

FLUJO EN TUBERIAS

RESUMEN

En el flujo interno, una tubería está totalmente llena con fluido. El flujo laminar se caracteriza por líneas de corriente suave y movimiento enormemente ordenado, y el flujo turbulento se caracteriza por fluctuaciones de velocidad y movimiento enormemente desordenado. El número de Reynolds se define como:

$$Re = \frac{\text{Fuerzas inerciales}}{\text{fuerzas viscosas}} = \frac{V_{prom} D}{\nu} = \frac{\rho V_{prom} D}{\mu}$$

En la mayoría de las condiciones prácticas, el flujo en una tubería es laminar a $Re < 2300$, turbulento a $Re > 4000$ y transicional entre estos valores.

La región del flujo en la que se sienten los efectos de las fuerzas de corte viscosas se llama capa límite de velocidad. La región desde la entrada de la tubería al punto en el que la capa límite sumerge en la línea central se llama región de entrada hidrodinámica, y la longitud de esta región se llama longitud de entrada hidrodinámica L_h . Esta dada por:

$$L_{h,laminar} \cong 0.05 Re D \quad y \quad L_{h,turbulento} \cong 10D$$

El cociente de fricción en la región del flujo totalmente desarrollado permanece constante. Las velocidades máxima y promedio en el flujo laminar totalmente desarrollado en una tubería circular son:

$$U_{max} = 2V_{prom} \quad y \quad V_{prom} = \frac{\Delta P D^2}{32\mu L}$$

El flujo volumétrico y la caída de presión para flujo laminar en una tubería horizontal son:

$$V = V_{prom} A_c = \frac{\Delta P \pi D^4}{128\mu L} \quad y \quad \Delta P = \frac{32\mu L V_{prom}}{D^2}$$

Estos resultados para tuberías horizontales también se pueden usar para tuberías inclinadas siempre que ΔP se sustituya por $\Delta P - \rho g L \sin\theta$:

$$V_{prom} = \frac{(\Delta P - \rho g L \sin\theta) D^2}{32\mu L}$$

$$\dot{V} = \frac{(\Delta P - \rho g L \sin\theta) \pi D^4}{128\mu L}$$

La pérdida de presión y la pérdida de carga para todos los tipos de flujos internos (laminar o turbulento, en tuberías circulares o no-circulares, superficies lisas o rugosas) se expresa como:

$$\Delta P_L = f \frac{L \rho V^2}{D 2g} \quad y \quad h_L = \frac{\Delta P_L}{\rho g} = f \frac{L V^2}{D 2g}$$

En el flujo turbulento totalmente desarrollado, el factor de fricción depende del número de Reynolds y la rugosidad relativa ϵ/D . el factor de fricción turbulento está dado por la ecuación de Coolebrok, que se expresa como:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\epsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

La grafica de esta fórmula se conoce como diagrama de Moody. El diseño y análisis de sistemas de tuberías implica determinar la pérdida de carga, la razón de flujo o el diámetro de la tubería. Las iteraciones tediosas en estos cálculos se pueden evitar cuando se usa la fórmula de Swamee-Jain expresada como:

$$h_L = 1.07 \frac{V^2 L}{g D^5} \left\{ \ln \left[\frac{\epsilon}{3.7 D} + 4.62 \left(\frac{v D}{\dot{v}} \right)^{0.9} \right] \right\}^{-2}$$

$$10^{-6} < ID < 10^{-2}$$

$$3000 < Re < 3 \times 10^8$$

$$v = -0.965 \left(\frac{g D^5 h_L}{L} \right)^{0.5} \ln \left[\frac{\epsilon}{3.7 D} + \left(\frac{3.17 v^2 L}{g D^3 h_L} \right)^{0.5} \right]$$

$$Re > 2000$$

$$D = 0.66 \left[\epsilon^{1.125} \left(\frac{L V^2}{g h_L} \right)^{4.75} + v \dot{V}^{9.4} \left(\frac{L}{g h_L} \right)^{5.2} \right]^{0.04}$$

$$10^{-6} < ID < 10^{-2}$$

$$5000 < Re < 3 \times 10^8$$

Las pérdidas que ocurren en los accesorios de tubería como uniones, válvulas, flexiones, conexiones en T, entradas, salidas, ensanchamientos y contracciones se llaman pérdidas menores. Estas, por lo general, se expresan en términos de coeficiente de pérdida K_L . La pérdida de carga para un accesorio se determina a partir de:

$$h_L = K_L \frac{V^2}{2g}$$

Cuando todos los coeficientes están disponibles, la pérdida de carga total en un sistema de tuberías se determina a partir de:

$$h_{L,total} = h_{L,mayor} + h_{L,menor} = \sum_i f_i \frac{L_i v_i^2}{D_i 2g} + \sum_j K_{L,j} \frac{v_j^2}{2g}$$

Si todo el sistema de tuberías tiene un diámetro constante, la pérdida de carga total se reduce a:

$$h_{L,total} = \left(f \frac{L}{D} + \sum K_L \right) \frac{V^2}{2g}$$

El análisis de un sistema de tuberías se basa en dos principios simples: 1) se debe satisfacer la conservación de la masa a través del sistema y 2) la caída de presión entre dos puntos debe ser la misma para todas las trayectorias entre los dos puntos. Cuando las tuberías se conectan en serie, la razón de flujo a través de todo el sistema permanece constante sin importar los diámetros de las tuberías individuales. Para una tubería que se ramifica en dos (o más) tuberías paralelas y luego se vuelven a juntar en una unión corriente abajo, la razón de flujo total es la suma de las razones de flujo en las tuberías individuales, pero la pérdida de carga en cada rama es la misma.

Cuando un sistema de tuberías involucra una bomba y/o turbina, la ecuación de energía de flujo estacionario se expresa como:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + z_1 + h_{bomba,u} = \frac{P_2}{\rho g} + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + h_{turbina,s} + h_L$$

Cuando se conoce la carga de bomba útil $h_{bomba,u}$, la potencia mecánica que necesita suministrar la bomba al fluido y la potencia eléctrica consumida por el motor de la bomba para una razón de flujo especificada se determina a partir de :

$$\dot{W}_{bomba,se} = \frac{\dot{v} g h_{bomba,u}}{n_{bomba}} \quad y \quad \dot{W}_{elect} = \frac{\dot{v} g h_{bomba,u}}{n_{bomba-motor}}$$

Donde $h_{\text{bombe-motor}}$ es la eficiencia del acoplamiento bomba-motor, que es el producto de las eficiencias de la bomba y el motor.

La grafica de la perdida de carga contra la razón de flujo v se llama curva del sistema. La carga producida por una bomba no es constante, y las curvas de $b_{\text{omba, u}}$ y h_{bomba} contra v se llaman curvas características. Una bomba instalada en un sistema de tuberías opera en el punto de operación, que es el punto de intersección de la curva del sistema y la curva característica.

Las técnicas e instrumentos de medición de flujo se pueden considerar en tres grandes categorías: 1) técnicas e instrumentos de medición de razones de flujo volumétrico (o de masa), como los flujo- metros de desplazamiento positivos, los rotámetros y los medidores ultrasónicos; 2) las técnicas de medición de velocidad puntual, como las sondas de Pitot estática, las sondas de alambre caliente y la LDV y 3) técnicas de medición de velocidad de campo completo como PIV.

INTRODUCCIÓN

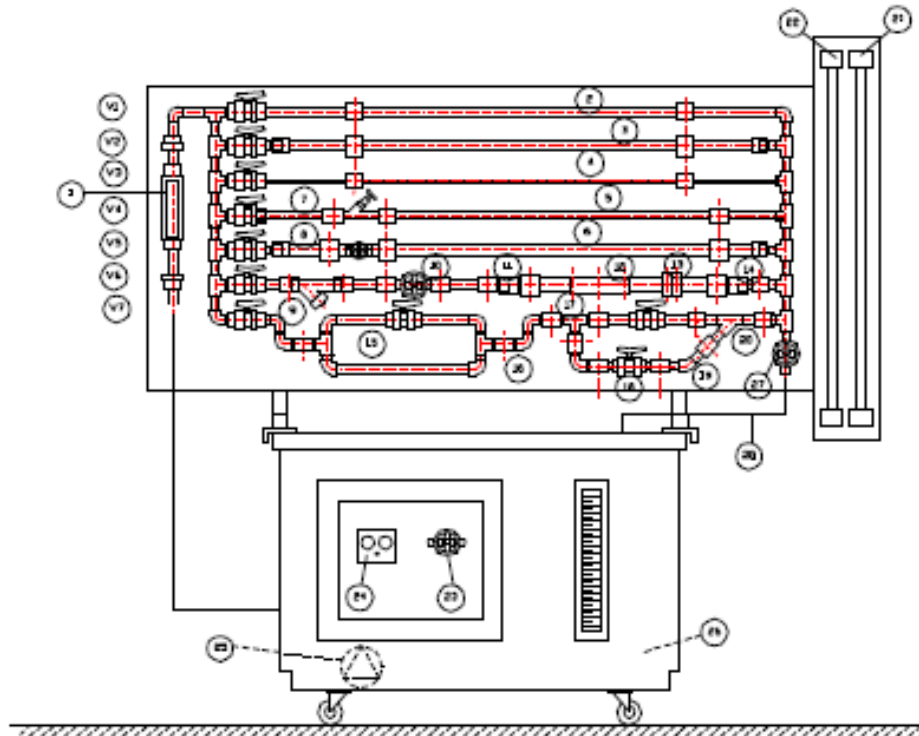
Este equipo estará diseñado para estudiar el comportamiento de los flujos cerrados. Que permitirá el estudio de las pérdidas de carga tanto en tuberías como en diferentes accesorios hidráulicos. Las pérdidas por fricción en tuberías rectas de diferentes tamaños pueden investigarse sobre un determinado rango del número de Reynolds. De esta forma, se pueden establecer distintos tipos de flujos:

- Flujo en régimen laminar.
- Flujo en régimen turbulento.

Osborne Reynolds distinguió entre corriente laminar y turbulenta en tuberías en su publicación de 1883. Ludwig Prandtl, Thomas Stanton y Paul Blasius analizaron posteriormente los datos de corriente en tuberías a principios de este siglo y crearon el gráfico conocido como el "Stanton Diagram". John Nikuradse extendió el trabajo para cubrir el caso de tuberías rugosas, como la suministrada con este equipo, que tienen distintos grados de rugosidad con el propósito de comparar las corrientes.

La fricción en tuberías es uno de los experimentos clásicos de laboratorio y ha tenido siempre un lugar en la enseñanza práctica de mecánica de fluidos. Los resultados y los principios subyacentes son de muchísima importancia para ingenieros aeronáuticos, industriales, mecánicos, etc.

La unidad está totalmente instrumentada y se suministra como un equipo completo.



Figura

Modelo Físico con el banco hidráulico

DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO

El banco de ensayo para estudiar las pérdidas de carga en tuberías, representado esquemáticamente, a continuación, está constituido básicamente por:

- Un panel de aluminio, dispuesto verticalmente, y sobre el cual están colocados todos los elementos a ensayar.
- Un sistema de bombeo y regulación de caudal que puede ser el Banco Hidráulico, o el grupo Hidráulico, que incluye todos los elementos y accesorios necesarios para que el equipo funcione de forma autónoma, y que puede ser utilizado junto con otros equipos de la gama de Mecánica de Fluidos.

Las dimensiones máximas del equipo serán:

ALTURA APROXIMADA 1000 mm.

LONGITUD APROXIMADA 2300 mm.

A continuación se incluye una lista donde se reflejan la mayoría de los elementos del equipo.

1. Caudalímetro
2. Tubería de diámetro $D=25$ mm.
3. Ensanchamiento brusco
4. Venturi
5. Placa de Orificio
6. Contracción brusca
7. Codos de 90° en serie
8. Manómetros de agua
9. Manómetros tipo Bourdon
10. Bomba centrífuga
11. Tanque volumétrico
12. Válvula de regulación de caudal 2
13. Descarga del equipo
14. Tubo flexible con toma rápida de conexión

Tabla

El equipo está dotado de un sistema de tomas de presión anti-obturantes, situadas aguas arriba y aguas abajo de cada elemento objeto de ensayo. Cada una de ellas tiene una rápida y fácil conexión a los manómetros de agua y tipo Bourbon.

El manómetro Bourdon se utilizará para medir diferencias de presión importantes, mientras que el de agua se empleará para medir pequeñas diferencias de presión.

Las columnas del manómetro de agua están comunicadas por su parte superior mediante un colector, el cual lleva en uno de sus extremos los elementos necesarios para conectar una válvula anti retorno con enchufes rápidos. El nivel de los manómetros podrá ajustarse empleando una bomba de aire manual, conectándola a la válvula anti retorno y presurizando el sistema. En caso de querer sacar aire, habrá que desconectar el tubo de nylon del enchufe rápido del colector.

Se suministran, también, los tubos de polietileno transparente, de modo que cualquier par de tomas de presión pueden conectarse rápidamente a uno de los dos manómetros.

La relación entre el diámetro del tubo y la distancia de las derivaciones de presión de los extremos de cada tubo ha sido seleccionada para minimizar los efectos de entrada y salida.

El caudal se puede controlar a través de las válvulas de regulación.

Mediante válvulas se puede, además, ajustar convenientemente la presión estática del sistema en función del tipo de experimento que se vaya a realizar.

El aporte energético al fluido se realiza mediante una bomba centrífuga, situada en el interior del Banco Hidráulico o al lado del Grupo Hidráulico. Ésta se acciona y se para mediante el interruptor marcha/paro situado en el panel frontal tanto del Banco como del Grupo Hidráulico.

PRACTICAS PROPUESTAS PARA EL FLUJO EN TUBERIAS

INTRODUCCIÓN	
DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO	
PRÁCTICAS PROPUESTAS	
Práctica 1: Pérdida de carga por fricción en tubería diámetro interior 25 mm	
Práctica 2: Influencia del diámetro en la pérdida de carga por fricción en tubería	
Práctica 3: Coeficiente de fricción en tubería de diámetro interior 25 mm	
Práctica 4: Influencia del diámetro en el coeficiente de fricción en tubería	
Práctica 5: Pérdidas de carga en un ensanchamiento brusco y contracción brusca	
Práctica 6: Pérdidas de carga en contracción brusca	
Práctica 7: Pérdidas de carga en el Venturímetro y Orificio	
Práctica 8: Pérdidas de carga en los accesorios	
Práctica 9: Medidas de caudal mediante pérdida de carga	
Práctica 10: Pérdidas de carga tras codos de 90°	

PRÁCTICAS DE LABORATORIO

Práctica 1: Pérdida de carga por fricción en tubería de diámetro interior 25 mm

Objetivo

- Determinar la relación entre la pérdida de carga, debida a la fricción, y la velocidad del fluido en tuberías.

Fundamento teórico

Osborne Reynolds demostró que se podían establecer dos tipos de corriente en el interior de una tubería.

- **Corriente en régimen laminar.** Existe una relación de proporcionalidad entre la pérdida de carga y la velocidad de la corriente.

- **Corriente en régimen turbulento.** La pérdida de carga es proporcional al cuadrado de la velocidad.

Observó, también, que entre uno y otro comportamiento existía una zona donde no existía una relación clara entre la pérdida de carga y la velocidad del flujo.

Consiguió clasificar el tipo de corriente independientemente del tamaño y tipo de tubería a través de un parámetro adimensional el Número de Reynolds,

$$R = \frac{\rho \cdot u \cdot d}{\mu}$$

Siendo:

ρ La densidad del fluido

u Su velocidad

μ La viscosidad dinámica

d Diámetro de la tubería

Se puede relacionar la viscosidad cinemática ν y dinámica μ mediante la siguiente expresión:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

y se obtiene, despejando en la fórmula del número de Reynolds:

$$R = \frac{u \cdot d}{\nu}$$

Quedando el número de Reynolds en función de la velocidad y del diámetro interior de la tubería e inversamente proporcional a la viscosidad cinemática. Donde se puede conocer los valores de la viscosidad cinemática del agua en función de la temperatura con la tabla siguiente:

Temperatura °C	Viscosidad cinemática (m ² /seg).10 ⁻⁶
5	1.52
10	1.308
15	1.142
20	1.007
25	0.897
30	0.804
35	0.727
40	0.661
50	0.556

Tabla

Según lo que hemos visto, los flujos dentro de dos tuberías semejantes geoméricamente obedecen a las mismas leyes si los números de Reynolds son iguales. La semejanza debe extenderse a las rugosidades interiores de las tuberías que juegan un papel importante. Esto se traducirá en que los coeficientes de pérdida de carga serán iguales para las dos tuberías.

Procedimiento experimental

Una vez realizadas las operaciones de puesta en funcionamiento descritas anteriormente, abrir las válvulas adecuadas para hacer circular el fluido únicamente por la tubería objeto de ensayo.

Antes de conectar el equipo de bombeo, cerraremos todas las válvulas todo/nada (válvulas de bola), y posteriormente abriremos la tubería objeto de ensayo, que corresponde a la tubería de diámetro interior $d = 25$ mm.

Abriremos primero la válvula de entrada de la tubería de $d_{int.} = 25$ mm, encendemos la bomba y hacemos circular el agua abriendo la válvula de regulación de caudal lentamente, viendo como sube el indicador interior del caudalímetro.

Se mantendrá abierta del todo la válvula de regulación de caudal, haciendo circular el fluido únicamente por la tubería rugosa de $d_{int.} = 25$ mm.

Se determinará la pérdida de carga a través de los manómetros tipo Bourdon o a través del manómetro de agua si fuese necesario, en este caso con la tubería de diámetro 25 mm abierta y el resto cerradas. La manera de proceder será la descrita en el capítulo "PUESTA EN MARCHA".

Realizar la práctica con diferentes caudales para comprobar las variaciones de la pérdida de carga dependiendo del caudal, veremos que cuanto mayor es el caudal, mayor va a ser la pérdida de carga.

PRECAUCIÓN: Al utilizar el Banco Hidráulico una vez realizada la medición del caudal, hay que bajar el accionador de la válvula de vaciado para evitar que el tanque sumidero se quede sin agua y afecte a la bomba pueda.

Cuando se realice de nuevo otra toma de tiempos, subiremos el accionador para llenar el tanque volumétrico y una vez finalizada la medición bajaremos de nuevo.

Es conveniente procesar los resultados de la siguiente forma:

Caudal Q l/min	Velocidad u m/s	Altura h_f mm H ₂ O	Altura h_f mm Hg	Log u	Log h

Tabla

PRÁCTICA 2: INFLUENCIA DEL DIÁMETRO EN LA PÉRDIDA DE CARGA POR FRICCIÓN EN TUBERÍA.

Objetivo

Analizar la influencia del diámetro de la tubería.

Procedimiento experimental

A partir de los datos recogidos en las prácticas 1 y 2 en sus correspondientes tablas de datos, se comparará la influencia del diámetro de las tuberías rugosas en la pérdida de carga por fricción.

Para ello, representar gráficamente la pérdida de carga en función del diámetro.

PRÁCTICA 3: COEFICIENTE DE FRICCIÓN EN TUBERÍA DE DIÁMETRO INTERIOR 25 mm.

Objetivo

Investigar la relación entre el coeficiente de fricción y el número de Reynolds (R) para corrientes laminares, de transición y turbulentas en tuberías lisa.

Procedimiento Experimental

Una vez realizadas las operaciones de puesta en funcionamiento descritas anteriormente, abrir las válvulas adecuadas para hacer circular el fluido únicamente por la tubería objeto de ensayo.

Determinar la altura de pérdidas a través del manómetro de agua o a través del manómetro Bourdon, si fuese necesario.

PRECAUCION: Una vez realizada la medición del caudal hay que bajar el accionador de la válvula de vaciado para evitar que el tanque sumidero se quede sin agua y la bomba pueda agriparse. Cuando se realice de nuevo otra toma de tiempos, subiremos el accionador para llenar el tanque volumétrico y una vez finalizada la medición bajaremos de nuevo.

Es conveniente reflejar los valores medidos y calculados en la tabla como lo que aparece a continuación.

Caudal Q l/min	Velocidad U m/s	Reynolds R	λ	Altura hf mm H ₂ O	Altura hf mm Hg

PRÁCTICA 4: INFLUENCIA DEL DIÁMETRO EN EL COEFICIENTE DE FRICCIÓN EN TUBERÍAS.

Objetivo

Analizar la influencia del diámetro y de la rugosidad en tuberías.

Procedimiento experimental

A partir de los datos recogidos en las prácticas 2 y 3 en sus correspondientes tablas de datos, se comparará la influencia de las tuberías rugosas en la pérdida de carga por fricción.

Para ello, representar gráficamente el coeficiente de fricción en función del diámetro.

PRÁCTICA 5: PÉRDIDA DE CARGA EN UNA ENSANCHAMIENTO BRUSCO

Objetivo

Determinar la relación entre la pérdida de carga del fluido cuando circula a través de distintos acoplamientos y accesorios hidráulicos.

Tabular los resultados de la siguiente forma.

Caudal Q l/min	Velocidad u m/s	Altura cinética hv	Atura hf mm H ₂ O	Altura hf mm Hg	K h/hv

PRÁCTICA 6: PÉRDIDAS DE CARGA EN LA CONTRACCIÓN BRUSCA

Objetivo

Determinar la relación entre la pérdida de carga del fluido cuando circula a través de distintos acoplamientos y accesorios hidráulicos.

Tabular los resultados de la siguiente forma.

Caudal Q l/min	Velocidad u m/s	Altura cinética h _v	Atura h _f mm H ₂ O	Altura h _f mm Hg	K h/h _v

PRÁCTICA 7: PÉRDIDAS DE CARGA EN EL VENTURÍMETRO Y PLACA DE ORIFICIO

Objetivo

Determinar la relación entre la pérdida de carga del fluido cuando circula a través de distintos acoplamientos y accesorios hidráulicos.

Tabular los resultados de la siguiente forma.

Caudal Q l/min	Velocidad u m/s	Altura cinética h _v	Atura h _f mm H ₂ O	Altura h _f mm Hg	K h/h _v

PRÁCTICA 8: PÉRDIDAS DE CARGA EN LOS ACCESORIOS.

Objetivo

Determinar la relación entre la pérdida de carga del fluido cuando circula a través de distintos acoplamientos y accesorios hidráulicos.

Tabular los resultados de la siguiente forma.

Caudal Q l/min	Velocidad u m/s	Altura cinética h _v	Atura h _f mm H ₂ O	Altura h _f mm Hg	K h/h _v

PRÁCTICA 9: MEDIDAS DE CAUDAL MEDIANTE PÉRDIDA DE CARGA EN UN VENTURIMETRO

Objetivo

Demostrar la aplicación de la pérdida de carga como principio para la medida de caudal y de la velocidad, en una tubería.

Procedimiento experimental

Una vez realizadas las operaciones de puesta en funcionamiento descritas anteriormente, abrir únicamente la tubería que tiene el tubo Ventura corresponde a la válvula de bola y proceder de la manera explicada en la Puesta en Marcha del manual para calcular la diferencia de altura entre los dos tubos piezométricos del manómetro de agua (por ejemplo) hacer circular el fluido por el venturímetro.

Una vez que hemos fijado el caudal, anotamos sobre la tabla de toma de datos el valor de éste que marca el caudalímetro mediante la altura que presenta el indicador interior del mismo. Se podrá comprobar ese valor con el obtenido mediante el tubo Ventura aplicando la fórmula vista en la teoría.

PRECAUCIÓN: Una vez realizada la medición del caudal hay que bajar el accionador de la válvula de vaciado para evitar que el tanque sumidero se quede sin agua y la bomba pueda griparse. Cuando se realice de nuevo otra toma de tiempos, subiremos el accionador para llenar el tanque volumétrico y una vez finalizada la medición bajaremos de nuevo.

Tabular los resultados de la siguiente forma.

Caudal Q l/min	Velocidad u m/s	Altura Venturi (converg.)	Altura Ventura (diverge.)	Caudal Caudalímetro

PRÁCTICA 27: MEDIDAS DE CAUDAL MEDIANTE PÉRDIDA DE CARGA EN UN DIAFRAGMA.

Objetivo

Demostrar la aplicación de la pérdida de carga como principio para la medida del caudal y de la velocidad, en una tubería.

Procedimiento experimental

Una vez realizadas las operaciones de puesta en funcionamiento descritas anteriormente, abrir únicamente la tubería que tiene el diafragma corresponde a la válvula de bola V6, y proceder de la manera explicada en la puesta en marcha del manual para calcular la diferencia de altura entre los dos tubos piezométricos del manómetro de agua (por ejemplo) hacer circular el fluido por el venturímetro. Una vez que hemos fijado el caudal, anotamos sobre la tabla de toma de datos el valor de éste que marca el caudalímetro mediante la altura que presenta el indicador interior del mismo. Se podrá comprobar ese valor con el obtenido mediante el diafragma aplicando la fórmula vista en la teoría.

Tabular los resultados de la siguiente forma.

Caudal Q l/min	Velocidad u m/s	Altura Diafragma	Caudal Caudalímetro	Caudal Diafragma

PRÁCTICA 9: MEDIDAS DE CAUDAL MEDIANTE PÉRDIDA DE CARGA

Objetivo

Demostrar la aplicación de la pérdida de carga como principio para la medida de caudal y de la velocidad, en una tubería.

PRÁCTICA 10: PÉRDIDA DE CARGA TRAS CODOS DE 90°

Objetivo

El objetivo de esta práctica es determinar la relación del fluido cuando circula a través de diferentes uniones y accesorios.

Expresa los resultados en la siguiente tabla:

Caudal Q l/min	Velocidad u m/s	Atura hf mm H₂O	Altura Hf mm Hg	K H/hv