



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Desarrollo de un equipo
hidráulico para el laboratorio
de Mecánica de Fluidos.**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Mecánica

P R E S E N T A

Nohemi Durán Birrichaga.

DIRECTOR DE TESIS

M.I Eduardo Bernal Vargas.



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., Ingresada 2019



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

DEDICATORIA

Como muestra de gratitud y cariño quiero dedicar este trabajo a mis padres por haberme forjado como la persona que soy, muchos de mis logros se los debo a ustedes y verán reflejado en mí y en mis hermanos el fruto de su esfuerzo. A “Mamá Julia”, por creer en mí y motivarme todos los días.

Gracias por su apoyo y confianza. Los amo.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco infinitamente a la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Ingeniería por brindarme educación y la oportunidad de crecer en mi vida profesional.

Al Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT) que me abrió las puertas para el desarrollo de este trabajo.

A mi asesor de tesis el M.I. Eduardo Bernal Vargas por brindarme su tiempo y conocimiento durante la elaboración de este proyecto.

Al Dr. Gabriel Ascanio Gasca por la confianza y el apoyo durante mi estancia en el instituto.

A mis sinodales, por el tiempo que han dedicado a leer este trabajo.

Agradezco al Programa de Apoyo a Proyectos para la Innovación y Mejoramiento de la Enseñanza PAPIME 107917 por el apoyo durante la elaboración de este proyecto.

Finalmente, quiero expresar con profundo agradecimiento a quienes me alentaron a alcanzar mi objetivo: mi familia, quienes forman el pilar más importante en mi vida.

A mis padres, que sin su apoyo y ejemplo, no habría podido cumplir este sueño. Sé que no existe forma de agradecer su sacrificio y esfuerzo, quiero que sepan que este logro también es de ustedes y a mis hermanos por el apoyo incondicional cada día de la carrera.

ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	2
AGRADECIMIENTOS	3
OBJETIVOS.	7
OBJETIVO GENERAL.....	7
OBJETIVOS PARTICULARES.....	7
I. INTRODUCCIÓN.....	8
II. REVISIÓN DE LA LITERATURA: EQUIPOS DIDÁCTICOS COMERCIALES.....	10
a) <i>Equipo de demostración del teorema de Bernoulli</i>	10
b) <i>Equipo de simulación del efecto Venturi y Bernoulli</i>	11
c) <i>Equipo para el estudio de la segunda Ley de la termodinámica</i>	11
d) <i>Equipo para demostración de Osborne-Reynolds</i>	12
III. DESVENTAJAS DE LOS EQUIPOS COMERCIALES.....	13
1. CAPITULO 1. MARCO TEÓRICO	14
1.1 CONCEPTO DE FLUIDO.	14
1.2 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS.	14
1.2.1 <i>Viscosidad</i>	14
1.2.2 <i>Densidad y peso específico</i>	16
1.2.3 <i>Presión</i>	16
1.2.4 <i>Condición de no deslizamiento</i>	17
1.2.5 <i>Compresibilidad</i>	17
1.3 ECUACIONES FUNDAMENTALES DE LA MECÁNICA DE FLUIDOS.....	17
1.3.1 <i>Ecuación de conservación de masa</i>	18
1.3.2 <i>Conservación de la cantidad de movimiento</i>	18
1.3.3 <i>Ecuación de la energía</i>	19
1.3.4 <i>Ecuación de Bernoulli</i>	20
1.4 FLUJO EN CONDUCTOS.	21
1.4.1 <i>Flujo de Hagen-Poiseuille</i>	21
1.4.2 <i>El número de Reynolds</i>	21
1.4.3 <i>Flujo laminar y flujo turbulento</i>	22
1.4.4 <i>Flujo interno</i>	22
1.5 PÉRDIDA DE CARGA POR FRICCIÓN.	23
1.5.1 <i>Ecuación de Darcy-Weisbach</i>	24
1.5.2 <i>Ecuación de Hagen-Poiseuille</i>	24
1.5.3 <i>Coefficiente de fricción</i>	25
1.5.4 <i>Diagrama de Moody</i>	25

1.6	PÉRDIDAS LOCALIZADAS EN TUBERÍAS.....	26
1.7	MEDIDORES DE FLUJO.....	26
1.7.1	<i>Tubo de Venturi.....</i>	28
1.7.3	<i>Placa de orificio.....</i>	29
1.7.4	<i>Tipos de placa de orificio.....</i>	31
2.	CAPITULO 2. DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL EQUIPO.....	33
2.1	OBJETIVOS DE DISEÑO.....	33
2.1.1	<i>Requerimientos de diseño.....</i>	33
2.2	CONSIDERACIONES PRÁCTICAS.....	34
2.2.1	<i>Fácil instalación y transporte.....</i>	35
2.2.2	<i>Requerimientos de manufactura e instalación.....</i>	35
2.3	DESCRIPCIÓN GENERAL DEL EQUIPO.....	36
2.3.1	<i>Arreglo hidráulico.....</i>	36
2.3.2	<i>Selección de la bomba.....</i>	37
2.3.3	<i>Selección de las válvulas.....</i>	37
2.3.4	<i>Dispositivos instalados.....</i>	38
2.3.5	<i>Control de las válvulas.....</i>	41
2.3.6	<i>Instrumentación.....</i>	41
2.4	RAMIFICACIONES DEL EQUIPO.....	42
2.4.1	<i>Inyección de tinta.....</i>	42
2.4.2	<i>Diseño de la placa de orificio.....</i>	42
2.4.2.1	<i>Tomas de presión.....</i>	44
2.4.3.1	<i>Longitud de tubería recta para la placa de orificio.....</i>	44
2.4.4	<i>Tubo de Venturi.....</i>	46
2.4.5	<i>Longitud de tubería recta del tubo de Venturi.....</i>	46
2.4.6	<i>Tomas de presión.....</i>	46
2.5	CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO.....	47
2.5.1	<i>Manufactura de la estructura.....</i>	47
2.4.7	<i>Ensamble de tubería y accesorios.....</i>	49
3.	CAPITULO 3. PRUEBAS Y EXPERIMENTOS.....	50
3.1	PRUEBA DE VELOCIDAD DE LA BOMBA.....	50
3.2	MEDIDA DEL CAUDAL.....	51
3.3	EXPERIMENTO 1: VISUALIZACIÓN DE LAS LÍNEAS E FLUJO.....	52
3.4	EXPERIMENTO 2: PLACA DE ORIFICIO.....	52
3.4.1	<i>Pérdida de presión.....</i>	52
3.5	EXPERIMENTO 3: TUBO DE VENTURI.....	54
3.5.1	<i>Pérdida de presión.....</i>	54

4.	CAPITULO 4. RESULTADOS.	55
4.1	FLUJO LAMINAR.	55
4.1.1	<i>Visualización de las líneas de flujo.</i>	55
4.2	CAUDAL.	56
4.3	PLACA DE ORIFICIO.	57
4.3.1	<i>Pérdida de presión.</i>	57
4.3.2	<i>Cálculo de la velocidad.</i>	58
4.4	TUBO DE VENTURI.	62
4.4.1	<i>Pérdida de presión.</i>	62
4.4.2	<i>Cálculo de la velocidad.</i>	63
4.5	COMPARACIÓN DE RESULTADOS.	65
4.5.1	<i>Pérdida de presión.</i>	65
4.5.1.1	<i>Presión en Ansys Fluent.</i>	67
4.5.2	<i>Velocidad en Ansys Fluent.</i>	70
	CONCLUSIONES	72
	TRABAJO A FUTURO.	73
	REFERENCIAS.	74
	PROGRAMA Y PLANOS DEL EQUIPO.	76
	PRÁCTICA PROPUESTA.	85

OBJETIVOS.

OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un equipo didáctico que permita a los estudiantes de ciencias básicas de la Facultad de Ingeniería de la UNAM comprender y visualizar al menos tres fenómenos físicos de la Termodinámica y Mecánica de Fluidos.

OBJETIVOS PARTICULARES.

- Permitir las condiciones necesarias de flujo a través de los diferentes dispositivos instalados, de manera que las mediciones de las propiedades del flujo registradas por los estudiantes coincidan con las obtenidas teóricamente.
- Implementar un circuito electrónico para automatizar el funcionamiento del equipo.
- Realizar una simulación de flujo del equipo para analizar su comportamiento bajo las condiciones de trabajo especificadas.

I. INTRODUCCIÓN

En el estudio de las ciencias básicas de la ingeniería se presenta comúnmente la dificultad en la comprensión de ciertos conceptos teóricos y fenómenos físicos, dado que estos resultan de difícil explicación con el uso de lenguaje común. Dicha situación dificulta y retrasa el progreso del estudiante de ingeniería en el estudio de las ciencias [7]. Se ha identificado que la experimentación en aulas de laboratorio ha resultado a lo largo de los años, la herramienta más efectiva para el estudiante en el aprendizaje. Además, la experiencia dentro de aulas de laboratorio, desarrolla habilidades prácticas y técnicas en los estudiantes que les permiten una mejor integración al campo laboral y/o de la investigación.

La termodinámica y la mecánica de fluidos son de las ciencias de la ingeniería más complicadas para el estudiante y, además, una de las que más soluciones brinda a problemas industriales. En particular, el flujo en sistemas abiertos resulta uno de los temas de mayor relevancia dentro de la termodinámica y la mecánica de fluidos. Esto debido a que, en la ingeniería práctica muchos dispositivos de uso común operan bajo estas condiciones, como toberas, aceleradoras, difusores, compresores, turbinas, válvulas de estrangulamiento, cámaras de mezclado, intercambiadores de calor, etc. Por lo tanto, resulta esencial para los futuros ingenieros y profesionistas del área, el poder realizar los análisis de masa y de energía de estos dispositivos.

En este trabajo se presenta el diseño y desarrollo de un equipo didáctico que permite la comprensión y visualización de al menos tres conceptos y fenómenos de la termodinámica y la mecánica de fluidos para los alumnos de ciencias básicas de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Además, se espera que el equipo motive a los estudiantes en el estudio de la asignatura al ser ejemplificativo y didáctico.

En el equipo propuesto, el flujo puede ser transportado a través de diferentes ramificaciones de tubería, controlando la dirección del flujo mediante la instalación de un arreglo de válvulas solenoides normalmente cerradas e impulsando el flujo con una bomba centrífuga.

El equipo consiste de tres diferentes ramificaciones de tubería por las cuales puede direccionarse el fluido, en la primera de arriba hacia abajo se tiene un tubo de sección constante que tiene instalado un sistema de inyección de colorante en el cual se podrán visualizar las líneas de flujo, en la segunda ramificación se tiene instalada una placa de orificio y finalmente, en la tercera ramificación se incluye un tubo Venturi. Para las tres ramificaciones es posible determinar velocidad, presión y gasto másico del flujo.

Es importante mencionar que el equipo didáctico es manufacturado en la universidad y las ventajas de éste sobre los equipos comerciales se basan principalmente en el bajo costo y versatilidad para realizar por lo menos tres practicas diferentes en él.

La presente tesis consta de cuatro capítulos que ayudan a reportar el trabajo realizado. Para realizar el análisis en cada una de las ramificaciones mencionadas y para comprender los fenómenos físicos que se presentan en el equipo propuesto, se utilizarán las Ecuaciones Fundamentales de la Mecánica de Fluidos, así como los conceptos básicos de termodinámica que se encuentran en el primer capítulo.

En el segundo capítulo se plantea el problema que enfrenta el equipo, se identifican las necesidades y se establecen los requerimientos de diseño, de igual manera, se describe detalladamente el diseño y construcción del equipo, así como los componentes que lo conforman y principalmente, el funcionamiento del prototipo.

El desarrollo de los experimentos se presenta el tercer capítulo, se mencionan las condiciones de operación y las pruebas de los componentes.

El cuarto capítulo está dedicado a la presentación de los resultados obtenidos después de realizar las pruebas mencionadas en el capítulo anterior.

Finalmente, se presentan las conclusiones y se menciona el trabajo a futuro.

Planteamiento del problema.

En los laboratorios de ciencias básicas de la Facultad de Ingeniería de la UNAM es indispensable para la formación de los estudiantes la realización de prácticas de laboratorio que les permita experimentar y observar físicamente los fenómenos que se les presentan en el estudio teórico. Dichas prácticas de laboratorio tienen que estar sometidas a una constante actualización, dado que el avance tecnológico cambia constantemente. Estos avances tecnológicos, también pueden ser utilizados para modernizar los equipos de trabajo actuales y promover que los alumnos se mantengan interesados en estos y desarrollen un gusto por la experimentación y el estudio práctico de las ciencias.

Con ayuda del profesorado del laboratorio de termodinámica y su amplia experiencia docente dentro de las aulas, se han identificado las deficiencias actuales del laboratorio. Como parte de esto, se identificó que el análisis de sistemas abiertos es uno de los temas que más complicaciones causan a los estudiantes de la asignatura y el equipo actual en el que se desarrolla la práctica no permite la total interacción de los alumnos con el equipo.

II. REVISIÓN DE LA LITERATURA: EQUIPOS DIDÁCTICOS COMERCIALES.

A continuación, se enlistan algunos equipos comerciales disponibles para el aprendizaje de la mecánica de fluidos, los cuales se utilizan en el laboratorio.

a) Equipo de demostración del teorema de Bernoulli.

Equipo del fabricante Armfield. La sección de prueba consta de un tubo tipo Venturi clásico mecanizado en material acrílico transparente. A través de una serie de orificios en la pared puede medirse en este dispositivo la distribución de presión estática a lo largo del conducto convergente. Estos orificios se encuentran conectados a una tabla de manómetros que incorpora un colector con válvula de purga de aire.

La presurización de los manómetros se logra mediante una bomba centrífuga de mano. El agua es alimentada al dispositivo a través de un conector de manguera y controlada por una válvula reguladora de flujo situada en la salida de la sección de prueba. Puede demostrarse el tubo tipo Venturi como dispositivo auxiliar para la medición del caudal y es posible el cálculo del coeficiente de descarga.



Figura I. Equipo Armfield para demostración del teorema de Bernoulli.

b) Equipo de simulación del efecto Venturi y Bernoulli.

Equipo del fabricante DIKOIN. Este equipo permite el análisis del flujo a través de un tubo tipo Venturi y la comprobación del teorema de Bernoulli. La sección de prueba consta de un equipo centrífugo para potenciar el flujo a través de la tubería, la descarga de la bomba se encuentra regulada por una válvula reguladora de dos vías, posteriormente se encuentra el dispositivo de estudio, el cual es un tubo clásico tipo Venturi con una sección divergente más amplia.

Este dispositivo se encuentra seccionado, en cada división se tiene instalado un lector de presión, los cuales son registradas en la tabla de manómetros de la parte trasera. Además, el equipo cuenta con un manómetro diferencial y un vacuómetro, con los que puede apreciarse la caída de presión del flujo al pasar a través de los accesorios.



Figura II. Equipo de simulación de efecto Venturi marca DIKOIN

c) Equipo para el estudio de la segunda Ley de la termodinámica.

Equipo de la marca TEQuipment Academia. En este equipo se utiliza un tubo tipo Venturi en la parte superior de manera que permite analizar el gasto másico del flujo a través del circuito. El objetivo final que tiene este equipo es permitir al alumno el cálculo de la potencia y eficiencia de la bomba que potencia el flujo. A la succión, esta bomba se encuentra conectada a un tanque de almacenamiento, a la descarga tiene incorporada una válvula reguladora, a la salida de esta se encuentra un codo que dirige al flujo para hacerlo pasar a través del dispositivo tubo tipo Venturi, en donde con mediciones a la entrada y a la salida se puede obtener la diferencia de presiones en el dispositivo.



Figura III. Equipo para el estudio de la segunda Ley de la termodinámica marca TEquipment Academia.

d) Equipo para demostración de Osborne-Reynolds.

Este equipo funciona en posición vertical. Un tanque de carga con material de amortiguación mantiene un nivel constante de agua mediante una entrada en forma de campana hacia el tubo de visualización del flujo. Una válvula ubicada en la descarga regula el caudal. El caudal de agua que pasa por el tubo puede medirse con el tanque volumétrico del Banco de Servicios Comunes. De este modo puede determinarse la velocidad del agua y luego calcularse el número de Reynolds. El equipo utiliza una técnica de inyección de tinta similar a la que aplicó Reynolds en su dispositivo original para observar las condiciones del flujo.



Figura IV. Equipo Armfield para demostración del experimento de Reynolds.

III. DESVENTAJAS DE LOS EQUIPOS COMERCIALES.

Actualmente, en el mercado se encuentran disponibles una amplia gama de equipos de carácter didáctico que pueden satisfacer esta necesidad, sin embargo, ninguno de los desarrolladores actuales se encuentra ubicado en México y la compra y adquisición de estos equipos tiene que contemplar los gastos de envío y de importación lo cual implica varias desventajas: costo inicial elevado, el mantenimiento debe ser realizado por personal especializado y la capacitación previa para su manejo. Otra desventaja clara por parte de estos equipos es que solo permiten la realización de una sola práctica por equipo, lo que incrementa el gasto si se pretende renovar diferentes equipos y prácticas de laboratorio.

Los equipos adquiridos comercialmente resultan poco funcionales ya que solo se pueden trabajar un número limitado de prácticas diseñadas por el fabricante y no ofrecen a los alumnos los medios necesarios que le permitan conocer e interpretar el funcionamiento de cada uno de los componentes básicos del equipo, así como desarrollar habilidades para analizar posibles fallas y tomar las medidas preventivas y/o correctivas que se requieran.

Por estos motivos, surge la necesidad de diseñar un equipo didáctico, que permita la implementación de varios dispositivos de uso común en ingeniería y por la tanto la realización de diferentes prácticas de laboratorio que ilustren diferentes conceptos de la mecánica de fluidos en un mismo equipo.

Capítulo 1

1. MARCO TEÓRICO

La Mecánica de Fluidos se ocupa del estudio de los fluidos en movimiento o en reposo y los efectos consiguientes sobre los contornos, que pueden ser una superficie sólida u otro fluido. Como ciencia, está basada en un compromiso adecuado entre teoría y experimentación. Por ser la Mecánica de Fluidos una rama de la mecánica, dispone de un conjunto de leyes de conservación bien documentadas y es posible, por tanto, un tratamiento teórico riguroso. [3]

1.1 CONCEPTO DE FLUIDO.

Desde el punto de vista de la Mecánica de Fluidos, la materia sólo puede presentarse en dos estados: sólido y fluido. La distinción técnica radica en la reacción de ambos a un esfuerzo tangencial o cortante. Un sólido puede resistir un esfuerzo cortante con una deformación estática, un fluido no [3].

Un fluido es una sustancia que se deforma continuamente bajo la acción de un esfuerzo cortante. Cualquier esfuerzo cortante aplicado a un fluido, no importa cuán pequeño sea, provocará el movimiento del fluido. Éste se mueve y se deforma continuamente mientras se siga aplicando el esfuerzo cortante. [2]

1.2 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS.

1.2.1 Viscosidad.

La viscosidad es una propiedad de los fluidos cuyo efecto es entendido cuando el fluido se encuentra en movimiento. Es una medida de su resistencia a fluir cuando se le aplica una fuerza externa.

En un flujo, cuando los elementos del fluido se mueven a diferentes velocidades, cada elemento experimentará una resistencia debido a la fricción del fluido entre elementos. Por lo tanto, entre los elementos del fluido con diferentes velocidades existirá un esfuerzo cortante.

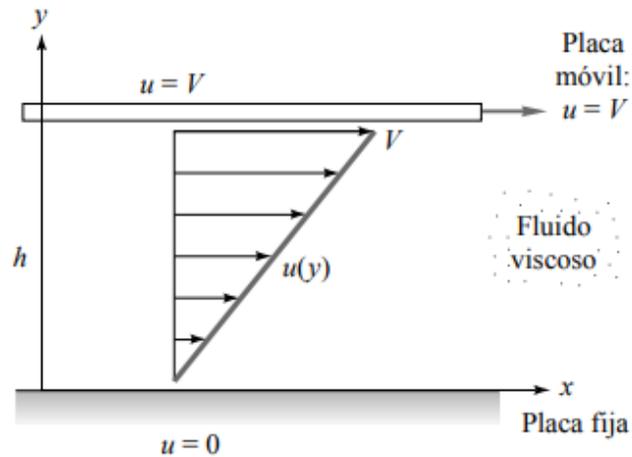


Figura 1.1. Esfuerzo cortante aplicado a un fluido. [3]

De la figura 1.1 puede apreciarse que el plato superior se desplaza a velocidad constante, mientras que el plato inferior se mantiene en reposo, lo que resulta en una fuerza F aplicada sobre la capa inferior con dirección del flujo. De manera similar, la capa inferior trata de detener a la superior, de acuerdo con la tercera Ley de Newton, con una fuerza F de igual magnitud y sentido opuesto. Entonces, como la fuerza F actúa sobre un área de contacto A , el esfuerzo cortante τ es definido como:

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1.1)$$

Newton postuló que τ es proporcional a la cantidad $\frac{\Delta u}{\Delta y}$ donde Δy es la distancia de separación de las dos capas y Δu es la diferencia de velocidades. En el caso límite, el gradiente de velocidad en un punto en dirección perpendicular al movimiento de la capa cumple la siguiente relación:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (1.2)$$

Donde la constante de proporcionalidad μ es conocida como el coeficiente de viscosidad o simplemente viscosidad, la cual es una propiedad del fluido y depende de su estado. Dicha definición de la viscosidad es conocida como la Ley de viscosidad de Newton. Los fluidos que obedecen dicha ley son llamados fluidos Newtonianos [2].

1.2.2 Densidad y peso específico.

La densidad de un fluido, es su masa por unidad de volumen, denominada con la letra griega ρ (rho) minúscula. La densidad en los líquidos puede considerarse, para distintas aplicaciones, constante.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1.3)$$

El peso específico de un fluido, designado por la letra griega γ (gamma), se define como su peso por unidad del volumen. Así, el peso específico está relacionado con la densidad por medio de la ecuación [6].

$$\gamma = \rho g \quad (1.4)$$

1.2.3 Presión.

La presión se define como la fuerza normal que ejerce un fluido por unidad de área. En otras palabras, podemos definir a la presión como el esfuerzo normal en un fluido en reposo.

$$P = \frac{dF}{dA} = \frac{F}{A} \quad (1.5)$$

La presión en cualquier punto de un fluido en reposo es la misma en todas direcciones, por lo tanto, es una magnitud escalar y actúa normalmente a una superficie plana. La presión varía solo con la distancia vertical mientras que, en el mismo plano horizontal, el valor de la presión en un líquido es igual en cualquier punto. Es decir, que en un fluido en reposo la presión incrementa linealmente con la profundidad, la cual se conoce como distribución de presión hidrostática, y es válida para un fluido en reposo o un fluido en movimiento con velocidad constante [8].

$$\frac{dp}{dz} = -\rho g \quad (1.6)$$

Donde dp y dz representan la diferencia de presión y altura respectivamente, ρg es el peso específico del fluido.

Cuando un fluido está en movimiento, la presión ejercida por el fluido en dirección normal del flujo es llamada presión estática. Las medidas de presión se realizan con los manómetros, que pueden ser de diversas formas. Si la presión medida se encuentra por encima de la presión atmosférica se le conoce como manométrica, si es inferior se denomina presión de vacío [3].

1.2.4 Condición de no deslizamiento.

Cuando un fluido está limitado por una superficie sólida, las interacciones moleculares en la zona de contacto hacen que la superficie esté en equilibrio energético y mecánico con ella. Esto quiere decir que todo fluido en contacto con una superficie sólida obedecerá la siguiente condición [3].

$$v_{\text{fluido}} = v_{\text{pared}} \quad (1.7)$$

1.2.5 Compresibilidad.

La compresibilidad se refiere al cambio de volumen que sufre una sustancia bajo la acción de fuerzas externas. El grado de compresibilidad de una sustancia es caracterizado por el módulo de elasticidad de Bulk, E_L definido como [6]:

$$E = \frac{dp}{d\rho/\rho} = \rho \frac{dp}{d\rho} \quad (1.8)$$

Donde $d\rho$ y dp representan los cambios en densidad y presión respectivamente, y ρ es la densidad inicial.

1.3 ECUACIONES FUNDAMENTALES DE LA MECÁNICA DE FLUIDOS.

Las Ecuaciones Fundamentales son la formulación matemática de las Leyes Fundamentales, las cuales rigen el movimiento de un fluido. Las ecuaciones integrales son útiles cuando se está interesado en el comportamiento general de un fluido en movimiento, mientras que el análisis diferencial proporciona una descripción muy detallada del flujo ya que busca resolver el movimiento de las partículas de fluido.

Cuando el análisis es aplicado a puntos individuales del flujo, resultan ecuaciones diferenciales por que el método se denomina análisis diferencial.

1.3.1 Ecuación de conservación de masa.

Este principio describe que la variación de masa en el tiempo es igual a la masa que entra en un sistema menos la masa que sale de dicho sistema.

$$\int_{VC} \frac{\partial \rho}{\partial t} dV + \sum_i (\rho_i A_i \vec{v}_i)_s - \sum_i (\rho_i A_i \vec{v}_i)_e = 0 \quad (1.9)$$

La ecuación de la continuidad es una consecuencia del principio de conservación de la masa. Para un flujo permanente la masa del fluido que atraviesa cualquier sección de una corriente de fluido, por unidad de tiempo, es constante. Puede calcularse como sigue:

$$\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 \quad (1.10)$$

Para fluidos incompresibles la densidad es constante se simplifica a [3]:

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (1.11)$$

1.3.2 Conservación de la cantidad de movimiento.

La ecuación de cantidad de movimiento de un fluido describe que la variación de la cantidad de movimiento $m \cdot \vec{v}$ es igual a la suma de fuerzas que actúan sobre el fluido y en forma integral se escribe:

$$\sum \vec{F} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\int_{VC} \vec{v} \rho dV \right) + \sum (\dot{m}_i \vec{v}_i)_s - \sum (\dot{m}_i \vec{v}_i)_e \quad (1.12)$$

En su forma diferencial:

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dx} = \rho \vec{g} - \nabla p + \nabla \cdot (\boldsymbol{\tau}_{ij}) \quad (1.13)$$

Adicionalmente, al considerar el fluido como Newtoniano la ecuación de cantidad de movimiento se transforma a:

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = \rho \vec{g} - \nabla p + \mu \nabla^2 \vec{v} \quad (1.14)$$

Para un fluido newtoniano e incompresible, la generalización de la ecuación (esfuerzo cortante y viscosidad) al caso tridimensional es:

$$\tau_{xx} = 2\mu \frac{\partial p}{\partial x} \quad \tau_{yy} = 2\mu \frac{\partial p}{\partial y} \quad \tau_{zz} = 2\mu \frac{\partial p}{\partial z} \quad (1.15)$$

La sustitución en la ecuación (de cantidad de movimiento) proporciona la ecuación de la cantidad de movimiento para un fluido newtoniano con densidad y viscosidad constantes:

$$\rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{du}{dt} \quad (1.16)$$

$$\rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{dv}{dt} \quad (1.17)$$

$$\rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = \rho \frac{dw}{dt} \quad (1.18)$$

Estas son conocidas como las ecuaciones de Navier-Stokes para flujos incompresibles [3].

1.3.3 Ecuación de la energía.

La ecuación de la energía se basa en la primera ley de la termodinámica, la cual postula que la variación de la energía total de un sistema es igual al flujo de calor menos el flujo de trabajo, lo que en forma integral se expresa de la siguiente manera:

$$\dot{Q} - \dot{W}_s = \frac{\partial}{\partial t} \left[\int_{VC} \left(\hat{u} + \frac{1}{2} V^2 + gz \right) \rho dV \right] + \int_{SC} \left(h + \frac{1}{2} V^2 + gz \right) \rho (\vec{v} \cdot \vec{n}) dA \quad (1.19)$$

Para el caso de flujo estacionario la ecuación se reduce a:

$$\dot{Q} - \dot{W}_s = \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{1}{2} V_i^2 + g z_i \right)_s - \sum \dot{m}_i \left(h_i + \frac{1}{2} V_i^2 + g z_i \right)_e \quad (1.20)$$

1.3.4 Ecuación de Bernoulli.

La ecuación de Bernoulli proporciona una relación muy utilizada entre la presión, la velocidad y la altura y tiene numerosas aplicaciones. Para la aplicación de la ecuación de Bernoulli deben cumplirse siempre ciertas restricciones, ya que todos los fluidos son viscosos y por ellos todos los flujos tienen algún efecto de la fricción. Para el correcto uso de la ecuación de Bernoulli, se debe limitar su aplicación a regiones del flujo en el que la fricción sea despreciable. Las consideraciones que hay que tener en cuenta en la ecuación son las siguientes:

1. Flujo estacionario.
2. Flujo incompresible.
3. Flujo sin fricción.
4. Flujo a lo largo de una línea de corriente

En la obtención de la ecuación, no se considera tampoco transferencia de calor o trabajo, dado que en fluidos reales los intercambios de calor y trabajo están ligados a efectos de fricción.

La ecuación de Bernoulli para un flujo no estacionario sin fricción a lo largo de una línea de corriente es la siguiente:

$$\int_1^2 \frac{\partial v}{\partial t} ds + \int_1^2 \frac{dp}{\rho} + \frac{1}{2} (v_2^2 - v_1^2) + g(z_2 - z_1) = 0 \quad (1.21)$$

Para el caso estacionario ($\frac{\partial v}{\partial t} = 0$) e incompresible (densidad constante) la ecuación es la siguiente [3]:

$$\frac{p_1}{\rho} + \frac{1}{2} v_1^2 + g z_1 = \frac{p_2}{\rho} + \frac{1}{2} v_2^2 + g z_2 \quad (1.22)$$

1.4 FLUJO EN CONDUCTOS.

1.4.1 Flujo de Hagen-Poiseuille.

Esta solución a las ecuaciones de Navier-Stokes corresponde al flujo incompresible en un conducto recto de sección circular de radio R y considera un flujo laminar completamente desarrollado, desprecia la gravedad y supone simetría axial.

La solución es conocida como solución para el flujo de Hagen-Poiseuille completamente desarrollado:

$$v_z = \left(-\frac{dp}{dz}\right) \frac{1}{4\mu} (R^2 - r^2) \quad (1.23)$$

El perfil de velocidades es un paraboloides que cae a cero en la pared y alcanza su máximo en el eje. Con esta distribución de velocidades, se obtienen las siguientes expresiones [4]:

$$V_{\text{máx}} = \left(-\frac{dp}{dz}\right) \frac{R^2}{4\mu} \quad (1.24)$$

$$V_{\text{med}} = \left(-\frac{dp}{dz}\right) \frac{R^2}{8\mu} \quad (1.25)$$

$$Q = \frac{\pi R^4 \Delta p}{8\mu L} \quad (1.26)$$

$$\tau_{\text{pared}} = \frac{8\mu V}{d} \quad (1.27)$$

1.4.2 El número de Reynolds.

El número de Reynolds es el parámetro primario que determina el comportamiento de los fluidos newtonianos que además establece la relación de fuerzas inerciales a las fuerzas viscosas, también conocido como el número adimensional de Reynolds.

$$Re = \frac{\rho U L}{\mu} = \frac{UL}{\nu} \quad (1.28)$$

Donde U es la velocidad del flujo y L es la longitud característica transversal [3].

Al cociente del coeficiente de viscosidad y la densidad se le conoce como viscosidad cinemática.

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.29)$$

1.4.3 Flujo laminar y flujo turbulento.

El régimen de un flujo a través de un tubo (laminar o turbulento) está determinado primordialmente por el valor que tome el número de Reynolds. En un régimen laminar, la estructura del flujo se caracteriza por el movimiento de láminas o capas, el flujo es de naturaleza ordenada. Por otro lado, la estructura del flujo en un régimen turbulento se caracteriza por movimientos aleatorios de las partículas del fluido [4]. Cuando el movimiento del flujo deja de ser suave (laminar) y se convierte en fluctuante y agitado (turbulento), se denomina transición hacia la turbulencia.

En realidad, no existe un único valor del número de Reynolds para el cual el flujo cambie de laminar a turbulento. Resulta más significativo hablar de un valor inferior por debajo del cual el flujo sea siempre laminar, y de un valor superior por encima del cual el flujo sea siempre turbulento, sin importar las condiciones de entrada al tubo.

Flujo laminar $Re < 2100$

Flujo turbulento $Re > 4000$.

El valor del número de Reynolds aceptado para el régimen transitorio es $Re \approx 2300$ [3].

1.4.4 Flujo interno.

Un flujo interno es aquel que está confinado por superficies sólidas. Un efecto evidente de la viscosidad se da en la entrada de un conducto como se muestra en la figura 1.2. En la región de entrada la corriente no viscosa inicial converge y entra en el conducto. Las capas límite viscosas crecen aguas abajo, frenando el flujo axial $u(r,z)$ en la pared y acelerando el núcleo central para cumplir con la ecuación de continuidad [3].

A suficiente distancia de la entrada al tubo, las capas límite se unen el perfil de velocidades no cambia al incrementarse la distancia longitudinal z , y se dice que el flujo está totalmente desarrollado, esta distancia medida desde la entrada del tubo, recibe el nombre de “longitud de entrada”.

Para un flujo laminar, la longitud de entrada es una función del número de Reynolds.

$$\frac{L_e}{d} \approx 0.06 Re_d \quad (1.30)$$

Donde d es el diámetro del tubo y $Re_d = \frac{\rho U D}{\mu}$

En flujo turbulento, el mezclado entre diferentes capas de fluido provoca que las capas límite crezcan más deprisa y la longitud de entrada L_e es relativamente más corta:

$$\frac{L_e}{d} \approx 4.4(Re_d)^{\frac{1}{6}} \quad (1.31)$$

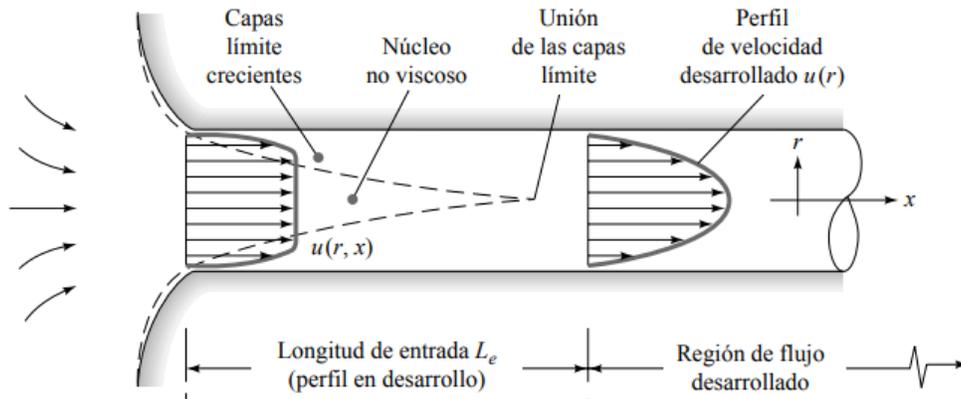


Figura 1.2. Desarrollo del perfil de velocidad en la entrada de un conducto [3].

1.5 PÉRDIDA DE CARGA POR FRICCIÓN.

El flujo en una tubería viene acompañado de una pérdida de energía, que suele expresarse en términos de energía por unidad de peso de fluido circulante (dimensiones de longitud), denominada pérdida de carga. En el caso de tuberías horizontales, la pérdida de se manifiesta como una disminución de presión en el sentido del flujo. Las pérdidas de carga primarias son debidas a los esfuerzos cortantes que se presenta entre el flujo y las paredes de la tubería.

1.5.1 Ecuación de Darcy-Weisbach.

Julius Weisbach, profesor alemán, propuso en 1850 el siguiente modelo, el cual permite obtener las pérdidas de carga por fricción en tuberías (h_f):

$$h_f = f \frac{L V^2}{d 2g} \quad (1.32)$$

La ecuación de Darcy-Weisbach se utiliza para calcular la pérdida de energía debido a la fricción en secciones rectilíneas y largas de tubos circulares, tanto para flujo laminar como turbulento. La diferencia entre los dos flujos está en la evaluación del coeficiente de fricción [6].

1.5.2 Ecuación de Hagen-Poiseuille.

Cuando existe flujo laminar en el fluido parece moverse como si fueran varias capas, una sobre otra. Debido a la viscosidad del fluido se crea un esfuerzo cortante entre sus capas.

Se pierde energía del fluido por la acción de las fuerzas de fricción que hay que vencer, y que son producidas por el esfuerzo cortante.

Debido a que el flujo laminar es regular y ordenado, es posible obtener una relación entre la pérdida de energía y los parámetros del sistema de flujo. Dicha relación se conoce como ecuación de Hagen-Poiseuille.

$$h_f = \frac{32 \mu L V}{\rho g d^2} \quad (1.33)$$

Los parámetros implicados son las propiedades del flujo correspondiente a la viscosidad y el peso específico, las características geométricas correspondientes a la longitud y diámetro del conducto, y la dinámica del fluido, caracterizado por la velocidad promedio.

Esta ecuación es válida únicamente para flujo laminar, sin embargo, también puede aplicarse la ecuación de Darcy-Weisbach para calcular la pérdida de energía [6].

1.5.3 Coeficiente de fricción.

El parámetro adimensional f es conocido como coeficiente de fricción de Darcy y este varía de acuerdo con el número de Reynolds y a la rugosidad relativa de la pared.

Existe para un flujo laminar completamente desarrollado en un conducto circular una relación que permite la obtención del coeficiente de fricción de Darcy al conocerse los esfuerzos cortantes en las paredes. El coeficiente de fricción del conducto es inversamente proporcional al número de Reynolds [3].

$$f_{\text{lam}} = \frac{64}{\text{Re}_d} \quad (1.34)$$

1.5.4 Diagrama de Moody.

Para cubrir el rango de transición Colebrook combinó las relaciones de paredes lisas y flujo dominado por la rugosidad en una fórmula única [3]:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re}\sqrt{f}} \right) \quad (1.35)$$

Esta ecuación tiene el inconveniente de que el coeficiente de fricción no aparece en forma explícita y debe recurrirse al cálculo numérico (o un proceso iterativo) para su resolución.

A partir de ella, Moody desarrolló un diagrama que lleva su nombre, en el que se muestra la gráfica del coeficiente de fricción (f) contra el número de Reynolds (Re), con una familia de curvas de rugosidad relativa, con las que se determina el coeficiente de fricción para flujo turbulento a partir de la intersección de la vertical del número de Reynolds con la curva correspondiente.

Posteriormente los autores ajustaron los datos experimentales y expresaron el coeficiente de fricción en función del número de Reynolds y de la rugosidad relativa. Con una fórmula explícita:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon}{3.7} + \frac{5.1286}{\text{Re}^{0.89}} \right) \quad (1.36)$$

1.6 PÉRDIDAS LOCALIZADAS EN TUBERÍAS.

Además de las pérdidas por fricción existen otros factores que generan pérdidas menores en un sistema de tubería, los cuales se enlistan a continuación:

- Entrada o salida de las tuberías.
- Ensanchamientos o contracciones bruscas y/o graduales.
- Curvas, codos y otros accesorios.
- Válvulas, abiertas o parcialmente cerradas.

Normalmente, estas pérdidas son medidas experimentalmente ya que la teoría existente es muy pobre debido a la complejidad de la configuración del flujo en los elementos mencionados.

Las pérdidas localizadas (o menores) vienen dadas generalmente como un cociente entre pérdida de carga K y la altura cinética o de velocidad, donde la pérdida de energía se calcula:

$$h_m = K \left(\frac{V^2}{2g} \right) \quad (1.37)$$

En un circuito hidráulico es común tener varias pérdidas localizadas. Es posible efectuar la suma de todas estas pérdidas si el diámetro de la tubería es constante.

$$\Delta h_{\text{tot}} = h_f + \sum h_m \quad (1.38)$$

Donde h_f son las perdidas por fricción y h_m son las perdidas menores.

Si el diámetro cambia, las pérdidas hay que sumarlas separadamente ya que la velocidad cambiará también [3]

1.7 MEDIDORES DE FLUJO.

La medición del flujo se refiere a la capacidad de medir la velocidad, el flujo volumetrico o el flujo másico de cualquier liquido o gas.

Hay muchos dispositivos para medir el flujo, algunos miden el flujo en forma directa, mientras que otros miden una velocidad promedio del flujo que se convierte a flujo volumetrico por medio de la relación $Q=Av$.

Para el equipo didáctico se seleccionaron el tubo de Venturi y placa de orificio, que se denominan medidores de carga variable o también conocidos como medidores de presión diferencial o de área variable y son el tipo más común de medidores de flujo, entre ellos se encuentran:

- Placas de orificio.
- Tubo de venturi.
- Toberas.
- Tubos de flujo.

El principio fundamental en el que se basan es el siguiente:

Cuando se restringe una corriente de fluido, su presión disminuye en una cantidad que depende del flujo volumétrico a través de la restricción. Por tanto, la diferencia de presión entre puntos antes y después de la restricción se utiliza para indicar el flujo volumétrico también conocido como el “Efecto venturi” [6].

Considerando flujo unidimensional, se puede aplicar la ecuación 1.11:

$$\dot{m} = \rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 ; \quad \dot{m} = A_1 V_1 = A_2 V_2$$

Si el movimiento de fluidos es adiabático, sin fricción y el fluido es incompresible, puede aplicarse la ecuación 1.22 que es el principio de Bernoulli:

$$\frac{P_1}{\rho g} + z_1 + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho g} + z_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

La resolución de las ecuaciones da, para la caída de presión:

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho g (V_2^2 - V_1^2)}{2g} \quad (1.39)$$

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho V_2^2}{2} \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right] \quad (1.40)$$

Para calcular el flujo volumétrico:

$$Q = A_2 V_2 \quad (1.41)$$

Despejando V_2 y sustituyendo en :

$$Q = A_2 V_2 = \frac{A_2}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)} \quad (1.42)$$

El flujo volumetrico calculado con la ecuacion 1.45 es el valor ideal, sin embargo, ningún canal carece de fricción ya que siempre hay una pérdida de energía en el flujo, lo cual se relaciona con el gasto real y el coeficiente de descarga dado por la siguiente relación [9]:

$$C = \frac{Q_{\text{real}}}{Q_{\text{ideal}}} \quad (1.43)$$

Por lo tanto el flujo volumetrico real se determina:

$$Q_{\text{real}} = \frac{A_2 C}{\sqrt{1 - (A_2/A_1)^2}} \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_1 - P_2)} \quad (1.44)$$

1.7.1 Tubo de Venturi.

El tubo Venturi se compone de tres secciones, la primera de ellas es la sección de entrada que tiene un diámetro inicial igual al diámetro de la tubería, una sección cónica convergente que termina con un diámetro igual al de la garganta; finalmente la salida consiste en una sección cónica divergente que concluye con el diámetro de la tubería.

El flujo que viene de la tubería principal en la sección de entrada se hace acelerar a través de la garganta, donde la presión disminuye. Después, el flujo se expande a través de la sección divergente.

Se colocan tomas de presión en la pared del tubo en la entrada y en la pared de la garganta. Estas tomas de presión se conectan a un manómetro, de modo que se indique una diferencia de presión [6].

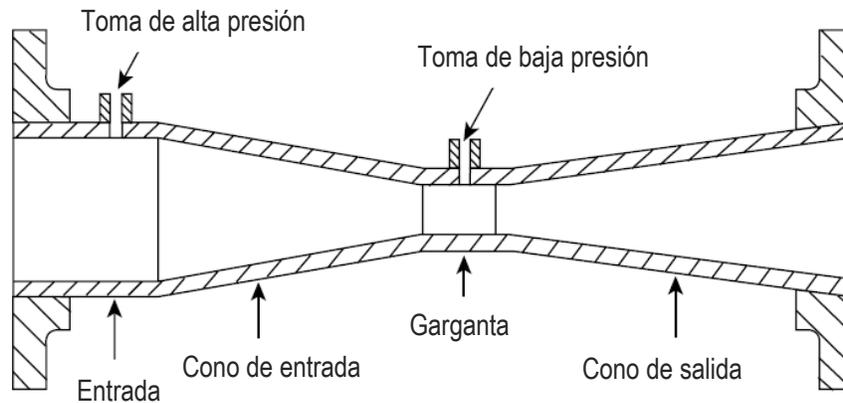


Figura 1.3. Diagrama del tubo Venturi [8].

1.7.2 Aplicaciones.

El tubo de Venturi puede tener muchas aplicaciones algunas de ellas son:

- Plomería: Los medidores Venturi se utilizan en tuberías en sistemas de recolección de aguas residuales y plantas de tratamiento ya que su estructura de diseño general permite que los sólidos pasen a través del dispositivo.
- El flujo de productos químicos en tuberías: Las temperaturas y presiones de los productos químicos en una tubería no afectan la precisión de un medidor de flujo Venturi y, debido a esto, se utilizan en tuberías de petróleo crudo.
- Carburadores: Permite al carburador ajustar y calibrar la distribución de combustible y aire al motor según sea necesario.

1.7.3 Placa de orificio.

Una placa orificio es una placa plana con un agujero de bordes afilados y maquinado con precisión. Se coloca de forma concéntrica dentro de un tubo. El flujo se contrae de modo repentino conforme se acerca al orificio, y posteriormente se expande al regresar al diámetro del tubo.

Cuando un flujo está obligado a pasar por una reducción de área, se observa un estrechamiento a partir del orificio, a este fenómeno se le denomina vena contracta y es la zona donde el área transversal del flujo es más estrecha, por lo que se alcanza la máxima velocidad del flujo y la mayor pérdida de presión.

De igual manera, las tomas de presión se colocan antes y después del orificio, que permiten relacionarlo con el flujo volumétrico por medio de la ecuación 1. 44.

El valor de C también se ve afectado por pequeñas variaciones de la geometría de los bordes del orificio. El valor de C es mucho menor que el tubo Venturi, porque el fluido es forzado a tener una contracción súbita, seguida de una expansión repentina [6].

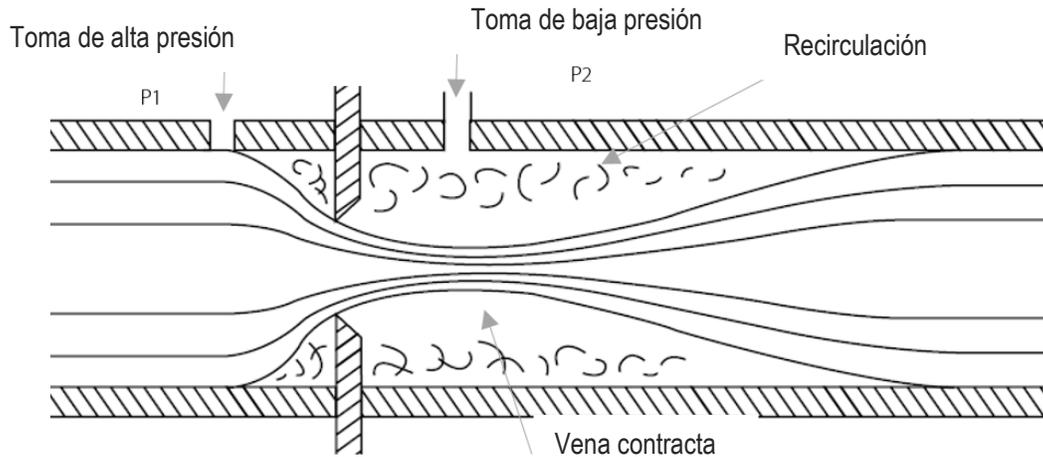


Figura 1.4. Flujo a través de la placa de orificio [8].

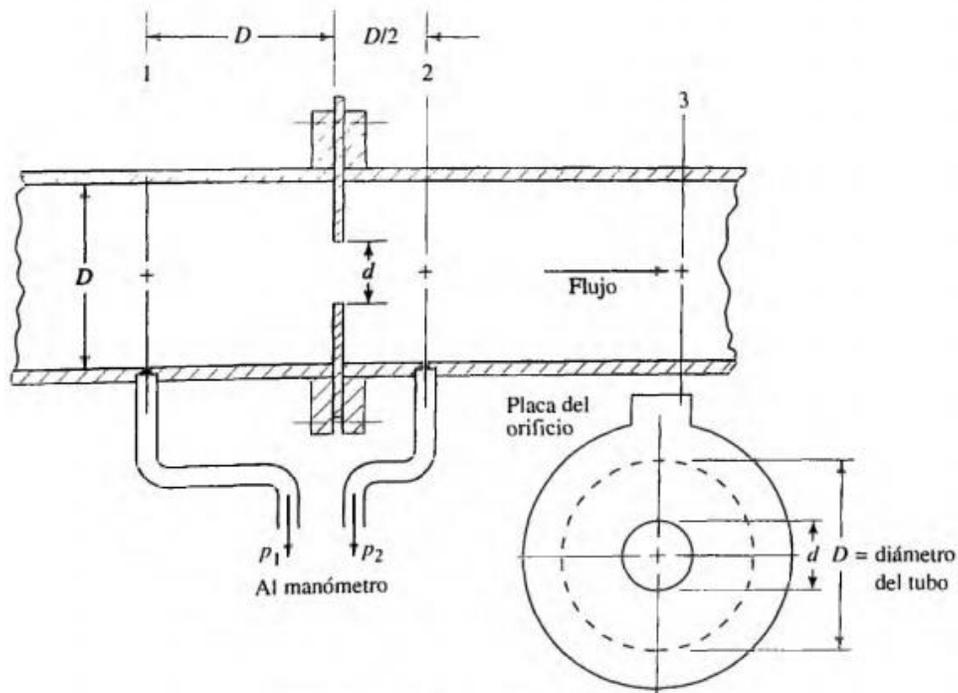


Figura 1.5. Esquema de instalación de placa de orificio [6].

1.7.4 Tipos de placa de orificio

Existen diferentes diseños de placas de orificio según la aplicación que se desee:

- **Placas de orificio concéntricas.**

En estas placas el orificio del disco se encuentra en el centro del mismo. De aplicación universal para fluidos limpios, monofásicos, continuos y además el perfil de flujo es uniforme y está bien desarrollado.

- **Placas de orificio concéntricas cónicas.**

En este caso el orificio al igual que las placas concéntricas se encuentra en el centro del disco, pero en este el diámetro del orificio se va reduciendo a medida que el fluido va atravesando el disco. Es utilizado para fluidos que tienen un alto número de Reynolds, es decir fluidos que tienden a comportarse de forma turbulenta.

- **Placas de orificio excéntricas.**

Son aquellas en las que el orificio no se encuentra en el centro del disco sino que levemente hacia abajo. Se utiliza para medir fluidos con partículas sólidas suspendidas y flujos bifásicos (mezcla de líquido y gas).

- **Placas de orificio segmentadas.**

El orificio en este tipo de placa es un segmento de círculo concéntrico. Es utilizado para medir flujo con alta concentración de partículas sólidas ya que el diseño de la placa elimina la acumulación de material.

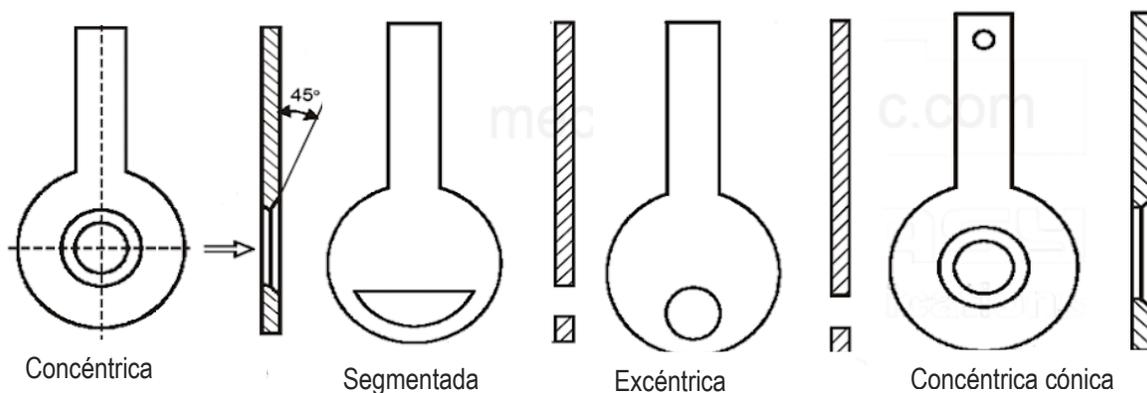


Figura 1.6. Tipos de placas de orificio [12].

1.7.5 Aplicaciones

Por ser un elemento de medición de caudal, la placa de orificio tiene miles de aplicaciones y la mayoría son industriales como:

- Química y petroquímica.
- Industria de proceso y generación de energía.
- Tratamiento de agua y distribución.
- Tratamiento de gas y transporte.
- Refinería e industria petrolífera.

1.7.6 Diferencias entre tubo de Venturi y placa de orificio.

- La placa de orificio genera una gran pérdida permanente de presión debido a la generación de turbulencia aguas abajo del orificio, mientras que la geometría del tubo de Venturi previene la formación vórtices, lo cual reduce enormemente la pérdida permanente de presión.
- El tubo de Venturi es costoso de manufacturar y debe ser cuidadosamente diseñado, mientras que la placa de oficio es de geometría simple y económica, fácil de instalar.
- La placa de orificio puede sustituirse para ajustarse a diferentes tazas de flujo, por otro lado, el diámetro del Venturi es fijo por lo que el rango de medición está limitado por la caída de presión.
- La placa de orificio puede ser usada en una gran variedad de aplicaciones debido a que se puede fabricar en diversos materiales y diseños.

Capítulo 2

2. DISEÑO Y CONSTRUCCION DEL EQUIPO.

2.1 OBJETIVOS DE DISEÑO.

Para el diseño del equipo que será instalado en los laboratorios de ciencias básicas de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, se plantearon los siguientes objetivos:

- Diseñar un equipo que genere condiciones de flujo tales que permitan la aplicación de las leyes de conservación con las consideraciones y simplificaciones planteadas en un curso introductorio a la termodinámica.
- Diseñar el banco de pruebas de manera que el circuito hidráulico tenga pérdidas de carga por fricción mínimas en la tubería y los accesorios.
- El equipo tendrá más de un dispositivo de estudio instalado, de manera que permita al alumno el análisis de diferentes sistemas y al profesorado la implementación y desarrollo de diferentes prácticas de laboratorio.

2.1.1 Requerimientos de diseño.

A continuación, se enlistan los requerimientos para el diseño del equipo, los cuales fueron solicitados por el coordinador del laboratorio de termodinámica de la Facultad de Ingeniería de UNAM, ya que con su gran experiencia impartiendo la asignatura ha podido identificar las necesidades actuales del alumnado y las necesidades del mismo laboratorio:

- Costo accesible de fabricación.
- Visualizar el flujo a través de la tubería.
- El flujo debe ser impulsado por un equipo de bombeo.
- Visualizar las líneas de flujo en la sección de tubo constante.
- Incluir en el equipo un inyector de tinta que permita la visualización de las líneas de flujo sin alterarlo.
- Realizar diferentes prácticas de laboratorio en el equipo que ilustren diferentes conceptos de la mecánica de fluidos. Se requiere que el equipo cuente con un dispositivo tubo de Venturi, una reducción de diámetro y finalmente una sección de tubería constante.
- Fácil instalación y transporte del equipo de un lugar a otro.

De los requerimientos enlistados todos son de suma importancia. Sin embargo, se jerarquizaron tomando en cuenta aquellos requerimientos que afectan o no directamente en el diseño del banco mediante una escala de 5 puntos, donde 0 es asignado a los requerimientos que tengan menor importancia y 5 a los de mayor importancia.

Número	Requerimientos	Valor
1	Costo accesible de fabricación	5
2	Visualización del flujo a través de la tubería	5
3	Flujo impulsado por un equipo de bombeo	4
4	Visualización de líneas de flujo en sección de tubo constante	3
5	Realización de diferentes prácticas de laboratorio en el equipo	4
6	Fácil instalación y transporte	5

Tabla 2.1. Jerarquía de requerimientos.

Con la jerarquización determinamos que el diseño se trabajará principalmente con los requerimientos número 1 2 y 6. Seguido de esto, se contemplará los requerimientos 3 y 5. Finalmente, pero sin disminuir su importancia, el diseño considerará visualizar las líneas de flujo en la sección constante.

2.2 CONSIDERACIONES PRÁCTICAS.

La presión del equipo y de los instrumentos de censado que serán instalados en él, depende del fluido utilizado, el equipo está diseñado para recircular agua a una temperatura y presión promedio en la Ciudad de México. De manera que no puede asegurarse su correcto funcionamiento si el equipo es utilizado en otro sitio con condiciones tales que alteren las propiedades físicas del agua que aquí se indican.

2.2.1 Fácil instalación y transporte.

Dado que dentro del laboratorio de mecánica de fluidos se cuenta con una amplia variedad de equipos, es necesario que nuestro equipo sea de fácil instalación y manejo dentro de las aulas de laboratorio.

Para poder cumplir con este requerimiento se propone que el diseño del equipo contemple las características del laboratorio de mecánica de fluidos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, de manera que este pueda ser instalado en un tiempo promedio de 30 minutos. En el tiempo de instalación se contempla el tiempo que requiere el equipo para estabilizarse, de otra manera, los alumnos se encontrarán tomando medidas erróneas.

Por otro lado, para asegurar el fácil transporte dentro de las aulas del laboratorio, se propone que el equipo cuente con una estructura que le permita un fácil desplazamiento y que esta no exceda las medidas de los pasillos de transporte del laboratorio, teniendo como límite un área rectangular de 1.3 [m] x 1[m].

2.2.2 Requerimientos de manufactura e instalación.

Para lograr un correcto funcionamiento del equipo es necesario cumplir con los siguientes puntos:

- Simetría perfecta en los conductos y accesorios por los que circulará el fluido.
- Correcta alineación del circuito y las secciones de tubería.
- Estabilidad máxima en la ubicación del equipo.
- Correcto ensamble de la tubería y accesorios para evitar fugas en el circuito hidráulico.
- Redondeos correctos en la entrada y salida del flujo, de manera que se disminuya la generación de pérdidas de presión.
- Se requiere que el equipo se encuentre trabajando mediante régimen permanente, es decir, que se haya dado el tiempo suficiente a que el sistema se estabilice con el fin de que la experimentación sea efectiva y los resultados obtenidos por medio del equipo concuerden con los obtenidos mediante el método analítico.
- En el caso de los medidores de flujo la tubería tiene que ser de sección circular y en posición completamente horizontal.
- Cuidar la ubicación de las tomas de presión en los dispositivos medidores de flujo para garantizar lecturas correctas.
- Que el interior de la tubería se encuentre limpio y libre de incrustaciones.

-
- En el análisis del flujo a través de la placa de orificio y tubo de Venturi se debe considerar que existen conexiones y/o accesorios que modifican las condiciones normales del flujo, como válvulas, codos, reducciones, etc. que originan remolinos y alteran las mediciones, por lo que la condición de flujo uniforme se garantiza con una longitud mínima de tubería recta antes y después del dispositivo de medición. En estas dos longitudes no debe existir ningún accesorio o conexión.

2.3 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL EQUIPO.

2.3.1 Arreglo hidráulico.

Se propone un arreglo de tuberías por el cual se hará circular el flujo de agua, controlando la dirección de este por medio de válvulas de dos vías, de manera que pueda cambiarse el circuito hidráulico de trabajo y el estudiante pueda trabajar con diferentes dispositivos que serán instalados en las diferentes ramificaciones.

La decisión del arreglo final y el número de ramificaciones se tomó con la asistencia del profesorado del laboratorio de termodinámica de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, quienes con su experiencia docente y tomando en cuenta las necesidades actuales del laboratorio determinaron que el arreglo más conveniente es el mostrado en la figura siguiente.

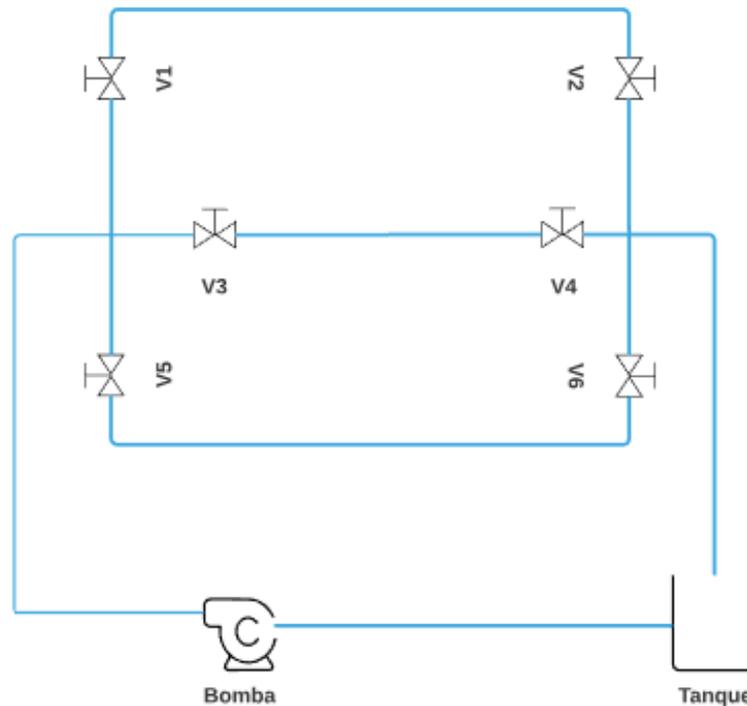


Figura 2.1. Circuito hidráulico propuesto.

2.3.2 Selección de la bomba.

La bomba del arreglo hidráulico se seleccionó con ayuda del personal del laboratorio de termodinámica. Para cumplir con el requerimiento principal de bajo costo de fabricación, se utiliza una bomba centrífuga comercial con las siguientes características.

- Potencia: 1/4 HP (0.186 kW)
- Motor: 127 V 60 Hz
- Flujo máximo: 70 L/min
- Altura máxima: 16 m
- Conexiones de succión y descarga: 1" NPT
- Ciclo de trabajo: 50 min. de trabajo x 20 min. de descanso
- Máximo diario: 6 horas

2.3.3 Selección de las válvulas.

Se seleccionaron válvulas solenoides de dos vías para controlar el paso del fluido a través de las diferentes divisiones de tubería que se tienen instalados.

Su funcionamiento se basa principalmente en campos electromagnéticos ya que posee una bobina magnética que al recibir corriente, levanta el émbolo en su interior permitiendo accionar la válvula. Cabe mencionar que solo pueden funcionar como dispositivos on/off, por lo que las válvulas solo se abrirán y cerrarán de acuerdo al diseño del equipo

.Características de la válvula.

- Fabricante: Rain Bird
- Caudal máximo: 6.82 [m³/s]
- Rango operativo de presión: 15-150 [psi].
- Conexión: 1"

2.3.4 Dispositivos instalados.

El equipo ha sido desarrollado para permitir una visualización clara de los principios de la mecánica de fluidos y para verificar experimentalmente la teoría estudiada en clase, por lo que permite visualizar diferentes fenómenos físicos. Los dispositivos que están instalados en las ramificaciones se describen a continuación:

a) Sección constante.

En la ramificación superior se cuenta con una sección de tubo constante que se enfoca en la visualización de flujo laminar y está dotado de un sistema de inyección de tinta que permite observar las condiciones de flujo en el interior del tubo transparente.

El sistema de inyección de tinta consiste en un tapón de silicón contenido en un puerto de acrílico ensamblado en la tubería, en el cuál se inyectará de manera manual el colorante por medio de una jeringa.

El sistema de inyección está colocado a una distancia tal que permita la visualización del desarrollo del flujo, además el tapón de silicón evita posibles fugas y permite un total de 20 inyecciones de colorante.

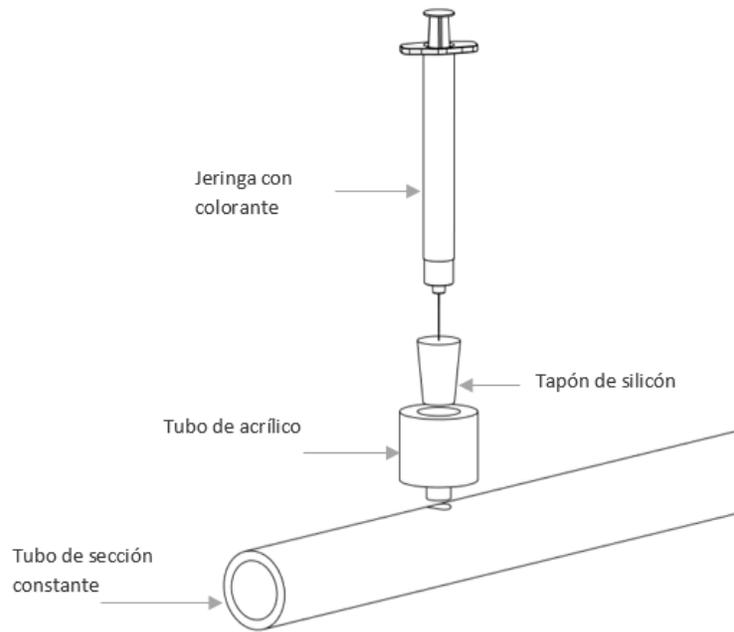


Figura 2.3. Sistema de inyección de colorante.

b) Placa de orificio.

En la siguiente ramificación se tiene instalada una placa de orificio concéntrica que permitirá la visualización del cambio de estado del flujo a través del dispositivo, cuenta con tomas de presión en la entrada y salida del orificio. Además, permite el cálculo del flujo volumétrico y del coeficiente de descarga por medio de las ecuaciones mencionadas en el primer capítulo.

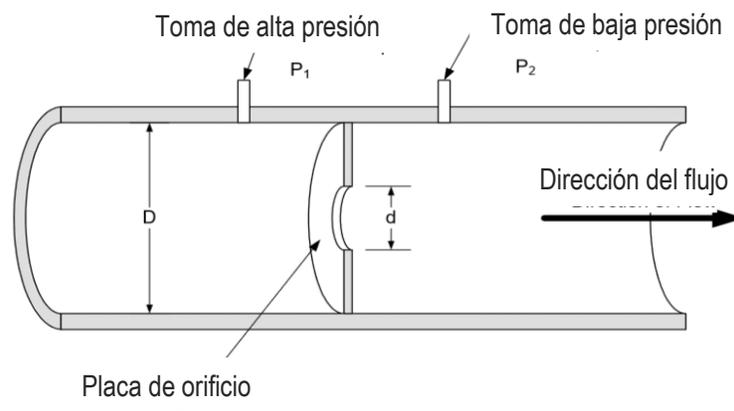


Figura 2.3. Diagrama de la placa de orificio [11].

c) Tubo de Venturi.

La última ramificación consta de un tubo de Venturi, este módulo permite el estudio del teorema de Bernoulli, dotado de tres tomas de presión estática. De esta manera, el alumno podrá identificar la recuperación de carga que se presenta en la sección divergente del tubo.

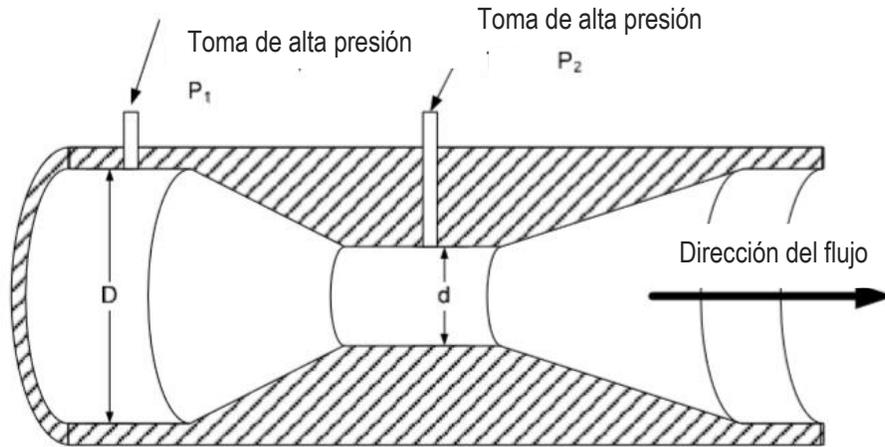


Figura 2.3. Diagrama del tubo de Venturi [11].

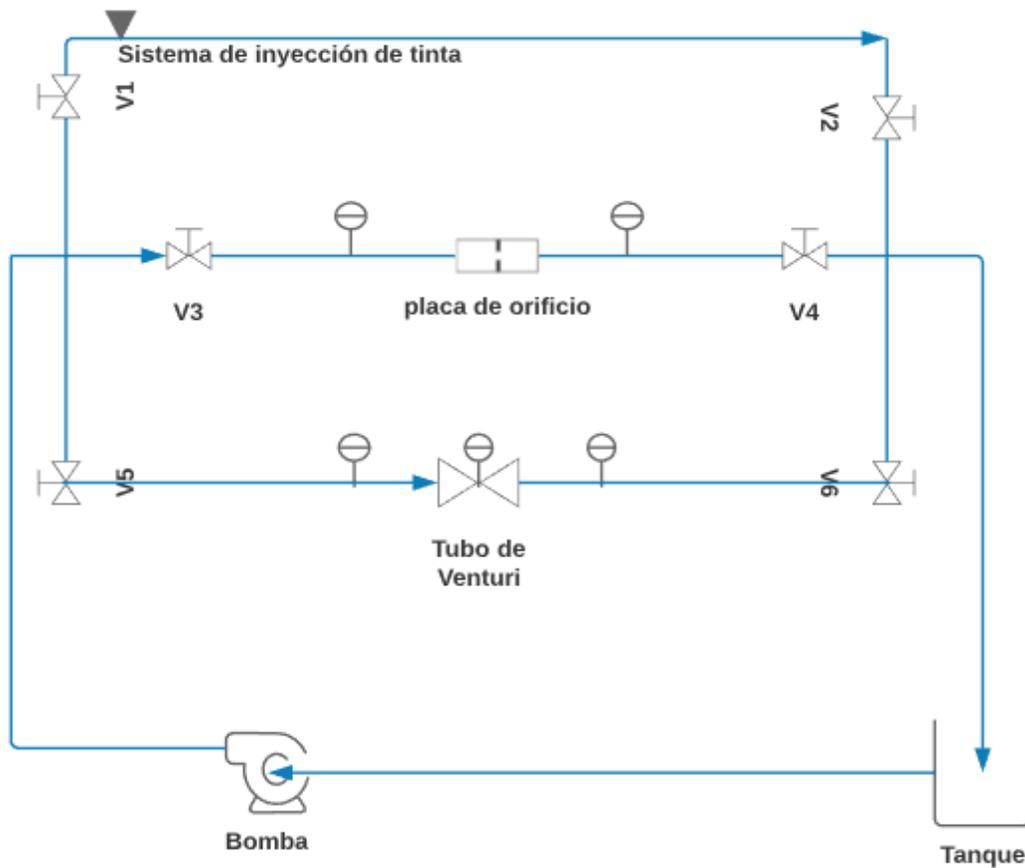


Figura 2.4. Diagrama hidráulico y dispositivos del equipo.

2.3.5 Control de las válvulas.

De acuerdo a los requerimientos de diseño y necesidades del equipo, sólo se podrá realizar un experimento a la vez, con el fin de analizar en buenas condiciones cada experimento, por lo que las seis válvulas no estarán abiertas al mismo tiempo. Las válvulas están programadas para trabajar en pares, es decir, dos válvulas corresponden a un experimento específico.

De acuerdo con la figura 2.1, las válvulas V1 y V2 se abrirán para trabajar con la sección constante que es el primer experimento. De igual manera, el experimento número dos que es la placa de orificio, está asociado a las válvulas V3 y V4, finalmente, el tubo de Venturi que es el tercer experimento, corresponde a las válvulas V5 y V6.

El programa funciona de acuerdo al experimento que se desee realizar. Para ello, existe una combinación de números binarios del 1 al 7, que de acuerdo al experimento le corresponde su equivalente a número decimal.

Por lo que el número 1, 2 y 4 están asociados al primer, segundo y tercer experimento respectivamente, cualquier otra combinación en números binarios (3, 5, 6 y 7) hará que el equipo se mantenga sin trabajar, esto implica que se está apretando cualquier combinación de dos botones o los tres al mismo tiempo por lo que todas las válvulas permanecerán cerradas hasta recibir una entrada válida.

Para mayores detalles del programa en Arduino consultar el código en el Anexo I.

Decimal	Botones			Válvulas					
	B3 (4)	B2 (2)	B1 (1)	V1	V2	V3	V4	V5	V6
1	0	0	1	1	1	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0	1	1	0	0
3	0	1	1	0	0	0	0	0	0
4	1	0	0	0	0	0	0	1	1
5	1	0	1	0	0	0	0	0	0
6	1	1	0	0	0	0	0	0	0
7	1	1	1	0	0	0	0	0	0

Tabla 2.2 Tabla de verdad de las válvulas.

2.3.6 Instrumentación.

El equipo está instrumentado con manómetros para registrar el valor de la presión en los medidores de flujo (placa de orificio y el tubo de Venturi).

Están instalados de manera que se observe una caída de presión notable en la placa de orificio y la recuperación de carga en el tubo de Venturi para que los estudiantes comprendan la pérdida de presión de manera física.

Características de los manómetros.

- Tipo de manómetro: seco
- Rango de presión: 0-100 [psi], 0-7 [$\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$]
- Diámetro de conexión: $\frac{1}{4}$ " NPT
- Tipo de lectura: analógica.

2.4 RAMIFICACIONES DEL EQUIPO.

2.4.1 Inyección de tinta

En esta sección se colocaron tres puertos de inyección de tinta con la finalidad de observar el desarrollo del flujo a lo largo de la tubería.

El primer puerto está instalado inmediatamente después de la válvula para visualizar la turbulencia que los accesorios provocan al fluido y los dos puertos restantes están distribuidos a lo largo de la tubería con el fin de observar la transición del flujo a régimen laminar.

2.4.2 Diseño de la placa de orificio.

En el primer capítulo se estudió que existen diversos diseños de placa de orificio para diferentes aplicaciones; por las condiciones de flujo contempladas en el equipo se seleccionó instalar una placa concéntrica de bordes cuadrados.

El diseño de la placa de orificio se basa principalmente en la relación de diámetros en la cual se toman en cuenta el diámetro de la tubería y el diámetro del orificio representado por la letra β .

Para el cálculo de la relación de diámetros la referencia [8] recomienda el siguiente rango de diseño:

$$0.20 \leq \beta \leq 0.65 \quad \text{donde} \quad \beta = \frac{d}{D} = \frac{\text{diámetro orificio}}{\text{diámetro tubería}}$$

Para seleccionar un apropiado diámetro del orificio se propusieron diferentes valores y se realizaron simulaciones en Ansys Fluent con el fin de observar la distribución de presión y velocidad dentro de la tubería con el dispositivo instalado.

En la siguiente figura se muestra la velocidad del flujo a través de la placa de orificio con los diferentes valores propuestos, se observa que en la contracción se genera un aumento en la velocidad y en las paredes de la tubería se cumple la condición de no deslizamiento.

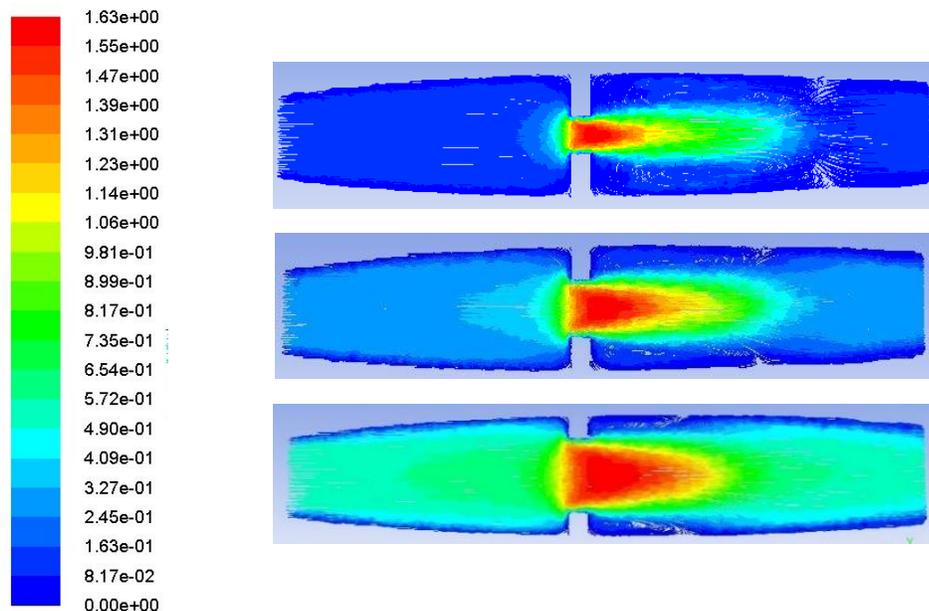


Figura 2.5. Distribución de velocidad con un orificio de 6mm, 9mm y 12mm respectivamente.

Los diámetros propuestos se encuentran dentro del rango de β señalado anteriormente, sin embargo, entre más pequeña sea la relación mayor será la pérdida de presión, lo que puede producir una baja presión no deseada aguas abajo, que en ocasiones puede ser suficiente para evaporar el líquido en la contracción debido a las altas velocidades. De ser así, esta condición puede provocar daños en la tubería, ruido y vibraciones en la instalación.

Por las razones anteriores se seleccionó la placa con diámetro de orificio de 9[mm] con un espesor de 3[mm] para manufacturar en PVC.

La relación de diámetros seleccionada es:

$$\beta = \frac{9\text{mm}}{19.05} = 0.4724$$

2.4.2.1 Tomas de presión.

Existen diferentes configuraciones para medir la presión en la placa de orificio que depende principalmente de su diseño y condiciones de operación del equipo.

En la figura 2.6 se muestran diferentes conexiones de presión de acuerdo al diámetro de la tubería.

Con el tamaño de tubería del equipo las tomas de presión se podrían colocar inmediatamente antes y después del dispositivo, sin embargo, la instalación del equipo no lo permite. Además, en la zona de la vena contracta se forman pequeñas turbulencias cercanas a la pared de la tubería, mismas que provocan bajas presiones que pueden no ser detectadas por los manómetros instalados.

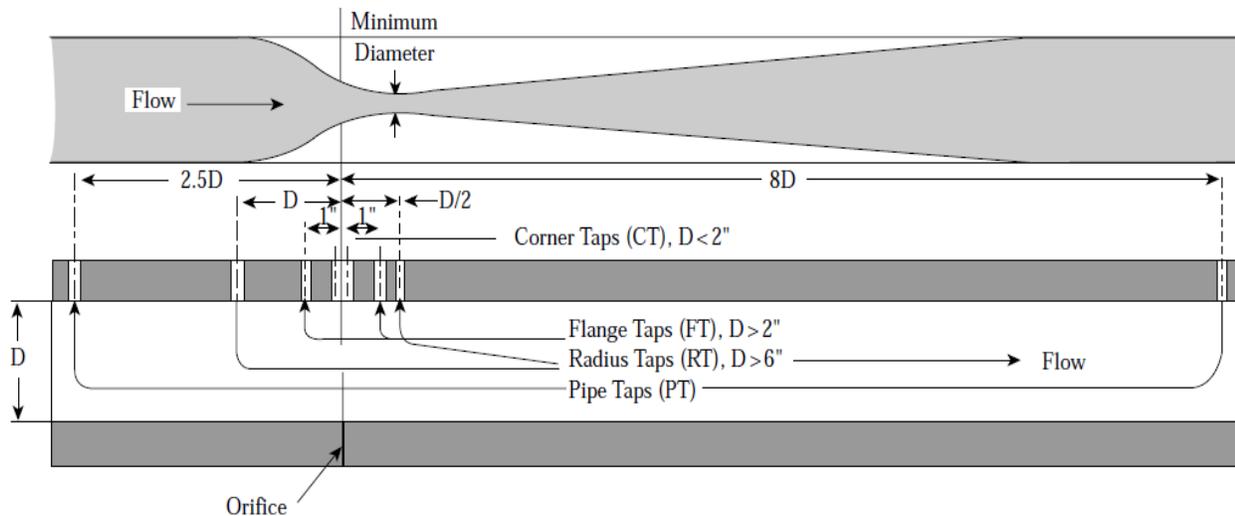


Figura 2.6. Tomas de presión recomendadas en la placa de orificio [8].

Con base en la figura anterior se seleccionó que la toma de presión aguas abajo estará instalada a 1[in] de la placa.

2.4.3.1 Longitud de tubería recta para la placa de orificio.

Para garantizar flujo uniforme a través del equipo se debe cumplir con el requerimiento de longitud mínima de tubería recta antes y después de los medidores de flujo. Con base en la configuración del equipo y la relación de diámetros de la placa de orificio se puede determinar dicha longitud.

Con base en la siguiente tabla y con $\beta = 0.47$.

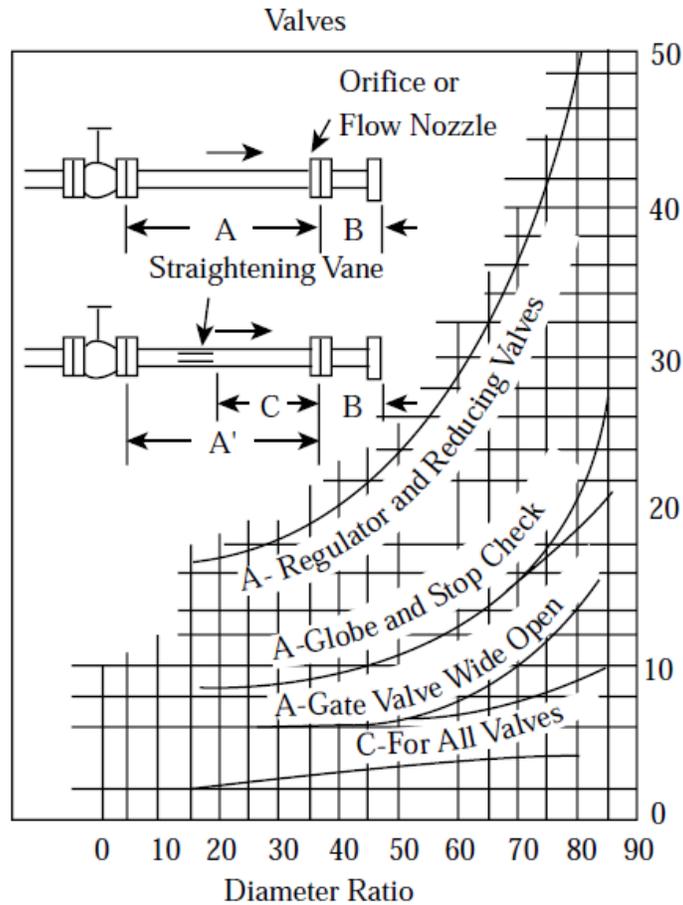


Figura 2.7. Gráfica para placa de orificio en configuración con válvulas. [8]

Como resultado de la intersección de la vertical con la curva de válvula abierta tenemos 8 diámetros de tubería.

Por lo que para aguas arriba la distancia mínima requerida es:

$$6 \text{ diámetros de tubería} = 63(1.905 \text{ cm}) = 11.43 \text{ [cm]}$$

De acuerdo a la referencia [8] la distancia recomendada para todos los casos en la que se tenga instalada una placa de orificio es de 5 diámetros aguas abajo; por lo que:

$$5 \text{ diámetros de tubería} = 5(1.905 \text{ cm}) = 9.25 \text{ [cm]}$$

2.4.4 Tubo de Venturi.

Las características del tubo de Venturi instalado en el equipo son las siguientes:

Diámetro de la garganta:

$$d = 5[\text{mm}]$$

Diámetro interior de la tubería:

$$D = \frac{3}{4}[\text{in}] = 19.05[\text{mm}]$$

De acuerdo a la referencia [8] la relación de diámetros debe estar en el siguiente rango:

$$0.20 \leq \beta \leq 0.75$$

$$\beta = \frac{5}{19.05} = 0.2623$$

2.4.5 Longitud de tubería recta del tubo de Venturi.

De igual manera, para determinar la longitud de tubería recta en el tubo de Venturi se considera la relación de diámetros y la instalación del equipo. Sin embargo, la referencia [1] recomienda un mínimo de 10 diámetros de tubería para cualquier instalación.

$$10 \text{ diámetros de tubería} = 10(1.905 \text{ cm}) = 19.05 [\text{cm}]$$

2.4.6 Tomas de presión.

Con el fin de que el alumno comprenda el efecto Venturi, se colocaron tres tomas de presión, las cuales se ubican en la entrada y garganta del tubo de Venturi. El tercer manómetro está a una distancia de la salida del dispositivo con el objetivo de que se observe la recuperación de carga que genera el tubo de Venturi.

2.5 CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO.

2.5.1 Manufactura de la estructura.

Se propone el uso de una estructura metálica con perfiles de aluminio, de manera que brinde estabilidad, soporte y movilidad al equipo.

La manufactura de la base se realizó en el taller del Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología (ICAT) con la máquina de corte por chorro de agua.

Se seleccionó este proceso ya que al ser corte en frío no existe transferencia de calor que afecte la zona de corte que implique un proceso secundario, no existen modificaciones en las propiedades del material y alta precisión de corte.



Figura 2.5. Proceso de corte por chorro de agua.

Para iniciar con el proceso, es necesario calibrar la máquina para especificar las coordenadas donde empezará el corte, además se deben proporcionar datos como el material, el grosor de la placa, la presión, la trayectoria de corte, entre otras cosas. En la figura 2.5 se muestra la configuración de la máquina de corte, que se logró con ayuda del personal del taller.



Figura 2.6. Configuración del corte.



Figura 2.7. Soporte lateral.

Las piezas laterales del equipo cuentan con tres barrenos de 1 pulgada de diámetro, ambas simétricas, en los cuales se colocarán tres secciones de tubería en donde se podrán realizar tres prácticas diferentes, mientras que, para la base se respetaron las medidas límite mencionadas anteriormente.

2.4.7 Ensamble de tubería y accesorios.

En la siguiente figura, se muestra el ensamble final del equipo que cuenta con un total de seis válvulas que restringen el paso del flujo a través de las tres divisiones de tubería, un inyector de tinta instalado en la primera ramificación, una placa de orificio con dos manómetros antes y después del dispositivo en la segunda ramificación, posteriormente, un tubo de Venturi que cuenta con tres tomas de presión que están ubicadas en la sección de la garganta, en la entrada y salida del medidor de flujo. Finalmente, una bomba centrífuga que impulsa el flujo por el equipo y un depósito de agua para cerrar el circuito hidráulico.

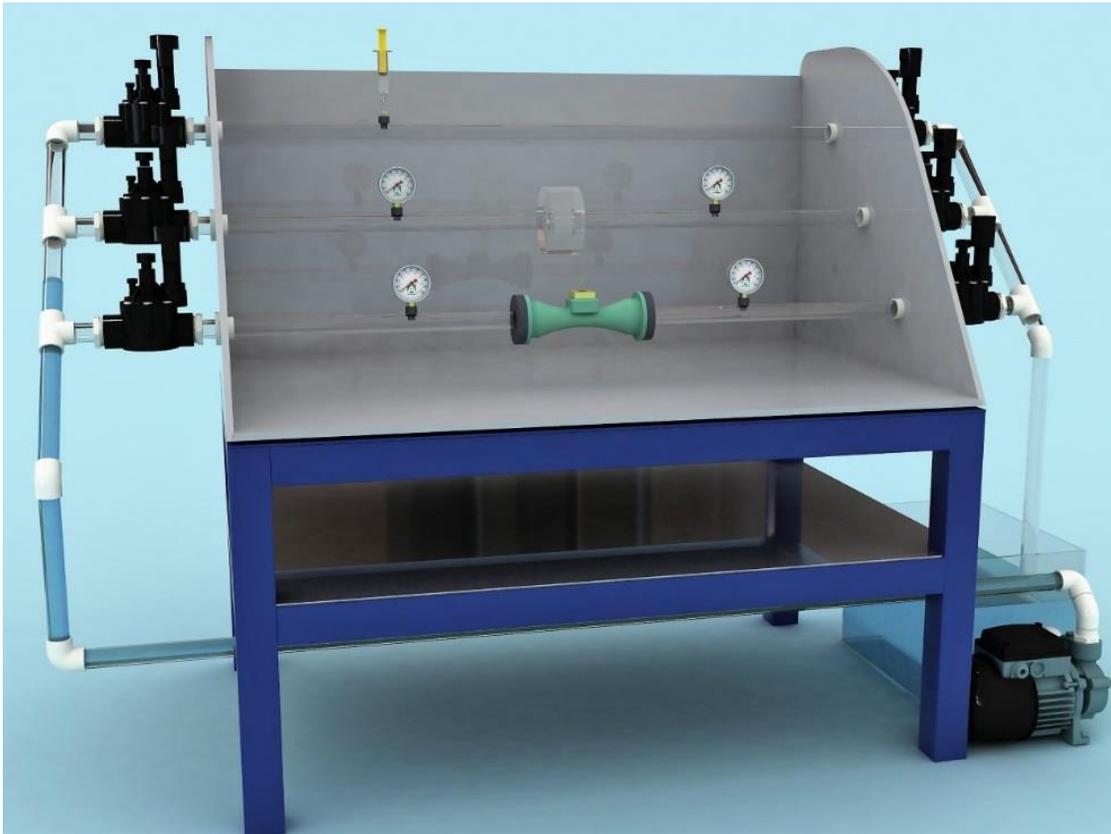


Figura 2.8. Equipo construido.

Capítulo 3

3. PRUEBAS Y EXPERIMENTOS.

3.1 PRUEBA DE VELOCIDAD DE LA BOMBA.

El principal objetivo de esta prueba es determinar la velocidad a la que trabajará la bomba del equipo.

Se utilizó un transformador variable para cambiar la frecuencia de la bomba y en consecuencia, cambia también su velocidad, el caudal y la presión. Para esto se requiere hacer la conexión eléctrica para conectar la bomba centrífuga al variac, como se muestra en la figura 3.1.



Figura 3.1. Conexión de la bomba y variac.

Características del transformador variable.

- Fabricante: Staco Energy Products Company.
- Voltaje de Salida: 140 VCA.
- Voltaje de la fuente: 120 VCA.
- Tipo de entrada: Clavija de conexión.

Posteriormente, se hicieron las pruebas a diferentes valores del transformador variable y se seleccionó que en las ramificaciones de los medidores de flujo se utilizará el variac en un valor de 80.

En la descarga del equipo se conectó una válvula de compuerta para variar la apertura, esto para obtener condiciones de trabajo similares a los equipos utilizados en el laboratorio de Termodinámica, es decir, a presiones cercanas a $1 \left[\frac{\text{Kg}}{\text{cm}^2} \right]$.

3.2 MEDIDA DEL CAUDAL.

En esta prueba se tiene el objetivo de medir el caudal de la bomba con ayuda del medidor de flujo modelo *El 500* y así calcular la velocidad de entrada del flujo en cada ramificación del equipo.

Una vez hecha la conexión de la bomba y con el variac en el valor seleccionado, se conecta el medidor de flujo en la entrada del tubo de Venturi y de la placa de orificio. Se requiere que el flujo se estabilice para obtener lecturas confiables, por lo que hay que dejar trabajar la bomba unos minutos.

Características del medidor de flujo.

- Fabricante: Flow Technology.
- Modelo: EL 500
- Acoplamiento: MC 308C
- Voltaje: 24V AC/DC 60Hz



Figura 3.2. Medidor de flujo en la entrada de la placa.

3.3 EXPERIMENTO 1: VISUALIZACIÓN DE LAS LÍNEAS E FLUJO.

En este experimento se pretende ilustrar la transición del flujo a lo largo de la tubería, que inicia con la salida del fluido de los accesorios y posteriormente circula por una sección de tubería recta.

El objetivo de esta ramificación es la visualización de las líneas de flujo, para ello se inyectará el colorante en los tres puertos instalados a lo largo de la tubería.



Figura 3.3. Ramificación de sección constante con tres puertos de inyección de colorante.

3.4 EXPERIMENTO 2: PLACA DE ORIFICIO.

En este segundo experimento se tienen los siguientes objetivos:

- Registrar y graficar la caída de presión que produce la placa de orificio.
- Calcular la velocidad del flujo en la entrada y salida del dispositivo.
- Comparar los resultados analíticos con los obtenidos experimentalmente.

3.4.1 Pérdida de presión.

La presión se registró de dos maneras diferentes, la primera, con los manómetros de Bourdon instalados en el equipo y la segunda con el transductor de presión PX409-USBH.

Se colocó el sensor de presión en cada puerto con el fin de verificar los datos registrados con los manómetros como se muestra en la figura 3.4.

El transductor tiene la facilidad de registrar y graficar la presión en tiempo real, además es más sensible que los manómetros, por lo que se obtienen lecturas más precisas.

Características del transductor de presión con Salida USB.

- Modelo: PX409-USBH
- Rango: 0 – 15 [psi] ;
- Conexión: ¼ “ NPT
- Precisión: 0.08%
- Resolución: 0.0001 [psi]
- Terminación tipo conector USB estándar.
- Software: Digital Transducer Application.
- Partes en contacto con el fluido de acero inoxidable.

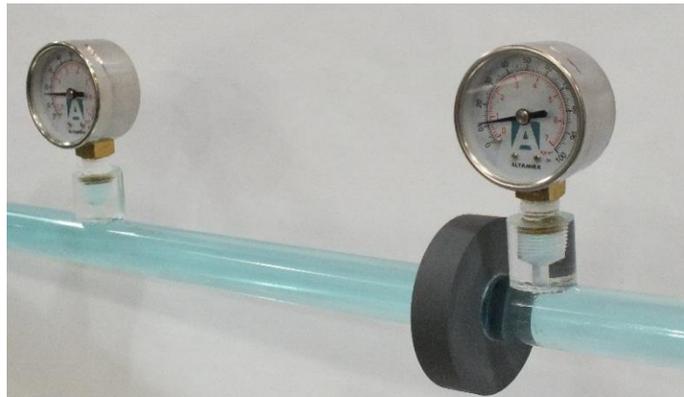


Figura 3.4. Registro de la presión en la placa de orificio con los manómetros.

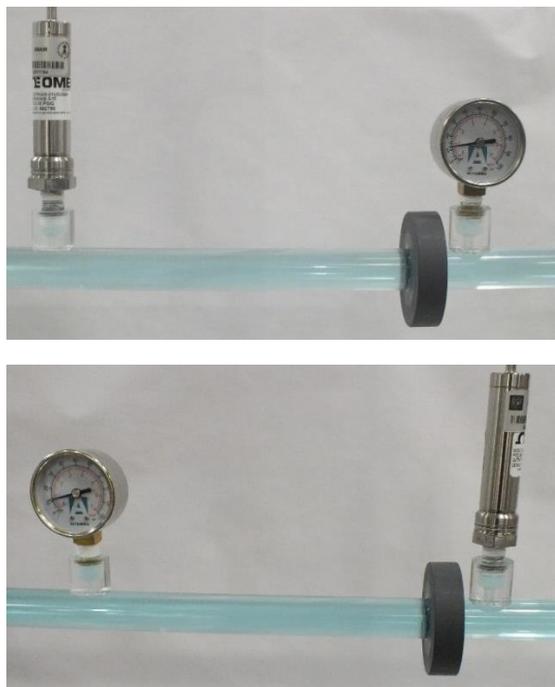


Figura 3.5. Transductor de presión en las dos tomas de presión.

3.5 EXPERIMENTO 3: TUBO DE VENTURI.

Los objetivos de este experimento son:

- Comprender el efecto Venturi
- Registrar y graficar la presión en la entrada, en la garganta y salida del dispositivo.
- Calcular la velocidad de entrada y salida del medidor de flujo.
- Comparar los resultados experimentales y teóricos.

3.5.1 Pérdida de presión.

De igual manera que con la placa de orificio, se registró la presión con los manómetros como se muestra en la figura 3.6 y el transductor colocándolo en los puertos para obtener la gráfica de presión del tubo de Venturi como se muestra en la figura 3.7.



Figura 3.6. Tubo de Venturi con manómetros.



Figura 3.7. Tubo de Venturi con el transductor de presión en las tres tomas de presión.

Capítulo 4

IV. RESULTADOS.

4.1 FLUJO LAMINAR.

4.1.1 Visualización de las líneas de flujo.

En el primer puerto de inyección se observa un régimen turbulento ya que el colorante se disuelve de manera rápida como se observa en la figura 4.1.

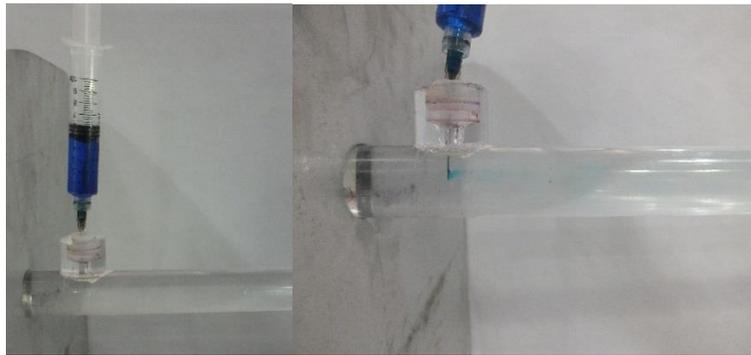


Figura 4.1. Inyección de colorante en el primer puerto.

Al inyectar colorante en el segundo puerto se observa un régimen transitorio debido a que encuentra instalado a una distancia más alejada a los accesorios, como se muestra en la figura 4.2

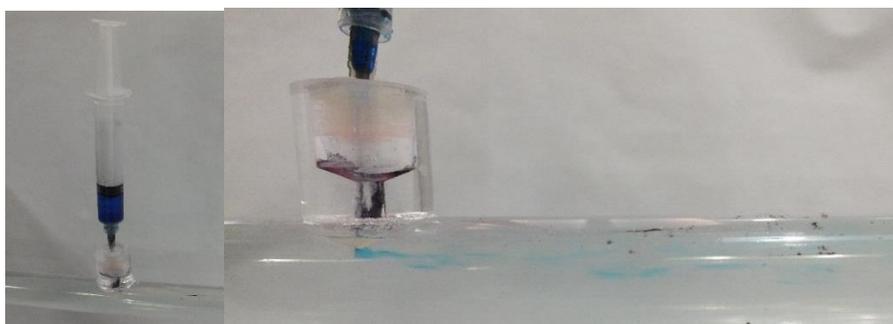


Figura 4.2. Inyección de colorante en el segundo puerto.

La última inyección de colorante se realiza a una distancia considerable de los accesorios del equipo, se observan las líneas de flujo con mayor facilidad que en los puertos anteriores como se muestra en la figura 4.3.

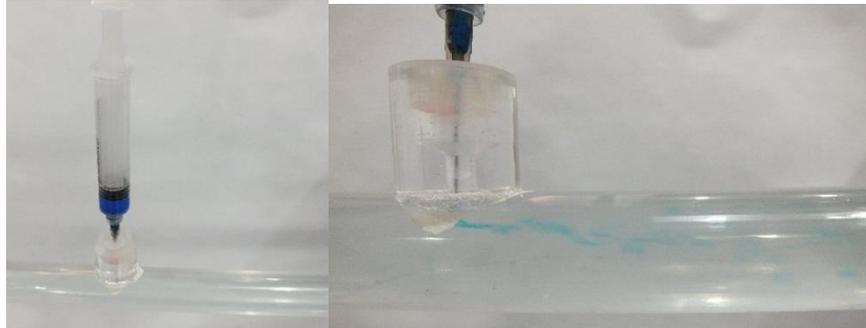


Figura 4.3. Inyección de colorante en el último puerto.

Número de Reynolds para cada régimen de flujo.

- Flujo laminar $Re < 2100$
- Flujo turbulento $Re > 4000$.
- El valor del número de Reynolds aceptado para el régimen transitorio es $Re \approx 2300$ [3].

4.2 CAUDAL.

El caudal que se registró en la bomba se presenta en la tabla 4.1. Por trabajar bajo las mismas condiciones en la placa de orificio y en el tubo de Venturi, la velocidad calculada V_{1exp} es la misma velocidad de entrada en ambas ramificaciones.

La entrada en las ramificaciones es tubo de acrílico con diámetro interior de 19.05 [mm] ($\frac{3}{4}$ [in])

Despejando a V_1 en la ecuación 1.11:

$$V_1 = \frac{Q_1}{A_1} = \frac{0.000142 \left[\frac{m^3}{s} \right]}{0.000285024 \left[m^2 \right]} = 0.4982 \left[\frac{m}{s} \right]$$

Variac	$Q_1 \left[\frac{\text{cm}^3}{\text{s}} \right]$	$Q_1 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right]$	$V_{1\text{exp}} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$
80	142	0.000142	0.4982

Tabla 4.1. Caudal y velocidad de entrada.

Nota: Con la escala del variac en un valor de 100, la bomba centrífuga trabaja a la mitad de su capacidad

4.3 PLACA DE ORIFICIO.

4.3.1 Pérdida de presión.

Con ayuda del transductor PX409-USBH se obtuvieron las gráficas en cada punto de registro de presión, donde P_1 es la presión en la entrada de la placa y P_2 es la presión en la salida.

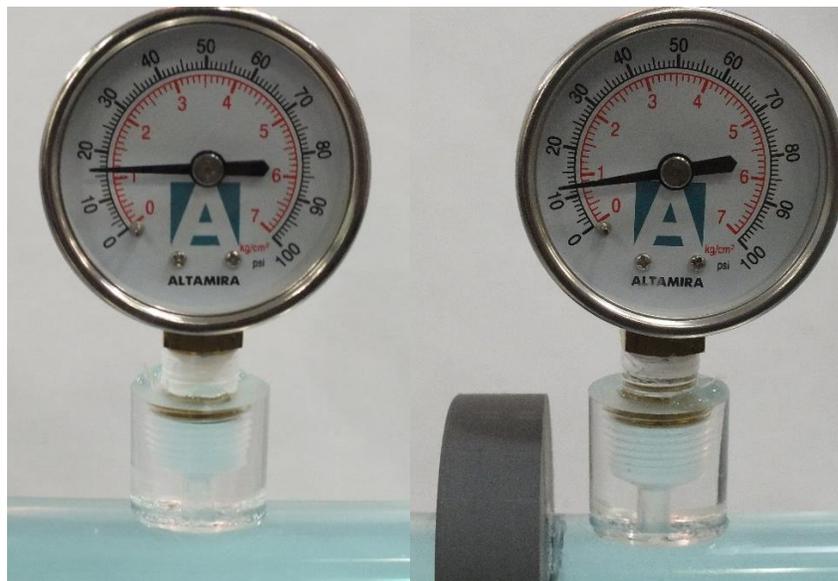


Figura 4.4. Medida de P_1 y P_2 con los manómetros.

En la siguiente gráfica se muestra el monitoreo de la presión en un tiempo determinado. Los valores registrados de P_1 tienden a ser constantes por que el flujo circula por una sección de tubo constante, sin embargo, después de la placa, se observa una caída de presión con valores más dispersos, dado que existe una contracción súbita seguida de una expansión repentina.

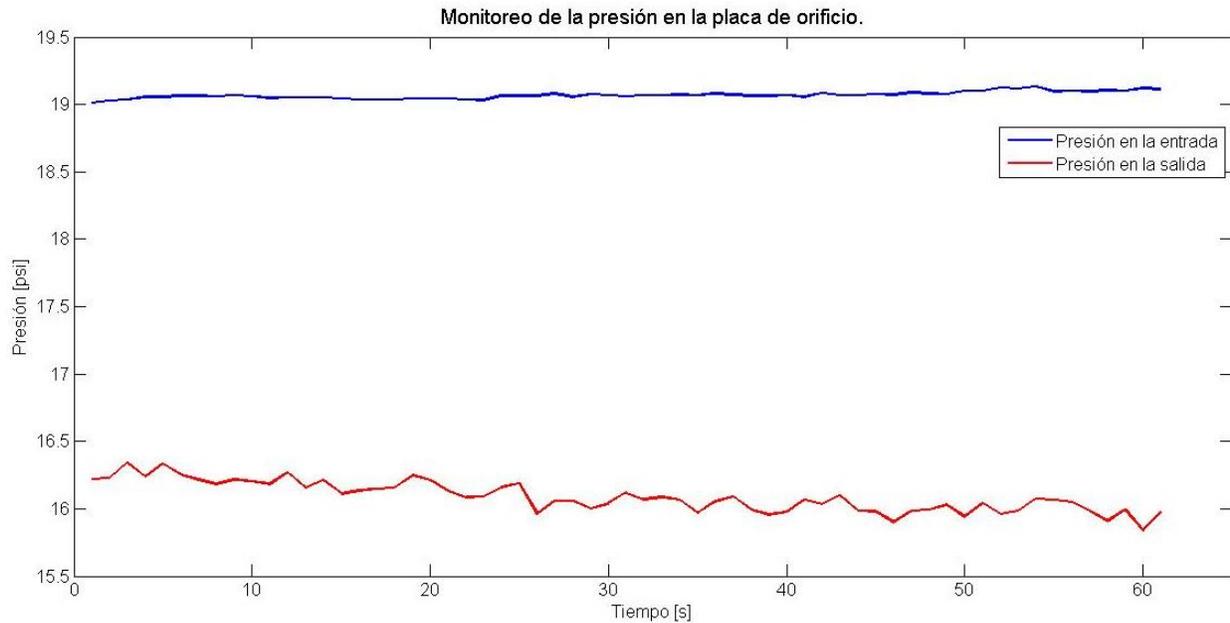


Figura 4.5. Comportamiento del fluido a través de la placa de orificio.

En la siguiente tabla se comparan los valores de la presión obtenidos con los manómetros presentados en la figura anterior y con el transductor. Dado que el sensor puede registrar un mayor número de datos se obtuvo un promedio de todos los valores.

Instrumento	P₁ [psi]	P₂ [psi]
Manómetro	19	16
Transductor	19.0695	16.0868

Tabla 4.2. Valores de la presión registrados.

Cabe mencionar, que la pérdida de presión en la placa de orificio depende del diámetro y de la posición de los manómetros en la entrada y salida del dispositivo, por lo que la presión registrada experimentalmente puede variar ligeramente.

4.3.2 Cálculo de la velocidad.

Basándonos en el análisis y las ecuaciones del primer capítulo, la ecuación de Bernoulli se reduce de la siguiente manera (ecuación 1.40):

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho V_2^2}{2} \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]$$

Despejando a V_2 :

$$\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho} = V_2^2 \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]; \quad V_2^2 = \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]}$$

$$V_{2\text{ideal}} = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]}} \quad (4.1)$$

Con la ecuación 4.1 obtenemos un valor teórico de la velocidad, quiere decir que se considera un flujo ideal en el que se desprecia la fricción y viscosidad del fluido, no obstante, ningún sistema funciona bajo condiciones ideales, por lo que hay que tomar en cuenta las pérdidas por fricción.

Para obtener el valor real de la velocidad se debe calcular el coeficiente de descarga, por lo que la ecuación 4.1 resulta de la siguiente manera:

$$V_2 = C_d \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]}} \quad (4.2)$$

El coeficiente de descarga se determina con la siguiente grafica.

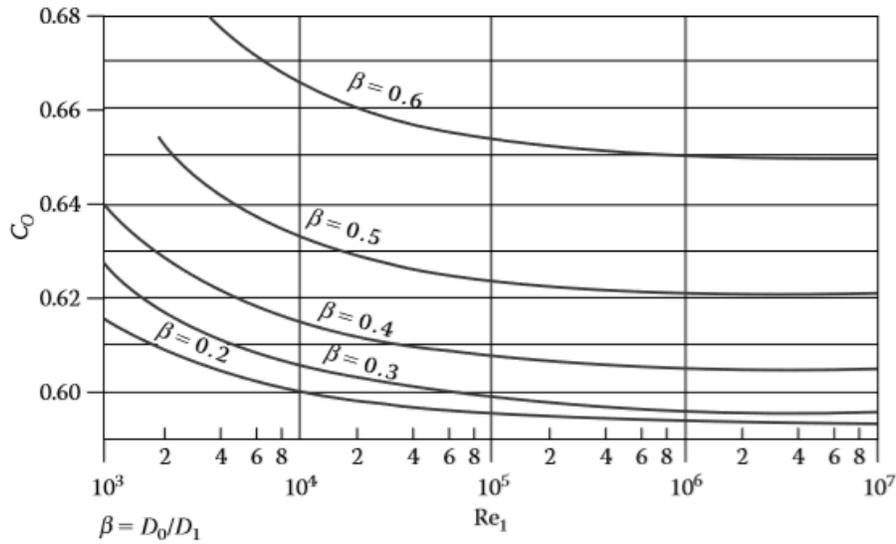


Figura 4.6. Coeficiente de descarga para placas de orificio concéntricas [1].

Datos

$$d_1 = 1.905 \times 10^{-3} [\text{m}]$$

$$d_2 = 9 \times 10^{-3} [\text{m}]$$

$$A_1 = \frac{\pi}{4} d^2 = 0.000285024 [\text{m}^2]$$

$$A_2 = 6.3617 \times 10^{-5} [\text{m}^2]$$

$$\rho = 1000 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

$$P_1 - P_2 = (19.0695 - 16.0868) = 2.9827 [\text{psi}] = 20564.9926 [\text{Pa}]$$

Para calcular el coeficiente de descarga:

$$Re_1 = \frac{\rho D_1 V_1}{\mu} = \frac{(1000 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]) (19.05 \times 10^{-3} [\text{m}]) (0.4982 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right])}{1.003 \times 10^{-3} [\text{Pa}]}$$

$$Re_1 = 9462.405$$

Con Re y la relación de diámetros en la gráfica anterior, se obtiene: $C_d = 0.63$

Sustituyendo valores en 4.1

$$V_2 = \sqrt{\frac{2(20564.9926[\text{Pa}])}{(1000 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]) \left[1 - \left(\frac{6.3617 \times 10^{-5} [\text{m}^2]}{0.000285024 [\text{m}^2]}\right)^2\right]}}$$

$$V_{2\text{teo}} = 6.579 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]$$

Ahora en la ecuación 4.2:

$$V_{2\text{exp}} = (0.63) \left(6.579 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]\right); \quad \mathbf{V_{2\text{exp}} = 4.145 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]}$$

Despejando la velocidad de entrada de la ecuación 1.11 queda de la siguiente manera:

$$V_{1\text{teo}} = \frac{A_2 V_2}{A_1} \tag{4.2}$$

Sustituyendo valores:

$$V_{1\text{teo}} = \frac{A_2 V_2}{A_1} = \frac{(6.3617 \times 10^{-5} [\text{m}^2]) (4.145 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right])}{0.000285024 [\text{m}^2]}$$

$$\mathbf{V_{1\text{teo}} = 0.9252 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}}\right]}$$

4.4 TUBO DE VENTURI.

4.4.1 Pérdida de presión.

De la misma manera, en el tubo de Venturi se utilizó el transductor PX409-USBH como se muestra en la figura 4.7 para obtener gráficas en cada punto de registro de presión, donde P_1 es la presión en la entrada del dispositivo, P_2 es la presión en la garganta y P_3 la presión en la salida para observar la recuperación de carga.

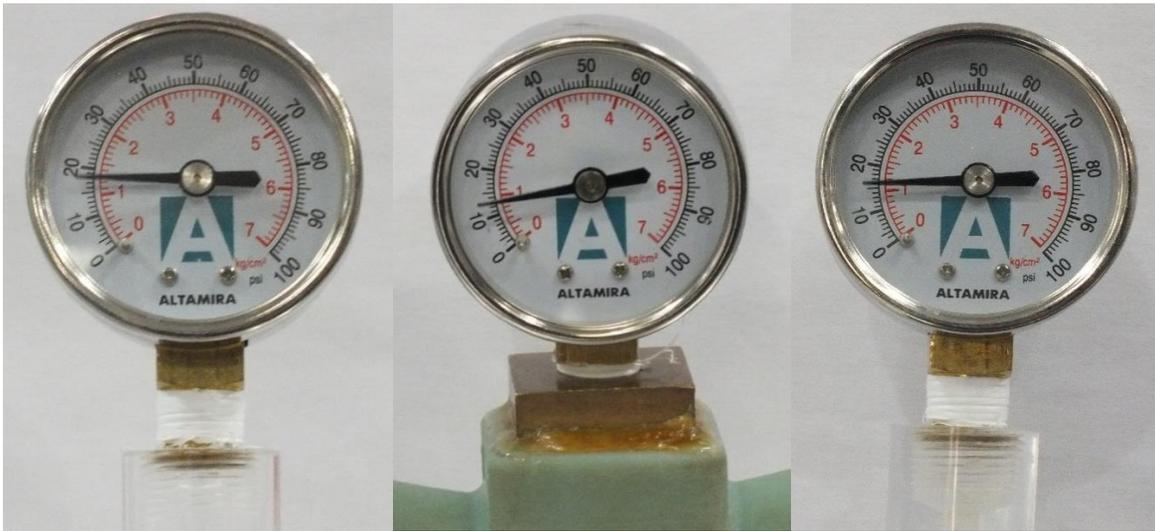


Figura 4.7. Medida de P_1 , P_2 y P_3 con los manómetros.

En la siguiente gráfica se presentan los valores registrados en cada punto de medición. Los valores en la entrada y salida del dispositivo tienden a ser constantes, mientras que en la garganta presentan ligeras variaciones que se deben a la reducción de área por donde circula el flujo.

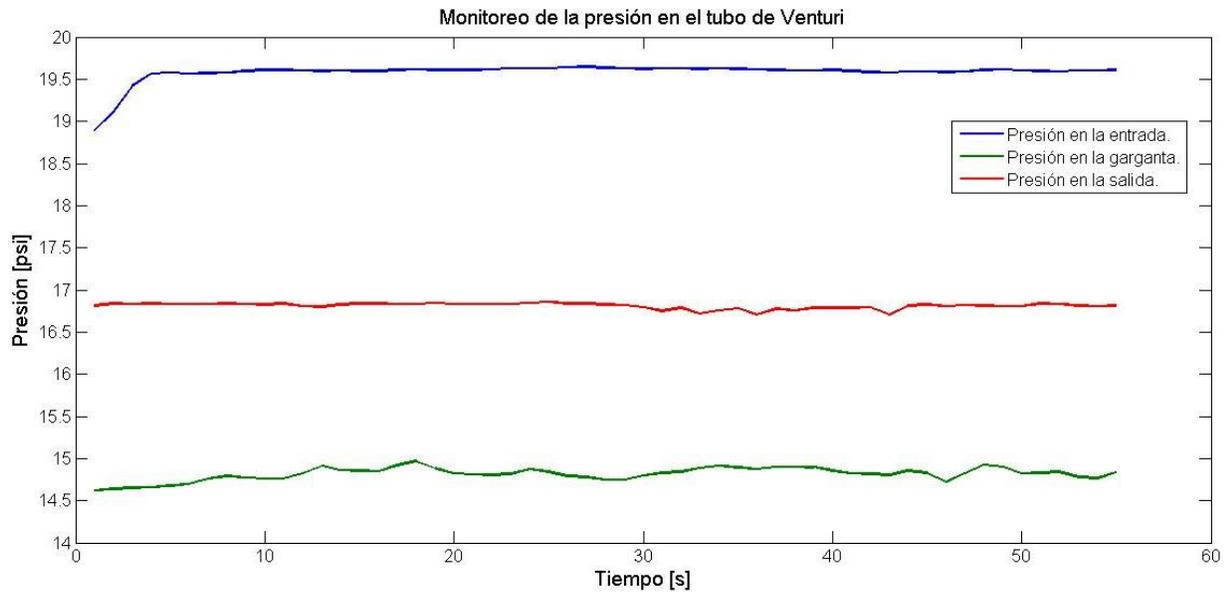


Figura 4.8. Comportamiento del fluido a través del tubo de Venturi.

En la siguiente tabla se comparan los valores de la presión obtenidos con los manómetros presentados en la figura anterior y con el transductor PX409-USBH

Instrumento	P₁ [psi]	P₂ [psi]	P₃ [psi]
Manómetro	19	14	16
Transductor	19.594	14.857	16.81

Tabla 4.3. Valores de la presión registrados.

4.4.2 Cálculo de la velocidad.

Con los datos que se registraron en las pruebas de velocidad de la bomba y por medio del análisis realizado en el primer capítulo, es posible determinar las velocidades en el tubo de Venturi.

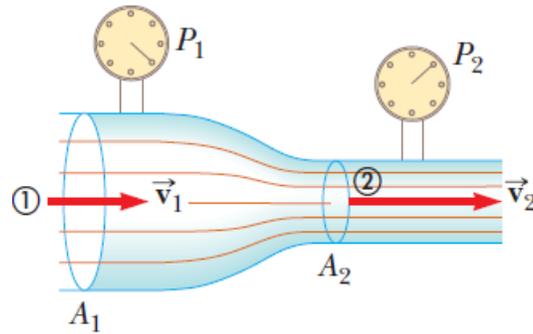


Figura 4.9. Esquema del tubo de Venturi.

El análisis en el tubo de Venturi es el mismo que el de la placa de orificio, ya que tienen el mismo principio de funcionamiento

Datos

$$d_1 = 1.905 \times 10^{-3} [\text{m}]$$

$$d_2 = 5 \times 10^{-3} [\text{m}]$$

$$P_1 - P_2 = (19.594 - 14.857) = 4.737 [\text{psi}] = 32663.223 [\text{Pa}]$$

$$A_1 = \frac{\pi}{4} d^2 = 0.000285024 [\text{m}^2]$$

$$A_2 = 1.9635 \times 10^{-5} [\text{m}^2]$$

$$\rho = 1000 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

Sustituyendo valores en 4.1

$$V_{2\text{teo}} = \sqrt{\frac{2(32663.223 [\text{Pa}])}{(1000 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]) \left[1 - \left(\frac{1.49713 \times 10^{-5} [\text{m}^2]}{0.000285024 [\text{m}^2]} \right)^2 \right]}}$$

$$V_{2\text{teo}} = 8.1017 \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Dado que el diseño del tubo de Venturi reduce la pérdida de presión permanente existen valores publicados dependiendo de su diseño. De acuerdo con la referencia [10] se obtiene que:

$$C_d = 0.995$$

$$V_{2exp} = \left(8.1017 \left[\frac{m}{s}\right]\right) (0.995)$$

$$V_{2exp} = 8.0612 \left[\frac{m}{s}\right]$$

Para obtener la velocidad en la entrada con la ecuación 4.2:

$$V_{1teo} = \frac{A_2 V_2}{A_1} = \frac{(1.9635 \times 10^{-5} [m^2]) (7.875 \left[\frac{m}{s}\right])}{0.000285024 [m^2]}$$

$$V_{1teo} = 0.5553 \left[\frac{m}{s}\right]$$

4.5 COMPARACIÓN DE RESULTADOS.

4.5.1 Pérdida de presión.

En la siguiente tabla se comparan los valores registrados de la presión en la entrada y en la contracción de los medidores de flujo, mismos que se representan en la gráfica 4.10 para observar de manera más clara la diferencia entre ambos dispositivos.

Teóricamente se espera que la placa genere mayor pérdida de presión, sin embargo, se deben considerar los parámetros de diseño descritos en el segundo capítulo, ya que la relación de diámetros es diferente en cada dispositivo. En este caso, la mayor pérdida de presión se registra con el tubo de Venturi, debido a que son diferentes condiciones.

Dispositivo	P_1 [psi]	P_2 [psi]	P_3 [psi]
Placa	19.0695	16.0868	-
Venturi	19.594	14.857	16.81

Tabla 4.4. Comparación de la presión.

Para obtener las gráficas de la pérdida de presión, se tomó en cuenta la posición de los manómetros para la escala de la gráfica, en la cual el cero es representado por la posición del manómetro en la entrada de los medidores de flujo.

En la figura 4.11 se muestra la gráfica de presión en el tubo de Venturi, donde se observa la caída de presión en la garganta y posteriormente, la recuperación de carga a una distancia de la salida del dispositivo, mientras que en la placa (figura 4.10) se observa la caída de presión después del orificio.

Es importante mencionar que en la teoría las gráficas de presión no son lineales, en este caso, la presión que se registró con el transductor PX409-USBH es puntual, significa que registra la variación de la presión con el tiempo en un punto seleccionado. Si se desea obtener una curva más suave, es necesario medir la presión a lo largo de los dispositivos.

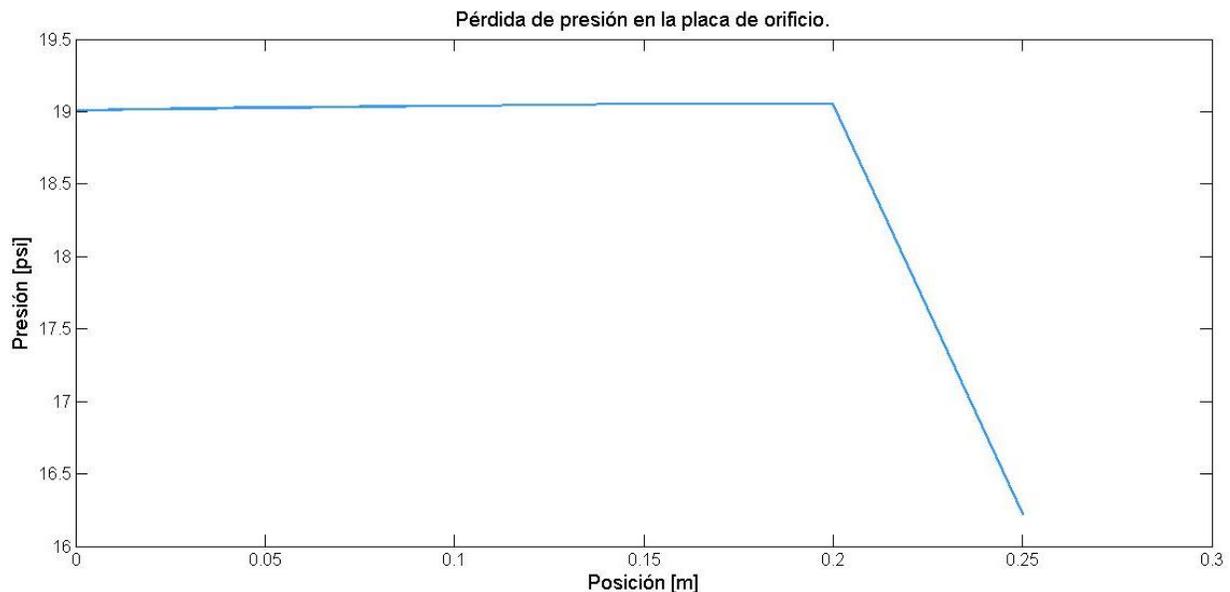


Figura 4.10. Caída de presión en la placa de orificio.

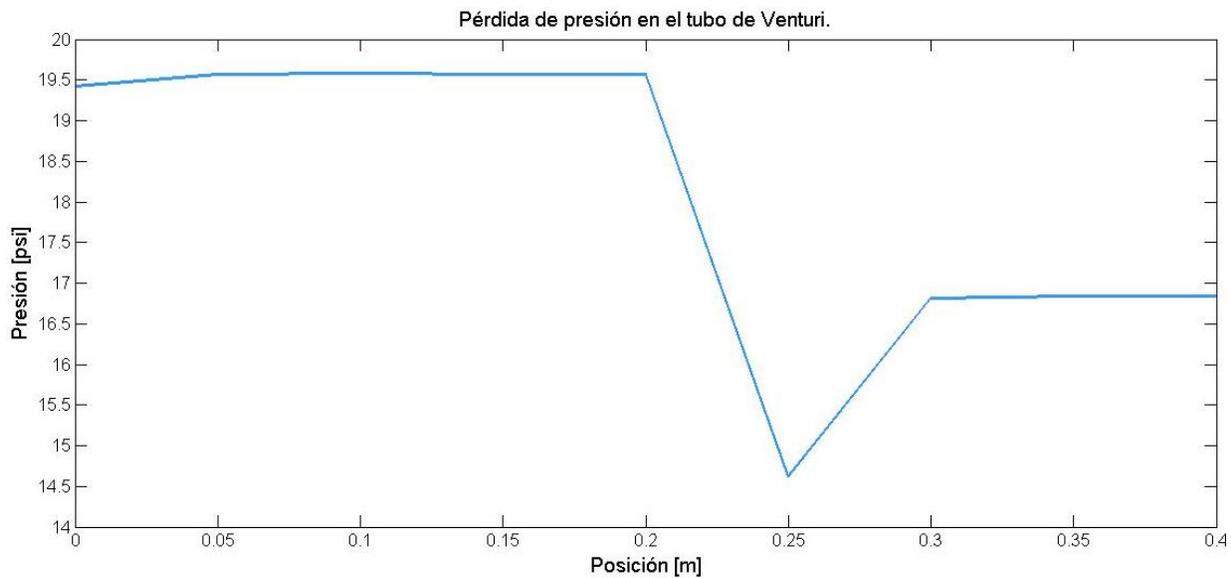


Figura 4.11. Caída de presión en el tubo de Venturi.

4.5.1.1 Presión en Ansys Fluent.

Se realizó una simulación para observar la pérdida de carga que se genera en ambos dispositivos.

Se consideró los mismos parámetros de diseño y condiciones de trabajo del equipo, como la geometría de los medidores de flujo, el tamaño de la tubería, la presión registrada, el fluido de trabajo, entre otras cosas.

A continuación se presenta el análisis en la placa de orificio en donde se produce una mayor pérdida de presión permanente, es decir, la presión no se recupera por completo después de la contracción súbita debido a la turbulencia que se genera aguas abajo, mientras que la geometría del tubo de Venturi evita que se presenten vórtices y la recuperación de carga es considerablemente mayor. Esto se puede verificar con las figuras 4.12 y 4.13, donde se observa la curva de la caída de presión repentina en la placa de orificio y la caída gradual en el tubo de Venturi.

De acuerdo con la escala de colores, en la figura se observa que en la garganta del venturi se alcanzan menores presiones que en la vena contracta de la placa, esto es por que el diámetro del tubo de venturi es menor y al tener una relación de diámetros pequeña se produce una mayor caída de presión.

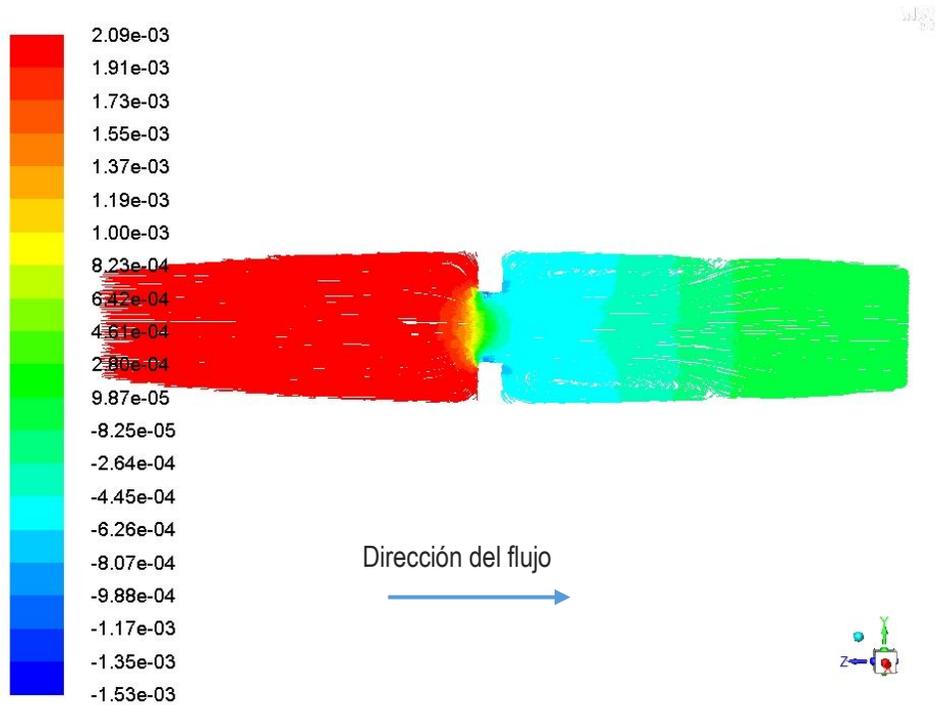


Figura 4.12. Distribución de presión en la placa de orificio

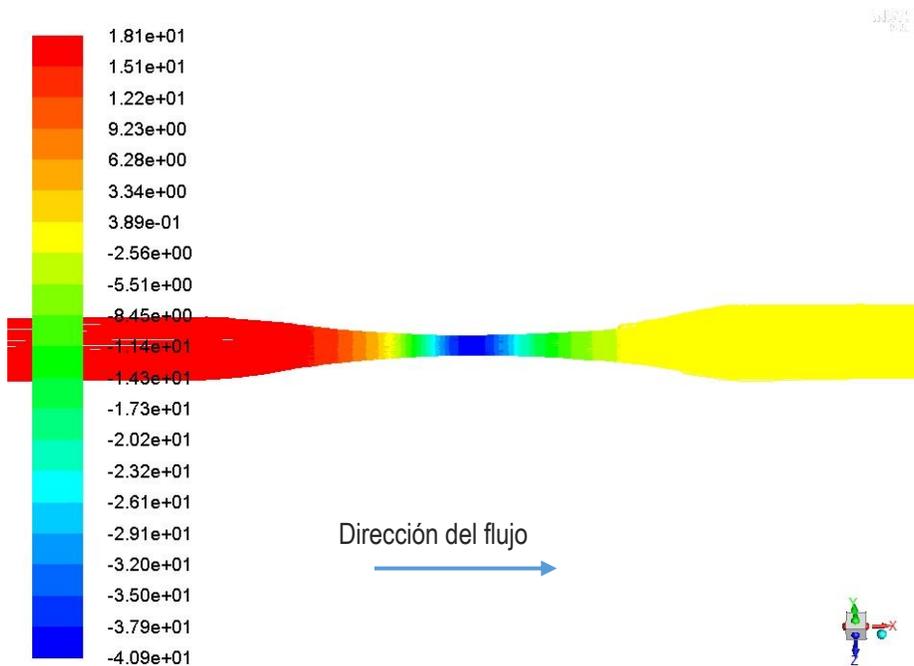


Figura 4.13. Distribución de presión en el tubo de Venturi.

plane-9

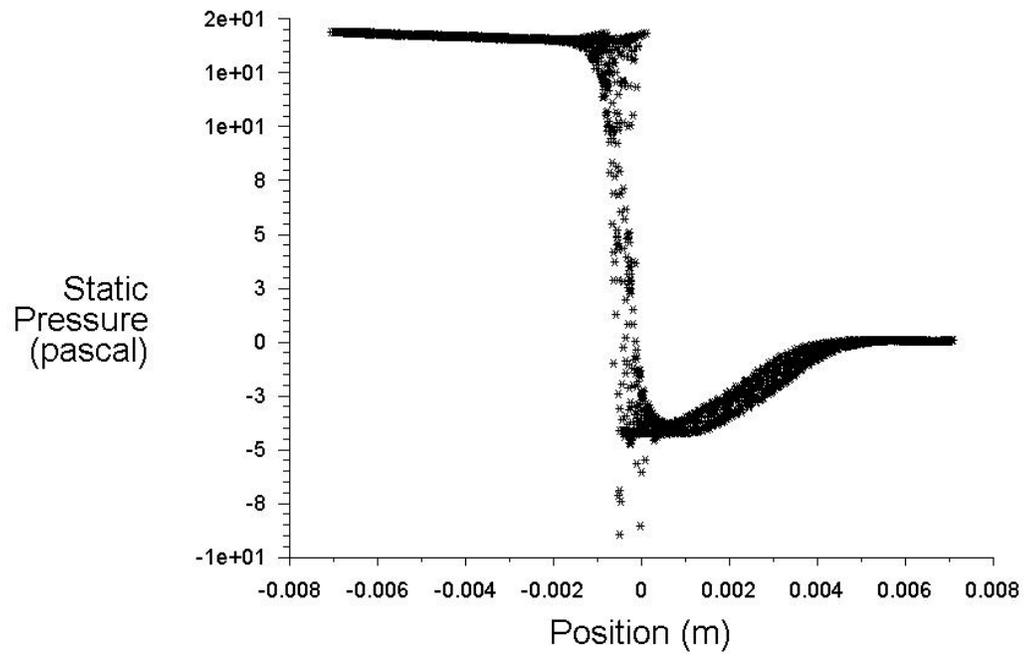


Figura 4.14. Grafica de presión de la placa con Ansys Fluent.

interior-venturi

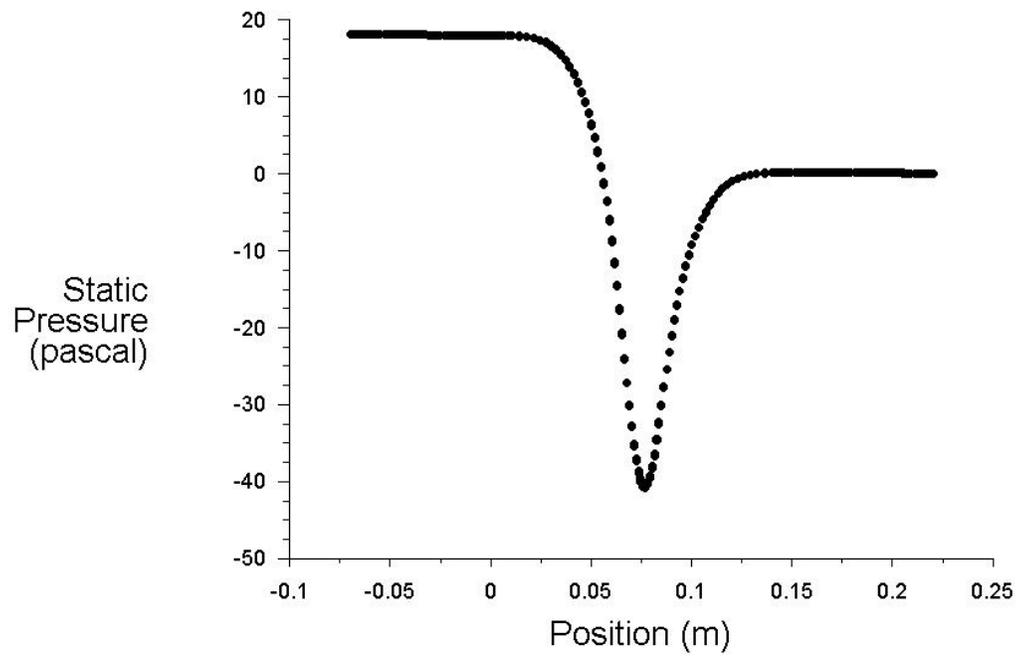


Figura 4.15. Gráfica de presión del tubo de Venturi con Ansys Fluent.

4.5.2 Velocidad en Ansys Fluent.

Se realizó una simulación para visualizar el comportamiento del flujo a través de los medidores de la placa de orificio y tubo Venturi para conocer la velocidad de entrada y salida

En las figuras se representan las líneas de corriente a través de los dispositivos. La escala de colores mostrada se refiere a la magnitud de la velocidad y se observa el efecto Venturi, es decir, que al reducir el área por la cual circula el flujo se produce un aumento en la velocidad y disminuye la presión como se observa en las figuras 4.16 y 4.17.

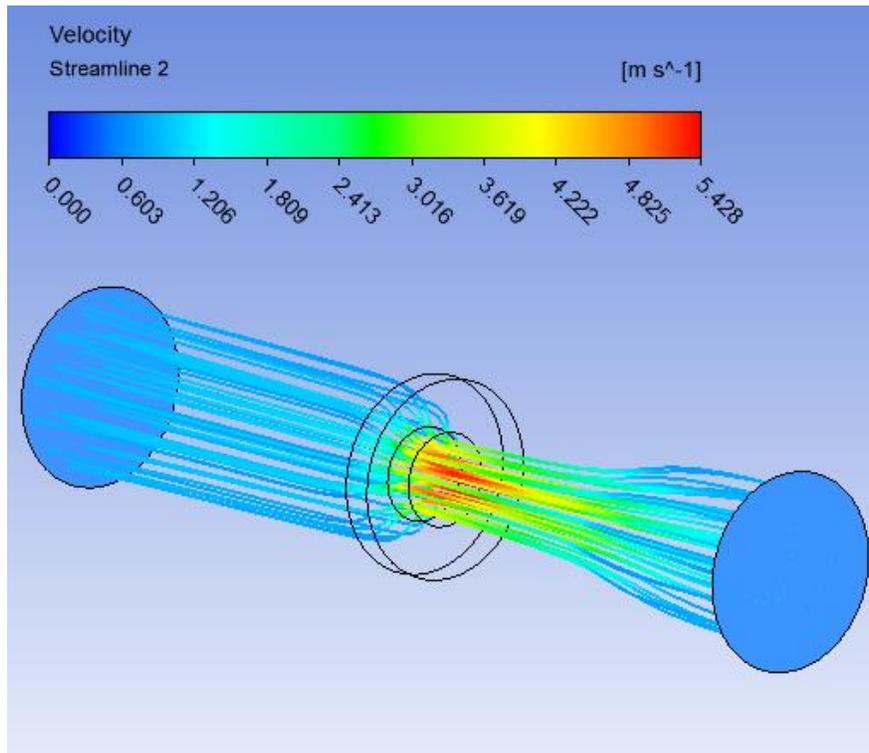


Figura 4.16. Líneas de corriente en la placa de orificio.

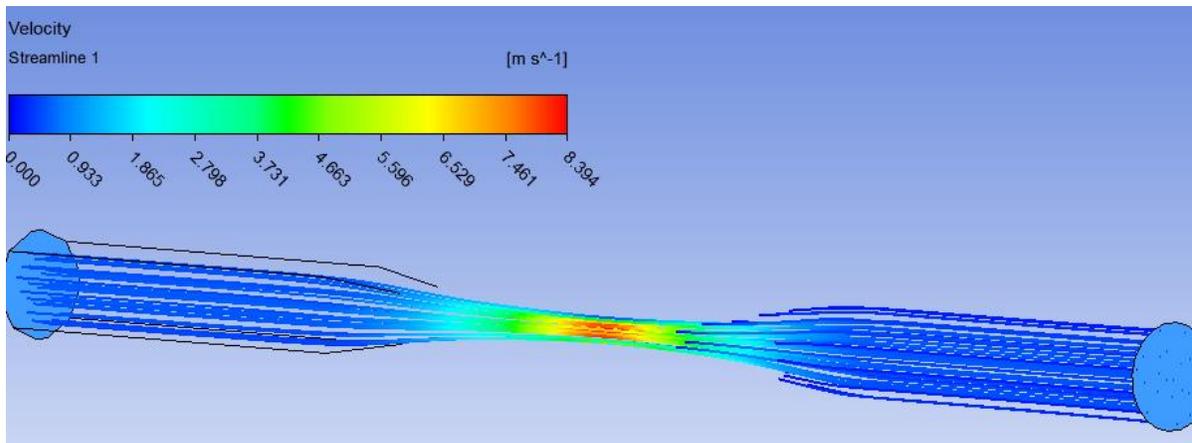


Figura 4.17. Líneas de corriente en el tubo de Venturi.

En la tabla se compara el resultado experimental, que resulta del cálculo con las mediciones representadas en la tabla 4.1 (V_{1exp}), el valor teórico (V_{1teo}), que se obtiene aplicando el principio de Bernoulli en la placa de orificio y finalmente, el resultado de la simulación de flujo bajo las condiciones de operación descritas anteriormente (V_{1sim} y V_{2sim}) y la velocidad de salida (V_{2real}) tomando en cuenta el coeficiente de descarga.

La variación en el valor teórico en la placa de orificio se debe a que el coeficiente de descarga depende de la diferencia de presión y está directamente relacionado con la posición de las tomas de presión.

Dispositivo	$V_{1exp} \left[\frac{m}{s} \right]$	$V_{1teo} \left[\frac{m}{s} \right]$	$V_{1sim} \left[\frac{m}{s} \right]$	$V_{2exp} \left[\frac{m}{s} \right]$	$V_{2sim} \left[\frac{m}{s} \right]$	C_d
Placa de orificio	0.4982	0.9252	0.603	4.144	4.22	0.63
Tubo de Venturi	0.4982	0.5553	0.55	8.06119	8.33	0.995

Tabla 4.5. Resultados de la velocidad.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se llevó a cabo el diseño, fabricación y pruebas de un equipo hidráulico que permite la visualización y comprensión de algunos fenómenos físicos de la Termodinámica y Mecánica de Fluidos, el cual podrá ser utilizado en el laboratorio de termodinámica junto con la práctica que se propone.

Cabe destacar, que todo el proceso de diseño está fuertemente vinculado con las pruebas en el equipo, ya que en esta sección se debe contemplar las posibles dificultades que se presentarán más adelante en la realización de los experimentos, de lo contrario se refleja de manera negativa en el tiempo invertido y el costo de fabricación.

Con los resultados obtenidos se puede concluir:

- La primera ramificación permite la visualización de las líneas de flujo y la transición del mismo a través de la tubería de sección constante, para esto se requiere que la bomba trabaje a su mínima velocidad.
- En los medidores de flujo se comprueba de manera visual y analítica los conceptos aprendidos en clase. En la palca de orificio se verifica que la pérdida de presión está determinada por su diseño y geometría; si se desea obtener mejores resultados y registrar una mayor pérdida de carga y en consecuencia la máxima velocidad, es necesario que la toma de presión aguas abajo sea lo más cercana al orificio de la placa.
- En el tubo de Venturi se comprueba la recuperación de carga que éste genera, sin embargo, la distancia a la que se colocó la tercera toma de presión no es suficiente para ilustrar este concepto, por lo tanto se recomienda que la instalación del último manómetro se coloque al final de la segunda ramificación.
- Las gráficas obtenidas experimentalmente concuerdan con las
- Es posible trabajar a condiciones similares a los equipos utilizados en el laboratorio de termodinámica con ayuda de una válvula de compuerta instalada en la salida de las ramificaciones, con esto se aumenta la presión en el circuito hidráulico, evitando la entrada de aire al sistema.
- El control de las válvulas con Arduino permite la realización de una práctica a la vez para obtener las condiciones de operación calculadas en este trabajo.

Por las razones anteriores, se puede concluir que el equipo satisface las necesidades especificadas en el segundo capítulo; fácil transporte e instalación, es posible realizar por lo menos tres prácticas diferentes en el mismo, al presentar un diseño sencillo y funcional brinda una experimentación efectiva y didáctica a los estudiantes. Finalmente, al utilizar materiales y piezas comerciales de precio accesible, se reduce considerablemente el costo de fabricación del equipo en comparación a equipos didácticos que existen en el mercado.

TRABAJO A FUTURO.

Al cabo de este trabajo se identificaron posibles mejoras que se le pueden hacer al equipo hidráulico con el fin de aprovechar su diseño y versatilidad.

Se propone una práctica del Número de Reynolds en la ramificación de visualización en la que se pueda variar y observar el régimen laminar, transitorio y turbulento del flujo.

Para comprender la relación de la geometría de la placa de orificio con la pérdida de presión, se propone utilizar diferentes tipos de placa y diferente diámetro de tubería. De manera que se pueda acoplar a la instalación del equipo sin necesidad de afectar su diseño. Esto permitirá la creación de una práctica más completa.

Se pretende mejorar el control de las válvulas con el uso de un controlador lógico programable con la finalidad de facilitar la instalación del control en el equipo.

REFERENCIAS.

- [1] Janna, William S. (2010). Introduction to fluid mechanics. United States: CRC Press
- [2] Philip J. Pritchard (2011). Fox and MacDonald's Introduction to Fluid Mechanics. John Wiley & Sons, Inc.
- [3] Frank M. White. (2004). Mecánica de Fluidos. McGraw-Hill
- [4] Josep M. Bergadà Grañó (2012). Mecánica de Fluidos. Breve introducción con problemas resueltos. UPCGRAU
- [5] Bruce, R.M, Donald, F.Y. & Theodore. H. O. (1999). Fundamentos de Mecánica de fluidos. Limusa SA.
- [6] Mott, R.L. (2006). Mecánica de fluidos. Pearson Educación.
- [7] María I. Cotignola, Clelia Bordogna, Graciela Punte, Osvaldo M. Cappannini. (2002). Difficulties in Learning Thermodynamic Concepts: Are they Linked to the Historical Development of this Field? Science & Education 11: 279-291 2002
- [8] G, Lipták. B. (2003). Instrument Engineers' Handbook Volume One: Process Measurement and Analysis. CSC Press.
- [9] P.Holman, Jack. (1992). Métodos experimentales para ingenieros. McGraw-Hill.
- [10] Crane Co. Flow of fluids through valves, fittings and pipe. Technical paper No. 410 by the Engineering Department.

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS.

[11] Islam, Shariful. Measurement and Industrial Instrumentation: Measurement Flow Rate. Recuperado el 20-Marzo-2019

<http://www.kuet.ac.bd/webportal/ppmv2/uploads/15408696897.Measurment%20of%20flow%20rate.pdf>

[12] Types of Orifice Plates - Advantages and Disadvantages (Concentric, Eccentric, Segmental, Quadrant Edge). Recuperado el 20-Marzo-2019

<https://www.mecholic.com/2016/11/types-of-orifice-plates-advantages-and-disadvantages.html>

ANEXO I

PROGRAMA Y PLANOS DEL EQUIPO.

Código del control de las válvulas en Arduino Uno.

```
#include <avr/io.h>

void setup() {
  Serial.begin(9600);

  //Puerto B: Pines digitales del 8-13 ENTRADAS. 13 12 11 10 9 8
  //Puerto D: Pines digitales del 0 al 7 SALIDAS. 7 6 5 4 3 2 1

  DDRB = B11111111; //Determina si los pines son entrada o salida. 1=salida 0=Entrada DDRB
  //sintaxis para llamar el puerto B y D, apagar puerto B

  DDRD= DDRB & B11111100; //declaran 6 salidas que representan las 6 válvulas

  DDRB = DDRB & B11110000; // declaran 4 pines de entrada tres botones y uno de apagado

}

void loop() {

  switch(PINB){//Permite leer el estado de las entradas.
    case 0:
      PORTD=B00000000; //Envía salidas *numero binario*
      break;
    case 1:// Se oprime botón 1
      delay(3000); //tiempo de tres segundos para abrir la válvula
      PORTD=B11000000; //Pines 6 Y 7 HIGH (válvulas 1 y 2 abiertas)
      break;
    case 2://Se oprime botón 2
      delay(3000);
      PORTD=B00110000; //Pines 4 y 5 HIGH (válvulas 3 y 4 abiertas)
      break;
    case 3: //Se oprime botón 1 y 2
```

PORTD=B00000000; // En todos los casos que se aprieten dos botones, en equipo permanecerá apagado

break;

case 4: //Se oprime botón 3

delay(3000);

PORTD=B00001100; //Pines 2 y 3 HIGH (válvulas 5 y 6 abiertas)

break;

case 5://Se oprime botón 1 y 3

PORTD=B00000000;

break;

case 6:// Se oprime boton 3 y 2

PORTD=B00000000;

break;

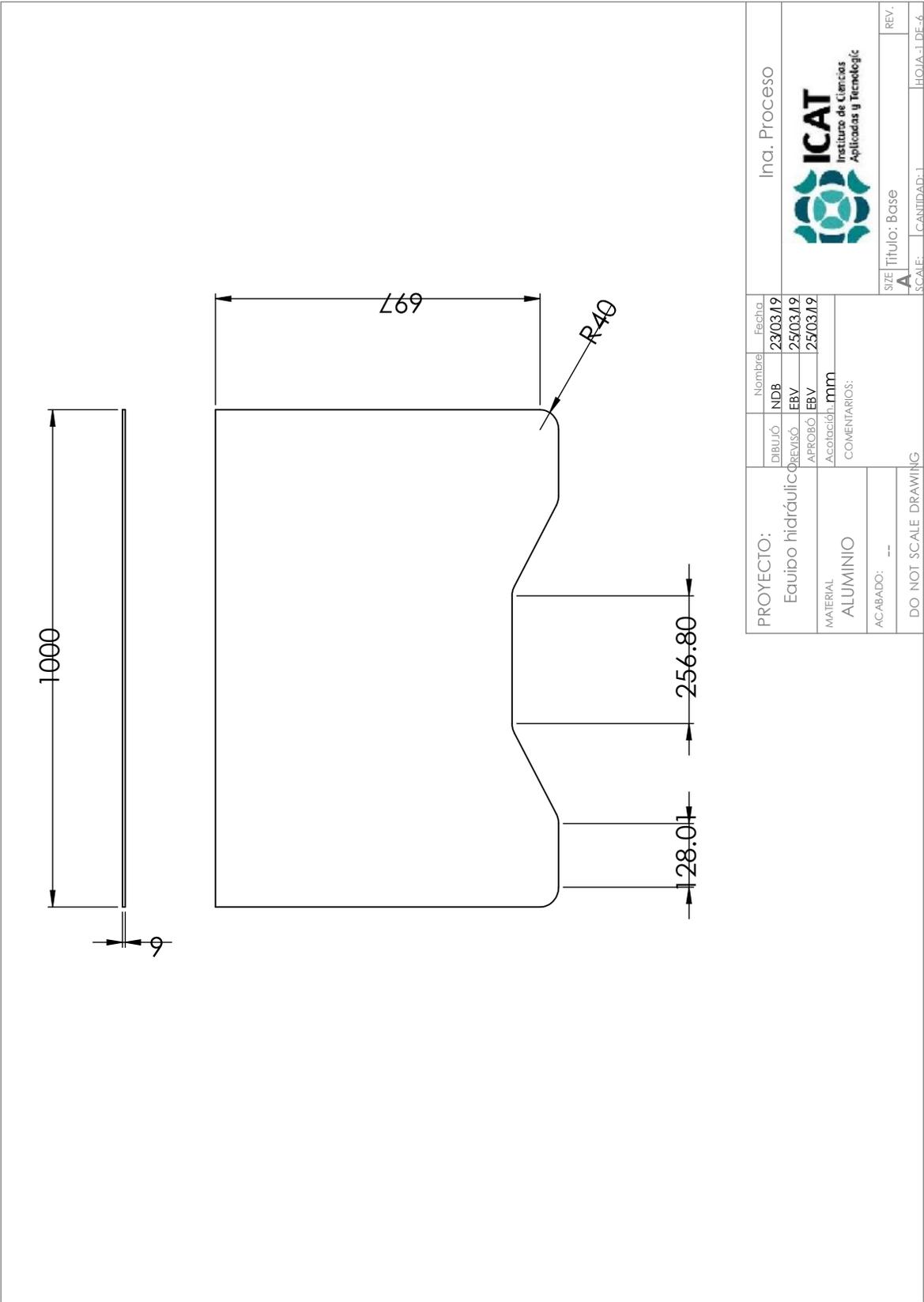
case 7:// Se oprime boton 1,2 y 3

PORTD=B00000000;

break;

}

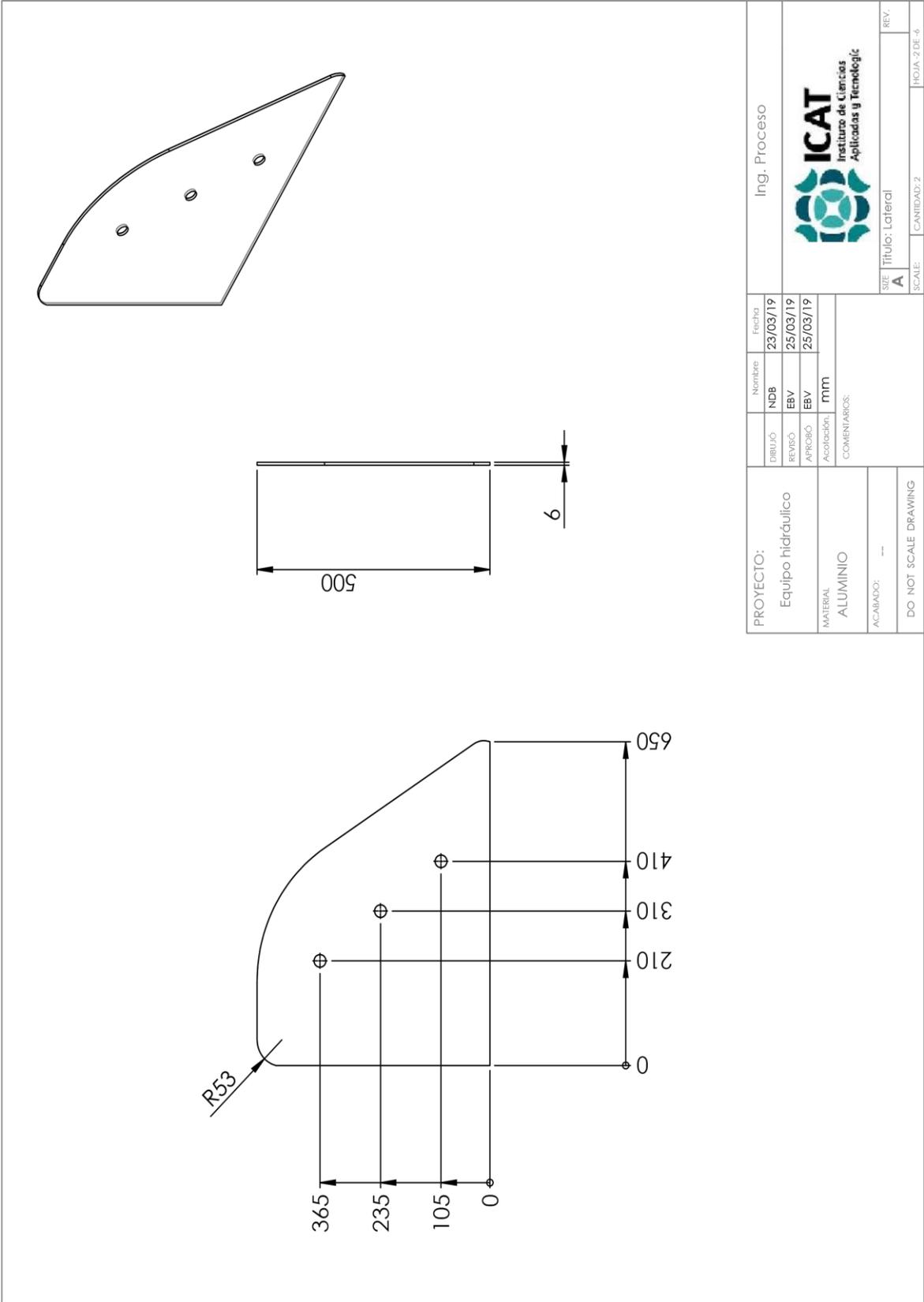
}

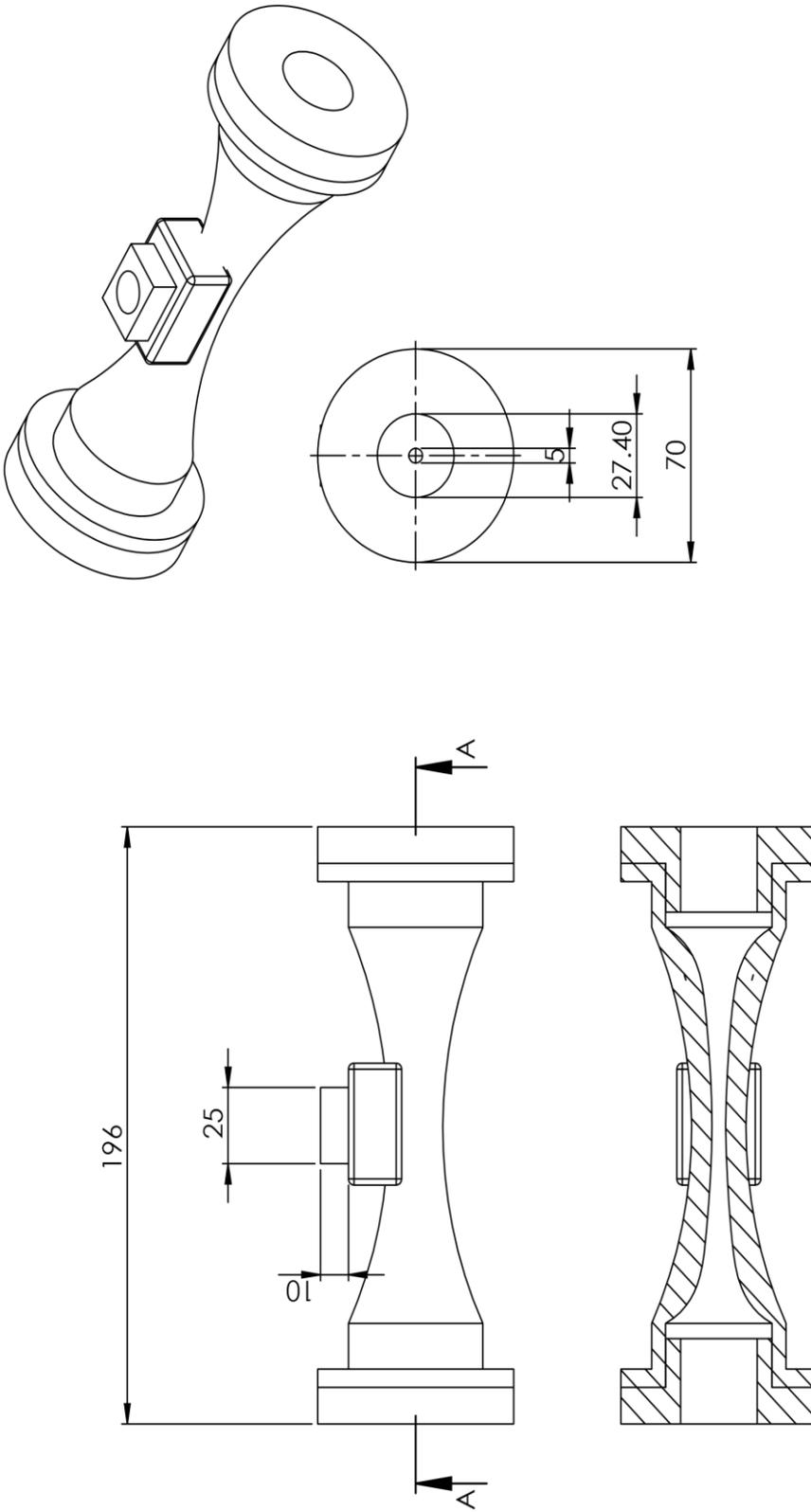


PROYECTO:		Nombre		Fecha	
Equipo hidráulico		NDB		23/03/19	
REVISIÓN		EBV		25/03/19	
APROBACIÓN		EBV		25/03/19	
MATERIAL		Anotación: mm			
ALUMINIO		COMENTARIOS:			
ACABADO: --		SIZE TITULO: BCSG			
DO NOT SCALE DRAWING		SCALE:		CANTIDAD: 1	
				REV. 1	
				HOJA 1 DE 6	



Ina. Proceso

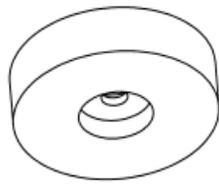
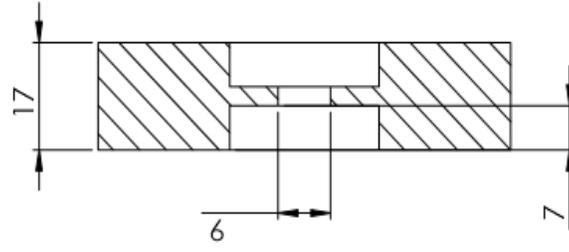
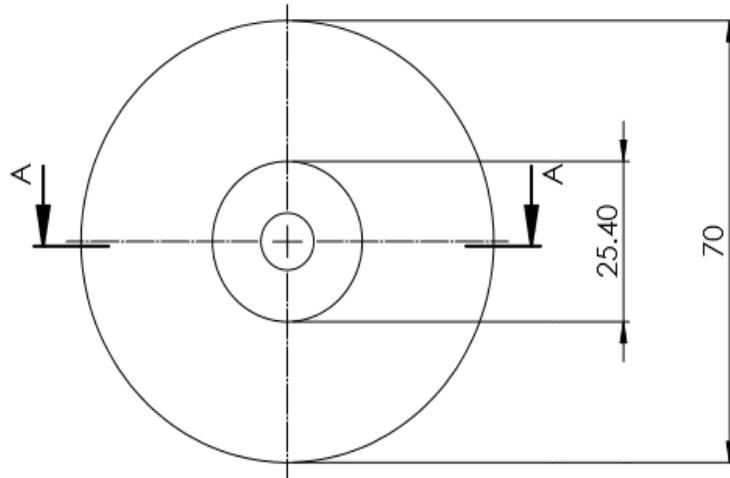




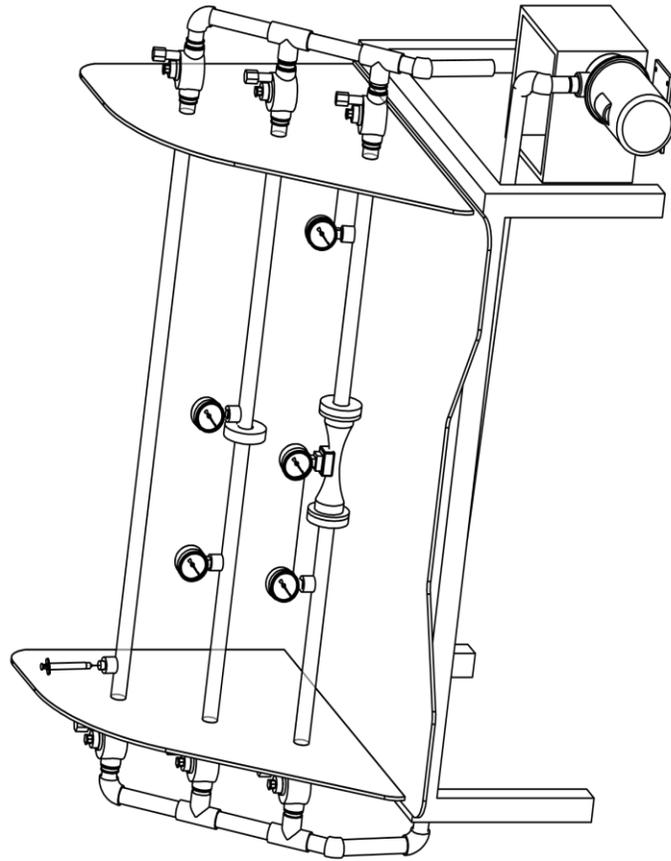
PROYECTO:		Nombre		Fecha	
Equipo hidrúulico		NDB		23/03/19	
MATERIAL		REVISÓ		25/03/09	
PVC		EBV		23/05/19	
ACABADO:		ACABADO:		mm	
---		COMENTARIOS:			
DO NOT SCALE DRAWING		TÍTULO: Tubo de Venturi		REV.	
		CANTIDAD: 1		HOJA 3 DE 6	
		SCALE: A			



Ing. Proceso



PROYECTO:		Ing. Proceso	
Equipo hidráulico		 ICAT Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnológicas	
DIBUJO	Nombre	Fecha	REV.
REVISÓ	NDS	23/13/19	
APROBÓ	EBV	25/05/19	
Acabado:	EBV	25/05/19	
MATERIAL	mm		
PVC	COMENTARIOS:		
ACABADO:			
--			
DO NOT SCALE DRAWING		SIZE	Título: Placa de orificio
		A	
		SCALE:	CANTIDAD: 1
			NOJA-4-DE-4



ITEM NO.	PART NUMBER	DESCRIPTION	QTY.
1	Base	Aluminio	1
2	Lateral	Aluminio	2
3	Placa de orificio	PVC, 9mm	1
4	Tubo de venturi	PVC, 19.6cm	1
5	Tubo corto	4cm	10
6	Válvula		6
7	Sistema de inyección		1
8	Tubo medidores de flujo	53cm	4
9	Manómetro	NPT 1"	5
10	Tubo	106cm	1
11	Conector con rosca	1.25" a 1"	12
12	Soporte	Aluminio	1
13	Tubo	lisa	4
14	Pichancho	1"	1
15	Tanque	Acrílico	1
16	Bomba	1/4 hp	1
17	Codo 45°	1"	3
18	Codo 90°	1"	4
19	Tubo largo	12cm	6
20	Tubo inferior	130cm	1
21	Conector	1"	12
22	Puerto	NPT 1"	5

PROYECTO:		Nombre		Fecha	
Equipo hidráulico		NDB	23/03/19	Ing. Proceso	
MATERIAL		REVISÓ	EBV	ICAT Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnológicas	
ACABADO: --		APROBÓ	EBV	SIZE: A	
DO NOT SCALE DRAWING		Acotación: mm		Título: Equipo Hidráulico	
		COMENTARIOS:		SCALE: CANTIDAD: 1	
				REV. HOJA: 1 DE: 1	

ANEXO II

PRÁCTICA PROPUESTA.



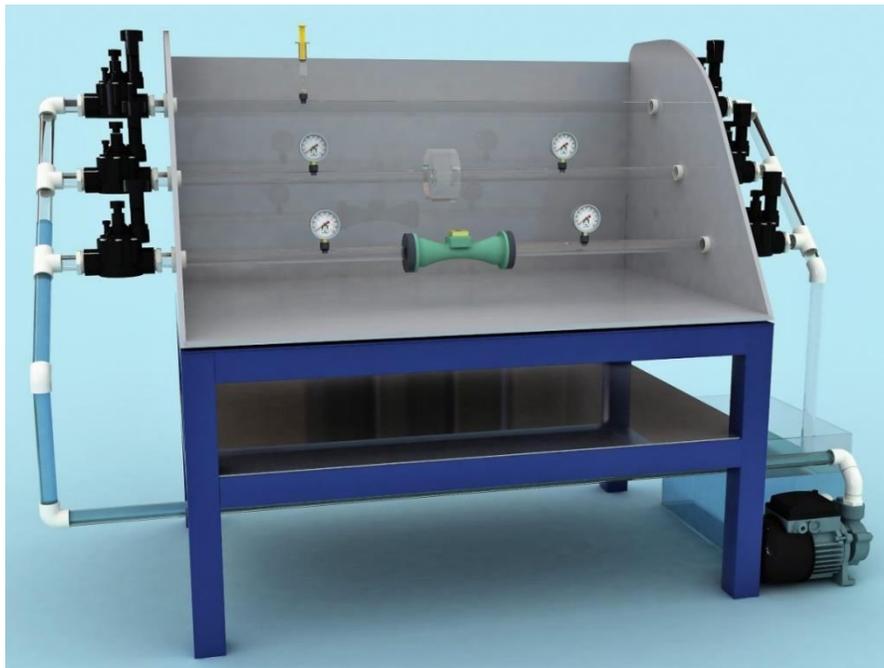
Manual de Prácticas

División de Ciencias Básicas

Área: Laboratorio de Termodinámica

Práctica 1

Tube Venturi





Manual de Prácticas

División de Ciencias Básicas

Área: Laboratorio de Termodinámica

1. Seguridad en la ejecución

Peligro o fuente de energía	Riesgo asociado
Bomba centrífuga	Se puede dañar si no se verifica que la línea de succión tenga fluido suficiente.
Válvula solenoide	Se puede dañar si no se verifica que estén activadas al momento del funcionamiento de la bomba centrífuga

2. Objetivos de aprendizaje

- Comprender el efecto Venturi.
- Aplicar las ecuaciones de la primera ley de la termodinámica y de continuidad para calcular la velocidad de entrada y salida en el tubo de Venturi.
- Calcular el flujo másico que circula por circuito hidráulico.

3. Material y Equipo

Equipo hidráulico para fines didácticos.

Calibrador Vernier.

Flexómetro.



Manual de Prácticas

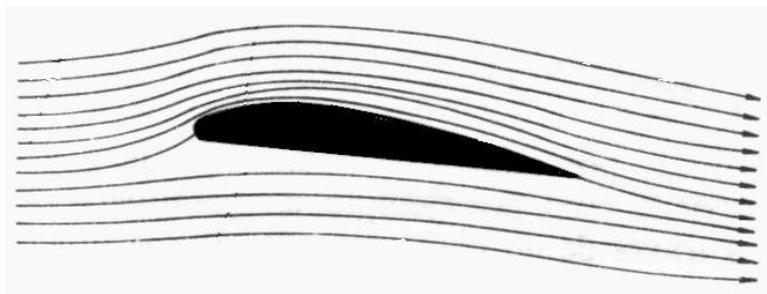
División de Ciencias Básicas

Área: Laboratorio de Termodinámica

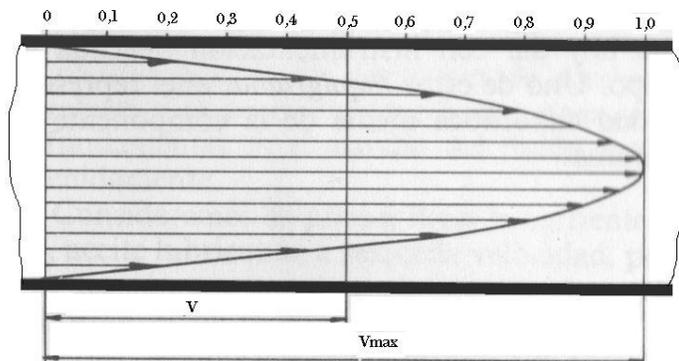
4. Bases Teóricas

Un fluido es una sustancia que se deforma continua y permanentemente con la aplicación de un esfuerzo cortante, no importa qué tan pequeño sea. La incapacidad de los fluidos para resistir los esfuerzos cortantes les da su capacidad ya conocida de cambiar de forma o fluir.

Los fluidos pueden sufrir dos tipos de flujo: flujo laminar, que se caracteriza por un movimiento ordenado del fluido, existiendo líneas de corriente y trayectorias bien definidas; y el flujo turbulento, donde el fluido presenta un movimiento caótico sin que existan líneas de corriente ni trayectorias definidas.



Flujo laminar de un fluido perfecto en torno al perfil de un objeto.



Distribución de velocidades en un tubo con flujo laminar.

	Manual de Prácticas	
División de Ciencias Básicas	Área: Laboratorio de Termodinámica	

Volumen de control

Un sistema abierto o volumen de control, es una región elegida apropiadamente en el espacio. Generalmente encierra un dispositivo que tiene que ver con el flujo másico, como un compresor, bomba, turbina, flujo en tuberías, tobera y difusores, cambiadores de calor, etc.

Tanto la masa como la energía pueden cruzar la frontera de un volumen de control. En general, cualquier región arbitraria en el espacio se puede seleccionar como volumen de control; no hay reglas concretas para esta selección, pero una que sea apropiada hace más fácil el análisis.

Las fronteras de un volumen de control se conocen como superficies de control y pueden ser reales o imaginarias. En el caso del flujo en tuberías, la superficie interna de ésta constituye la parte real de la frontera, mientras que las áreas de entrada y salida forman la parte imaginaria, puesto que en esta sección del volumen de control no hay superficies físicas.

Estado Estable es un proceso en el cual las propiedades en cada punto del volumen de control se mantienen constantes con el tiempo.

Flujo Másico es la cantidad de masa que pasa por una sección transversal por unidad de tiempo se conoce como flujo másico.

$$\dot{m} = \rho AV$$

Dónde:

\dot{m} = Flujo másico.

ρ = Densidad del fluido de trabajo.

A = Sección transversal por donde se desplaza el fluido.

V = Velocidad a la cual se desplaza el fluido.



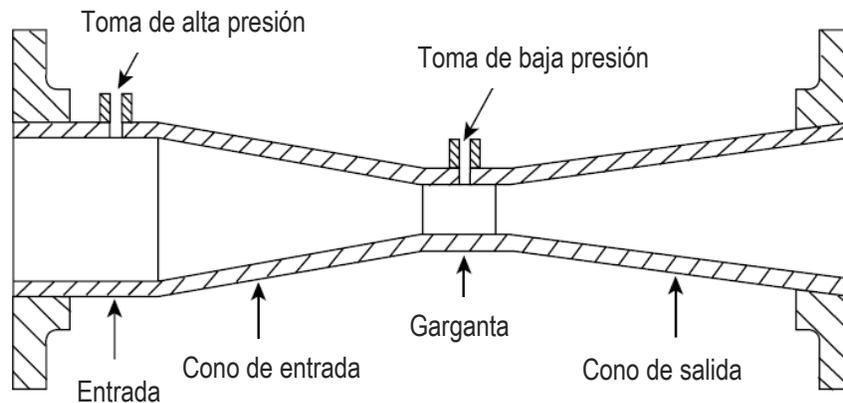
Manual de Prácticas

División de Ciencias Básicas

Área: Laboratorio de Termodinámica

Tubo de Venturi.

El tubo Venturi se compone de tres secciones, la primera de ellas es la sección de entrada que tiene un diámetro inicial igual al diámetro de la tubería, una sección cónica convergente que termina con un diámetro igual al de la garganta; finalmente la salida consiste en una sección cónica divergente que concluye con el diámetro de la tubería.



Tubo de Venturi.

	<h1>Manual de Prácticas</h1>	
División de Ciencias Básicas	Área: Laboratorio de Termodinámica	

5. Desarrollo de actividades.

Actividad 1

Registrar las características estáticas de los instrumentos de medición indicados.

Instrumento	Rango	Resolución	Legibilidad
Manómetro			
Calibrador Vernier			
Flexómetro			

Actividad 2

Conectar la bomba centrífuga a un variador de frecuencia (variac) y girar la perilla al valor de 80.

Actividad 3

Presionar el botón correspondiente al juego de válvulas donde se encuentra colocado el tubo Venturi.

Actividad 4

Encender la bomba centrífuga y esperar dos minutos para que el flujo se estabilice.

	<h1>Manual de Prácticas</h1>	
División de Ciencias Básicas	Área: Laboratorio de Termodinámica	

Actividad 5

Con el calibrador Vernier mida el diámetro de la tubería y la distancia a la que se encuentra colocados los manómetros de entrada y salida del fluido.

Actividad 6

Registre el valor de las presiones a la entrada y salida, así como en la garganta del tubo Venturi, los valores deberán presentarse en el Sistema Internacional de Unidades.

Presión a la entrada $\left[\frac{kg}{cm^2}\right]$	Presión en la garganta $\left[\frac{kg}{cm^2}\right]$	Presión a la salida $\left[\frac{kg}{cm^2}\right]$

Actividad 7

Apagar la boba centrifuga verificando que la línea de succión quede con fluido suficiente para realizar la siguiente práctica.

Actividad 8

Utilizando la primera ley de la termodinámica aplicada a sistemas abiertos, obtenga:

- El gasto másico de agua que fluye por el equipo.
- La velocidad de entrada y salida en los dos medidores de flujo.
- Eficiencia de la bomba centrifuga.

	Manual de Prácticas	
División de Ciencias Básicas	Área: Laboratorio de Termodinámica	

6. Cuestionario

- 1) Escriba la ecuación de la primera ley de la Termodinámica para sistemas abiertos y explique cada uno de sus términos.
- 2) Escriba la ecuación de continuidad y mencione las unidades del gasto másico en el SI.
- 3) ¿Cuál es la diferencia entre una bomba centrífuga y una de desplazamiento positivo?
- 4) A partir de la ecuación de la primera ley de la Termodinámica deduzca la ecuación de Bernoulli.
- 5) ¿A qué se le llama “efecto Bernoulli”?
- 6) Para un sistema abierto, ¿qué es el régimen permanente, el estado estacionario y el flujo unidimensional?
- 7) ¿Qué es la potencia de una bomba, cómo se obtiene y cuáles son sus unidades?

7. Conclusiones



Manual de Prácticas

División de Ciencias Básicas

Área: Laboratorio de Termodinámica

8. Bibliografía.

1. Wark, Kenneth, Termodinámica. Sexta edición, 2001 España. Mc Graw Hill.
2. Cengel, Yunus A. Boles, Michael A. Termodinámica. Octava edición. México 2015.
3. Kurt C. Rolle, Termodinámica. Sexta edición. México 2006. Editorial PEARSON Prentice Hall.
4. Tipler, Paul A. Física Para la Ciencia y Tecnología, Quinta edición, 2001 España. Reverté.

9. Anexo.

Expresiones matemáticas.

Ecuación de la 1ª ley de la termodinámica aplicada a sistemas abiertos.

$$m_{entra} \left(\frac{1}{2} V_e^2 + gZ_e + u_e + P_e v_e \right) - m_{sale} \left(\frac{1}{2} V_s^2 + gZ_s + u_s + P_s v_s \right) + W + Q$$

Es decir

$$Q + W = m_{sale} \left(\frac{1}{2} V_s^2 + gZ_s + u_s + P_s v_s \right) - m_{entra} \left(\frac{1}{2} V_e^2 + gZ_e + u_e + P_e v_e \right)$$

Flujo Volumétrico

$$Q = A_2 V_2$$



Manual de Prácticas

División de Ciencias Básicas

Área: Laboratorio de Termodinámica

Ecuación de continuidad $\rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2$

Ecuación de continuidad densidad constante $A_1 V_1 = A_2 V_2$

Ecuación de Bernoulli $P_1 - P_2 = \frac{\rho V_2^2}{2} \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]$

Despejando V_2

$$V_2^2 = \frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]}; V_{2teorica} = \sqrt{\frac{2(P_1 - P_2)}{\rho \left[1 - \left(\frac{A_2}{A_1} \right)^2 \right]}}$$

$$A_1 = \frac{\pi}{4} \phi_1^2 \quad y \quad A_2 = \frac{\pi}{4} \phi_2^2$$