1.0359	965.3
95	.84526	1.0396	961.9
100	1.01325	1.0435	958.3
110	1.4326	1.0515	951.0
120	1.9853	1.0603	943.1
130	2.7012	1.0697	934.8
140	3.6136	1.0798	926.1
150	4.7597	1.0906	916.9
160	6.1803	1.1021	907.4
170	7.9203	1.1144	897.3
180	10.0271	1.1275	886.9
190	12.552	1.1415	876.0
200	15.551	1.1565	864.7
225	25.504	1.1992	833.9
250	39.776	1.2512	799.2
275	59.49	1.3168	759.4
300	85.92	1.4036	712.5
325	120.57	1.5289	654.1
350	165.37	1.741	574.4
374.15	221.30	3.170	315.5

Para convertir el volumen específico de decímetros cúbicos por kilogramo (dm^3/kg) a metros cúbicos por kilogramo (m^3/kg) dividanse los valores de la tabla entre 10^3 .

Para convertir la densidad en kilogramos por metro cúbico (kg/m^3) a kilogramos por litro (kg/litro) dividanse los valores de la tabla entre 10^3 .

Peso específico del agua a $15^\circ\text{C} = 1.00$

A IX. Densidad del agua.

T °C	ρ kg/l	T °C	ρ kg/l
0	0.99987	33	0.99473
1	0.99993	34	0.99440
2	0.99997	35	0.99406
3	0.99999	36	0.99371
4	1.00000	37	0.99336
5	0.99999	38	0.99300
6	0.99997	39	0.99263
7	0.99993	40	0.99225
8	0.99988	41	0.99187
9	0.99981	42	0.99147
10	0.99973	43	0.99107
11	0.99963	44	0.99066
12	0.99952	45	0.99025
13	0.99940	46	0.98982
14	0.99927	47	0.98940
15	0.99913	48	0.98896
16	0.99897	49	0.98852
17	0.99880	50	0.98807
18	0.99862	51	0.98762
19	0.99843	52	0.98715
20	0.99823	53	0.98669
21	0.99802	54	0.98621
22	0.99780	55	0.98573
23	0.99757	60	0.98324
24	0.99733	65	0.98050
25	0.99708	70	0.97781
26	0.99682	75	0.97489
27	0.99655	80	0.97183
28	0.99627	85	0.96865
29	0.99598	90	0.96534
30	0.99568	95	0.96192
31	0.99537	100	0.95838
32	0.99506		

A X. Equivalencias entre grados API, grados Baumé, peso específico y densidad a 60°F/60°F (15.6°C/15.6°C)

Grados API n Baumé	Valores para la escala API		Valores para la escala Baumé			
	Aceites		Líquidos más pesados que el agua		Líquidos más pesados que el agua	
	Peso específico	Densidad kg m ³	Peso específico	Densidad kg m ³	Peso específico	Densidad kg m ³
	S	ρ	S	ρ	S	ρ
0	...	...	...	...	1.0000	998.9
2	...	...	...	...	1.0140	1013.0
4	...	...	...	...	1.0284	1027.4
6	...	...	...	...	1.0432	1042.2
8	...	...	...	...	1.0584	1057.4
10	1.0000	998.9	1.0000	998.9	1.0741	1073.1
12	0.9861	985.1	0.9859	985.0	1.0902	1089.1
14	0.9725	971.5	0.9722	971.2	1.1069	1105.6
16	0.9593	958.4	0.9589	957.9	1.1240	1122.9
18	0.9465	945.6	0.9459	944.9	1.1417	1140.5
20	0.9340	933.1	0.9333	932.3	1.1600	1158.6
22	0.9218	920.0	0.9211	920.1	1.1789	1177.7
24	0.9100	909.0	0.9091	908.2	1.1983	1197.1
26	0.8984	897.5	0.8974	896.6	1.2185	1217.2
28	0.8871	886.1	0.8861	885.2	1.2393	1238.1
30	0.8762	875.3	0.8750	874.1	1.2609	1259.7
32	0.8654	864.5	0.8642	863.4	1.2832	1282.0
34	0.8550	854.1	0.8537	852.8	1.3063	1305.0
36	0.8448	844.0	0.8434	842.6	1.3303	1328.9
38	0.8348	833.9	0.8333	832.5	1.3551	1353.7
40	0.8251	824.3	0.8235	822.7	1.3810	1379.7
42	0.8155	814.7	0.8140	813.1	1.4078	1406.4
44	0.8063	805.4	0.8046	803.8	1.4356	1434.1
46	0.7972	796.4	0.7955	794.7	1.4646	1463.1
48	0.7883	787.5	0.7865	785.7	1.4948	1493.2
50	0.7796	778.8	0.7778	777.1	1.5263	1524.8
52	0.7711	770.3	0.7692	768.4	1.5591	1557.5
54	0.7628	762.0	0.7609	760.1	1.5934	1591.8
56	0.7547	754.0	0.7527	751.9	1.6292	1627.5
58	0.7467	746.0	0.7447	743.9	1.6667	1665.0
60	0.7389	738.1	0.7368	736.1	1.7059	1704.2
62	0.7313	730.6	0.7292	728.5	1.7470	1745.2
64	0.7238	723.1	0.7216	720.8	1.7901	1788.3
66	0.7165	715.7	0.7143	713.6	1.8354	1833.5
68	0.7093	708.5	0.7071	706.4	1.8831	1881.2
70	0.7022	701.5	0.7000	699.4	1.9333	1931.4
72	0.6953	694.6	0.6931	692.3	...	...
74	0.6886	687.8	0.6863	685.6	...	...
76	0.6819	681.3	0.6796	679.9	...	...
78	0.6754	674.7	0.6731	672.5	...	...
80	0.6690	668.3	0.6667	666.0	...	...
82	0.6625	662.0	0.6604	659.8	...	...
84	0.6566	656.0	0.6542	653.6	...	...
86	0.6506	649.9	0.6482	647.5	...	...
88	0.6446	643.9	0.6422	641.5	...	...
90	0.6388	638.2	0.6364	635.8	...	...
92	0.6331	632.4	0.6306	630.0	...	...
94	0.6275	626.8	0.6250	624.4	...	...
96	0.6220	621.4	0.6195	618.8	...	...
98	0.6166	615.9	0.6140	613.3	...	...
100	0.6112	610.6	0.6087	608.1	...	...

Para obtener densidades en kilogramos por litro (kg litro) dividan las densidades en kg m³ por 10³

A XI. Factores de fricción para tuberías comerciales de acero limpias

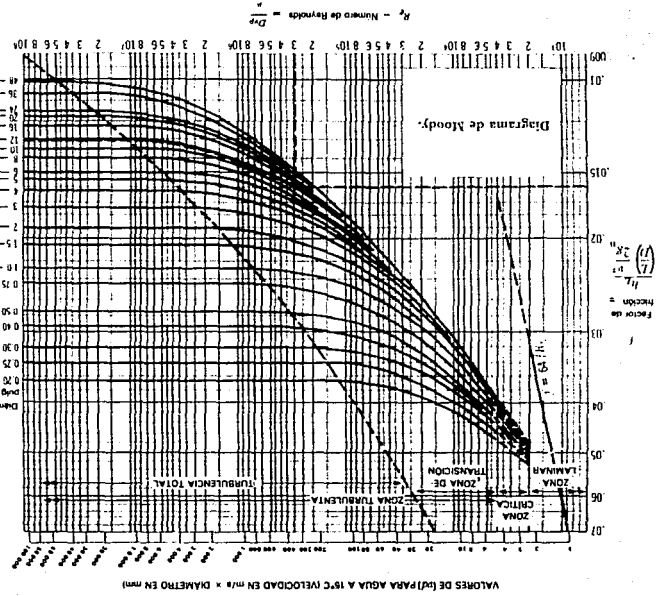
Diámetro exterior
mm

Paso nominal
de la tubería
en pulgadas

Numero de cédula

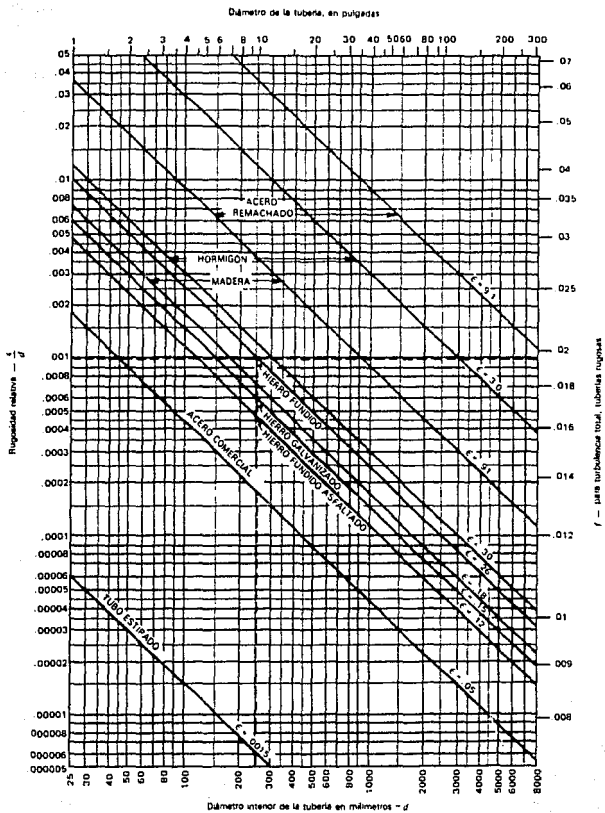
48	1219	40
36	914	30
24	610	20
16	406	16
12	305	12
10	254	10
8	203	8
6	152	6
5	127	5
4	102	4
3	76	3
2	51	2
1.5	38.1	1.5
1	25.4	1
0.75	19.0	0.75
0.5	12.7	0.5
0.4	10.2	0.4
0.3	7.6	0.3
0.25	6.3	0.25
0.2	5.1	0.2
0.15	3.8	0.15
0.125	3.2	0.125
0.1	2.5	0.1
0.075	1.9	0.075
0.06	1.5	0.06
0.05	1.3	0.05
0.04	1.0	0.04
0.03	0.8	0.03
0.025	0.6	0.025
0.02	0.5	0.02
0.015	0.4	0.015
0.01	0.3	0.01

El diagrama superior se refiere a tuberías de acero según ANSI 36.10 y B51.600 e indica los diámetros interiores de estas tuberías para diferentes números de cédula. Para otras tuberías de acero comerciales, hállese el diámetro interior y véase sólo la gráfica principal.

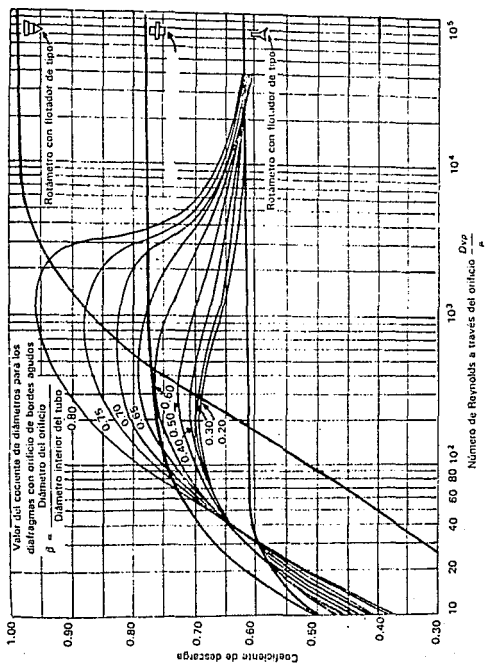


VALORES DE f PARA AGUA A 15°C (VELOCIDAD EN m/s x DIÁMETRO EN mm)

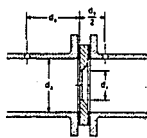
A XII. Rugosidad relativa de los materiales de las tuberías y factor de fricción para flujo en régimen de turbulencia total



A XIII. Variación del coeficiente de descarga en función del número de Reynolds, para orificios de boques agudos y rotámetros.



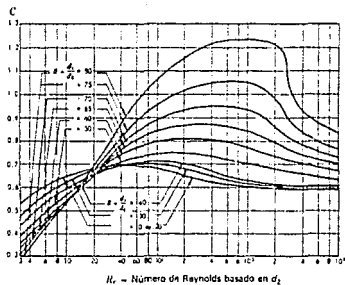
A XIV. Coeficiente de flujo C para orificios de cantos vivos¹¹¹



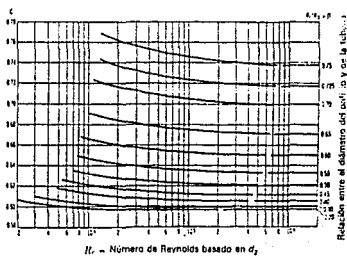
Sentido de flujo —

$$C = \frac{C_d}{\sqrt{1 - \beta^4}}$$

$$K_{\text{orificio}} \approx \frac{1 - \beta^4}{C_d^2}$$



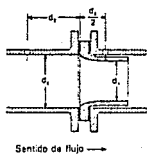
Re = Número de Reynolds basado en d_2



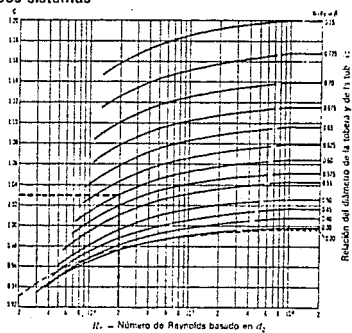
Re = Número de Reynolds basado en d_2

Reducción entre el diámetro del orificio y el diámetro del tubo

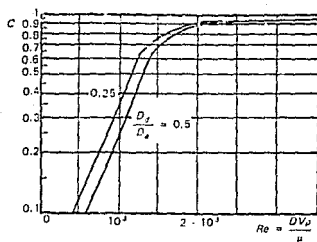
A XV. Coeficiente de flujo C para toberas para ambos sistemas



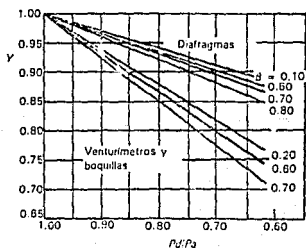
$$C = \frac{C_d}{\sqrt{1 - \beta^4}}$$



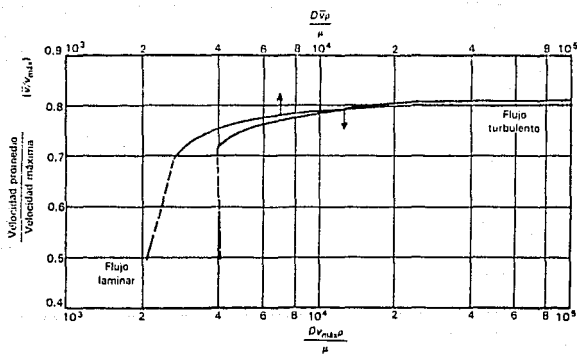
A XVI. Coeficiente de descarga para los venturímetros.



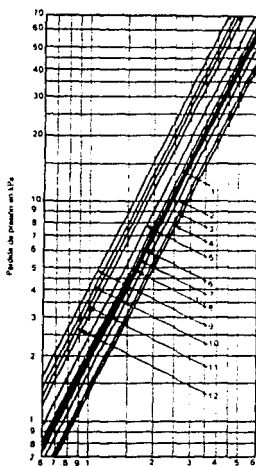
Factor de expansión Y frente a la relación de presiones para venturímetros y boquillas y para diafragmas



A XVII. Relación entre la velocidad promedio y la velocidad máxima en tuberías cilíndricas.



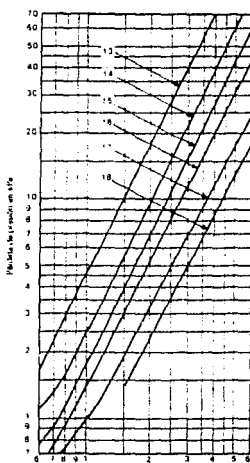
A XVIII. Pruebas hechas por Crane con agua



Velocidad del agua en m/s

Figura 24

1 kPa = 0.01 bar



Velocidad del agua en m/s

Figura 26

Pruebas con agua—Curvas 1 a 18

Fluido	No. de figura	No. de curva	Medida nominal Pulg. mm	Tipo de válvula*	
Agua	Figura 2-4	1	1/4 20	Válvula de globo de hierro fundido, clase 150, modelo en Y, asiento plano	
		2	1/2 50		
		3	3/4 100		
		4	1 150		
	Figura 2-5	5	1 1/2 40	Válvula angular de bronce, clase 150 con obturador de anillo reconvertible, asiento plano	
		6	2 50		
		7	2 1/2 65		
		8	3 80		
		9	1 1/2 40		Válvula de globo convencional de bronce, clase 150, con obturador de anillo reconvertible, asiento plano
		10	2 50		
		11	2 1/2 65		
		12	3 80		
Figura 2-6	13	1/2 10	Válvula de retención (check) oscilante, de bronce, clase 200		
	14	3/4 15			
	15	1 20			
	16	1 1/4 32			
	17	2 50			
	18	1/2 10	Válvula de retención (check) oscilante, cuerpo de hierro, clase 123		

*Excepción para válvulas de retención (check) oscilantes hechas, donde las arafugas (14 y 17) se curvan, todas las válvulas se probaron con el obturador completamente abierto.

BIBLIOGRAFIA

BIBLIOGRAFIA

- 1) Perry Robert H. & Chilton Cecil H.
Biblioteca de Ingeniero Químico
Editorial McGRAW - HILL
Segunda Edición en Español
México, 1987.
- 2) Crane Co.
Flujo de Fluidos en Válvulas, Accesorios y Tuberías
Editorial McGRAW - HILL
Traducido de la Primera Edición en Inglés "Flow of Fluids
Technical Paper 410"
México, 1988.
- 3) Valiente Barderas Antonio
Problemas de Flujo de Fluidos
Editorial LIMUSA
Primera Edición
México, 1990.
- 4) Azevedo & Acosta
Manual de Hidráulica
Editorial Harla
Sexta Edición
México, 1975.
- 5) Nataix Claudio
Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas
Editorial Harla
Segunda Edición
México, 1982.
- 6) Holman Jack P.
Métodos Experimentales para Ingenieros
Editorial McGRAW - HILL
Segunda Edición en Español
México, 1986.
- 7) Streeter & Wylie
Fluids Mevhanics
McGRAW - HILL Editorial
Seventh Edition
U.S.A., 1981.
- 8) Shames Irving H.
La Mecánica de los Fluidos
Editorial McGRAW - HILL
Primera Edición
México, 1970.

- 9) Felder Richard M. & Rousseau Ronald W.
Principios Básicos de los Procesos Químicos
Editorial El Manual Moderno
Primera Edición
México, 1984.
- 10) King Horace W., Wisler Chester O. & Woodburn Jame G.
Hidráulica
Editorial Trillas
Primera Edición en Español
México, 1980.
- 11) Sotelo Avila Gilberto
Hidráulica General
Editorial LIMUSA
Primera Edición
México, 1974.
- 12) Trueba Coronel Samuel
Hidráulica
Editorial CECSA
Primera Edición
México, 1975.
- 13) Stanford Massey Bernard
Mecánica de los Fluidos
Editorial CECSA
Primera Edición
México, 1979.