



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

---

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN PROTOTIPO DE  
LABORATORIO PARA REALIZAR PRÁCTICAS EN  
FLUIDOS INCOMPRESIBLES**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO EN CONTROL Y  
AUTOMATIZACIÓN

P R E S E N T A :

**YESENIA ATZÍN FLORES SOLIS**

D I R E C T O R E S   D E   T E S I S :

ING. IGNACIO MARTÍNEZ SÁNCHEZ

M. EN C. RICARDO NAVARRO SOTO



MÉXICO, CDMX 2016



## DEDICATORIA

*Dedico esta tesis a mi madre, Rubí, que siempre me ha impulsado y apoyado incondicionalmente a lo largo de la vida. Y ha estado ahí en mis triunfos y fracasos.*

*A mi padre, Cándido y mi hermano, Ángel, que me han brindado su apoyo y cariño, para concluir esta etapa de mi vida.*

*A mi novio Uriel, quien me apoyo y alentó desde el principio para continuar, cuando parecía que me daría por vencida.*

---



## AGRADECIMIENTOS

*A mis maestros, por sus enseñanzas, en especial Ignacio y Ricardo, y que siempre me han motivado y creído en mí.*

*A todos los que me apoyaron para concluir esta etapa de mi vida y me ayudaron a escribir esta tesis.*

---



## CONTENIDO

<b>OBJETIVO</b> .....	<b>i</b>
<b>JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>ii</b>
<b>ALCANCE DEL TRABAJO</b> .....	<b>iii</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>iv</b>
<b>CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES</b> .....	<b>1</b>
<b>1.1 INTRODUCCIÓN AL FLUJO DE FLUIDOS</b> .....	<b>2</b>
<b>1.2 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS</b> .....	<b>3</b>
1.2.1 Densidad y Peso Específico.....	3
1.2.2 Viscosidad.....	5
1.2.3 Tensión Superficial y Capilaridad.....	6
<b>1.3 TIPOS Y CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO DE FLUIDOS</b> .....	<b>7</b>
1.3.1 Flujo Laminar .....	7
1.3.2 Flujo Turbulento .....	8
1.3.2.1 Flujo normalmente turbulento .....	9
1.3.2.2 Flujo turbulento irregular .....	9
1.3.3 Pérdidas de Carga en el Flujo Turbulento .....	10
1.3.4 Pérdida de Carga en el Flujo Laminar .....	11
1.3.5 Pérdidas de Carga Menores .....	12
1.3.6 Número de Reynolds .....	14
<b>1.4 VARIABLES DEL PROCESO</b> .....	<b>16</b>
1.4.1 Presión .....	17
1.4.1.1 Tipos de presión.....	19
1.4.1.2 Generalidades del Manómetro con Elemento Elástico .....	20
1.4.1.3 Principio de Funcionamiento del Manómetro de Diafragma .....	21
1.4.1.4 Manómetro en U .....	22
1.4.1.5 Golpes de Ariete .....	23
1.4.2 Temperatura.....	24
1.4.2.1 Generalidades del Termopar .....	25

---

---



1.4.2.2	Principio de Funcionamiento de un Termopar .....	27
1.4.3	Flujo .....	29
1.4.3.1	Generalidades de la Placa de Orificio .....	30
1.4.3.2	Principio de Funcionamiento de la Placa de Orificio .....	33
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA Y PROPUESTA DE SOLUCIÓN .....</b>	<b>35</b>
<b>2.1</b>	<b>PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA .....</b>	<b>36</b>
2.1.1	Determinación de la Causa, Diagrama de Árbol.....	39
2.1.2	Diagrama de Ishikawa, Diagrama Causa-Efecto .....	41
2.1.3	Alternativas de Solución .....	42
2.1.4	Implementación del Proyecto .....	43
<b>2.2</b>	<b>DESCRIPCIÓN TÉCNICA DE LA ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN .....</b>	<b>45</b>
2.2.1	Diagrama del Sistema .....	47
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>DESARROLLO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO .....</b>	<b>49</b>
<b>3.1</b>	<b>CÁLCULOS GENERALES DE LOS PARÁMETROS DEL FLUIDO .....</b>	<b>50</b>
<b>3.2</b>	<b>SELECCIÓN E INSTALACIÓN DEL EQUIPO .....</b>	<b>52</b>
3.2.1	Diseño de la Placa de Orificio .....	52
3.2.1.1	Características generales del diseño.....	53
3.2.1.2	Instalación de la placa de orificio.....	58
3.2.2	Diseño del Sistema de Tuberías.....	58
3.2.3	Descripción y Características de los elementos del sistema .....	61
3.2.4	Selección de los Manómetros .....	62
3.2.4.1	Consideraciones Generales.....	63
3.2.4.2	Características del Manómetro Seleccionado .....	64
3.2.4.3	Instalación del Manómetro de diafragma .....	64
3.2.5	Selección del Termopar .....	65
3.2.5.1	Instalación.....	67
<b>3.3</b>	<b>CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO .....</b>	<b>68</b>
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>PRUEBAS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS .....</b>	<b>72</b>
<b>4.1</b>	<b>PRUEBAS DE FUGAS Y CONEXIONES .....</b>	<b>73</b>

---

---



---

<b>4.2</b>	<b>PARÁMETROS DEL FLUJO DE FLUIDO EN LA TUBERÍA .....</b>	<b>75</b>
<b>4.3</b>	<b>RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DE PRESIÓN .....</b>	<b>78</b>
<b>4.4</b>	<b>CÁLCULO DE FLUJO MÁSSICO Y PERDIDAS HIDRÁULICAS EN EL MEDIDOR DE ORIFICIO</b>	<b>82</b>
<b>4.5</b>	<b>RESULTADOS GRÁFICOS.....</b>	<b>88</b>
4.5.1	Análisis de Resultados .....	95
<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>ANÁLISIS ECONÓMICO .....</b>	<b>98</b>
<b>5.1</b>	<b>INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS ECONÓMICO .....</b>	<b>99</b>
<b>CONCLUSIONES .....</b>		<b>vi</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>		<b>vii</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>viii</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>		<b>xv</b>

---

---



## ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 1.1 Flujo laminar</i>	8
<i>Figura 1.2 Flujo turbulento</i>	9
<i>Figura 1.3 La presión actúa de manera uniforme en todas las direcciones sobre un pequeño volumen de fluido dirección de la presión de fluido sobre las fronteras de un tubo.</i>	18
<i>Figura 1.4 Manómetro de diafragma marca Metron.</i>	21
<i>Figura 1.5 Partes que componen el manómetro de diafragma.</i>	21
<i>Figura 1.6 Partes que componen el manómetro de diafragma, vista lateral.</i>	22
<i>Figura 1.7 Medición de presión estática, presión de impacto y presión total.</i>	23
<i>Figura 1.8 Partes que forman el termopar, t1 y t2, temperatura 1 y temperatura 2 respectivamente.</i>	25
<i>Figura 1.9 Puntas en una sonda termopar.</i>	27
<i>Figura 1.10 Representación gráfica del efecto Seeback.</i>	28
<i>Figura 1.11 Principio de funcionamiento del termopar.</i>	28
<i>Figura 1.12 Medidores volumétricos</i>	29
<i>Figura 1.13 Clasificación de los medidores volumétricos</i>	30
<i>Figura 1.14 Placa de orificio.</i>	31
<i>Figura 1.15 Diferentes perforaciones de la placa de orificio</i>	32
<i>Figura 1.16 Tomas de presión antes y después de la placa de orificio</i>	32
<i>Figura 1.17 Corte transversal de la tubería con la placa de orificio.</i>	33
<i>Figura 2.1 Árbol de análisis de la problemática.</i>	39
<i>Figura 2.2 Análisis de objetivos y corrección de las redundancias.</i>	40
<i>Figura 2.3 Formulación de las acciones.</i>	40
<i>Figura 2.4 Diagrama Causa-Efecto.</i>	41
<i>Figura 2.5 Diagrama del sistema.</i>	48
<i>Figura 3.1 Características de diseño de la placa de orificio.</i>	53
<i>Figura 3.2 Ejemplo de diseño de placa de orificio en acero inox en Solid Works. Vista transversal con <math>d = 17.78</math> mm.</i>	55
<i>Figura 3.3 Limpieza de la barra de aluminio.</i>	56
<i>Figura 3.4 Ángulo a <math>45^\circ</math> en la placa de orificio.</i>	56

---



<i>Figura 3.6 Placas de orificio fabricadas de diferentes diámetros.</i>	57
<i>Figura 3.7 Diferentes posiciones de las tomas de presión.</i>	59
<i>Figura 3.8 Relación de medidas mínimas para tubo recto.</i>	59
<i>Figura 3.9 Diagrama final del prototipo</i>	60
<i>Figura 3.10 Posición adecuada de los manómetros en el proceso</i>	65
<i>Figura 3.11 Termopar tipo K seleccionado</i>	65
<i>Figura 3.12 Características generales del termopar tipo k</i>	66
<i>Figura 3.13 Termopar para uso general</i>	66
<i>Figura 3.14 Montaje del termopar en la tubería</i>	67
<i>Figura 3.15 Características técnicas de la bomba trifásica</i>	68
<i>Figura 3.16 Prototipo finalizado, zona de succión de agua y descarga de agua.</i>	68
<i>Figura 3.17 Tomas de presión en el prototipo y conexión al termopar.</i>	69
<i>Figura 3.18 Tuerca unión, tomas de presión aguas arriba y aguas abajo de la placa de orificio. Sección de inserción del termopar.</i>	69
<i>Figura 3.19 Localización de la conexión para el tubo pitot y las válvulas reguladoras de flujo.</i>	70
<i>Figura 3.20 Manómetro en U</i>	70
<i>Figura 3.21 Conexión del manómetro en U a las tomas de presión aguas arriba y aguas abajo de la placa de orificio</i>	71
<i>Figura 4.1 Driver EUROTHERM 605</i>	73
<i>Figura 4.2 Diagrama de conexiones del tablero de control del variador a la bomba</i>	74
<i>Figura 4.3 Diagrama de conexiones</i>	74
<i>Figura 4.4 Conexión del prototipo al tablero trifásico de pruebas y al driver.</i>	75

---

---





## ÍNDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1.1 Resistencia en válvulas y juntas expresada como longitud equivalente en diámetros de conducto <math>Le/D</math> (Mott, 1996).</i>	14
<i>Tabla 1.2 Termopares de uso común.</i>	26
<i>Tabla 2.1 Alternativas de solución.</i>	42
<i>Tabla 2.2 Propuesta de prácticas para trabajar en el prototipo.</i>	44
<i>Tabla 2.3 Tabla de ventajas y desventajas de uso para el manómetro de diafragma.</i>	46
<i>Tabla 2.4 Tabla de ventajas y desventajas de uso para la placa de orificio.</i>	46
<i>Tabla 2.5 Ventajas y desventajas del uso del termopar.</i>	47
<i>Tabla 3.1 Cálculo de la velocidad máxima deseada en la tubería</i>	50
<i>Tabla 3.2 Diámetro y espesor mínimo y máximo para el diseño de la placa de orificio</i>	53
<i>Tabla 3.3 Valores calculados para el espesor de la placa de orificio.</i>	53
<i>Tabla 3.4 Porcentaje de pérdida de carga en función de la relación de diámetros. Tabla tomada de (CONAGUA, 1994)</i>	54
<i>Tabla 3.5 Cálculo del diámetro del orificio en relación con la pérdida de carga</i>	55
<i>Tabla 3.6 Medidas de construcción para la tubería aguas arriba y aguas abajo de la placa.</i>	60
<i>Tabla 3.7 Características técnicas del PVC seleccionado.</i>	61
<i>Tabla 3.8 Características técnicas de las válvulas seleccionadas</i>	61
<i>Tabla 3.9 Características técnicas de las válvulas de esfera seleccionadas</i>	62
<i>Tabla 3.10 Características técnicas del manómetro seleccionado</i>	64
<i>Tabla 3.11 Características técnicas del termopar seleccionado</i>	66
<i>Tabla 4.1 Resultados obtenidos de los cálculos para obtener los parámetros del flujo del fluido.</i>	77
<i>Tabla 4.2 Diferencia de presión obtenida de las mediciones realizadas con el manómetro en U para cada una de las placas de orificio.</i>	79
<i>Tabla 4.3 Diferencia de presión obtenida de las mediciones realizadas con el manómetro de diafragma y el calibrador de presión para cada una de las placas de orificio.</i>	80
<i>Tabla 4.4 Diferencia de presión obtenida de las mediciones realizadas con el manómetro en U para cada una de las placas de orificio.</i>	81
<i>Tabla 4.5 Valores asignados para los diferentes tipos de instalación y calcular <math>C_d</math>.</i>	83

---

---



---

<i>Tabla 4.6 Resultados obtenidos para coeficiente de descarga, flujo másico y pérdida de carga hidráulica obtenidos a partir de las mediciones realizadas con el manómetro en U.</i>	<i>85</i>
<i>Tabla 4.7 Resultados obtenidos para coeficiente de descarga, flujo másico y pérdida de carga hidráulica obtenidos a partir de las mediciones realizadas con el manómetro de diafragma y el calibrador de presión</i>	<i>86</i>
<i>Tabla 4.8 Resultados obtenidos para coeficiente de descarga, flujo másico y pérdida de carga hidráulica obtenidos a partir de las mediciones realizadas con el manómetro de diafragma y el manómetro en U.</i>	<i>87</i>
<i>Tabla 5.1 Catálogo de conceptos de materiales</i>	<i>100</i>
<i>Tabla 5.1 Continuación</i>	<i>101</i>
<i>Tabla 5.1 Continuación</i>	<i>102</i>
<i>Tabla 5.2 Catálogo de conceptos del equipo utilizado</i>	<i>102</i>
<i>Tabla 5.3 Catálogo de conceptos diseño de ingeniería</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 5.4 Catálogo de conceptos para la mano de obra.</i>	<i>103</i>
<i>Tabla 5.5 Precio de compra externo</i>	<i>104</i>

---

---



## OBJETIVO

Construir un prototipo de bajo costo para realizar prácticas y pruebas con fluidos incompresibles mediante diferentes métodos específicos de medición, considerando las variables de proceso tales como presión, flujo y temperatura. Siendo aplicable dentro de las instalaciones del laboratorio de prácticas o en laboratorios de pruebas, incrementando así el conocimiento del estudiante en el uso de los diferentes instrumentos de medición empleados dentro del entorno productivo.



## JUSTIFICACIÓN

Los conocimientos teórico-prácticos que deben adquirirse a lo largo de la formación académica de un ingeniero en control y automatización incluyen una gran cantidad de elementos que resultan de gran importancia para el desarrollo profesional. Este conocimiento debería ir desde el dominio de conceptos básicos de mecánica de fluidos, conocimiento y manejo de por lo menos los instrumentos de uso común en la industria, tanto primarios como secundarios, hasta la elaboración de pruebas, calibración, instalación y mediciones con instrumentación industrial.

De igual modo, el ingeniero en control y automatización debe estar capacitado para planear, proyectar, diseñar, construir, conservar y mantener dispositivos y equipos que utilicen o combinen distintos principios derivados de la neumática, hidráulica, mecánica, electrónica y la cibernética, tal como indica el perfil de egresado de dicha ingeniería. En muchas ocasiones la adquisición de conocimientos prácticos para los estudiantes se ve limitada por la escasez de equipo en los laboratorios de la institución, sintetizando el conocimiento sólo en la teoría dificultando el desarrollo profesional.

El presente trabajo tiene como finalidad describir los fundamentos de la mecánica de fluidos, así como los principios de hidráulica, aplicados al diseño y construcción de un prototipo conformado por un sistema de tuberías e instrumentos primarios y secundarios de medición de uso común en la industria. Se pretende introducir al estudiante en un ambiente en el que pueda tener un acercamiento a las diferentes situaciones que pudieran presentarse en el manejo de instrumentación industrial. El prototipo estará al alcance de la comunidad estudiantil, con la finalidad de inducir al estudiante en la investigación y desarrollo de prácticas, referentes a las diferentes variables de proceso, para reforzar la adquisición de conocimientos mediante el uso del mismo.



## ALCANCE DEL TRABAJO

El diseño y construcción del prototipo lo hace apto para realizar pruebas y prácticas con flujos de fluidos incompresibles, los cálculos realizados se han hecho tomando como referencia el agua limpia, se han considerado las características propias del fluido y del flujo del mismo por las tuberías del prototipo. Puesto que los cálculos y pruebas aquí presentados se han realizado considerando una temperatura de 21° C y las características del agua, cualquier prueba que se requiera realizar con un fluido de menor o mayor viscosidad, así como una temperatura de operación diferente a la mencionada, deberá considerar la elaboración de los cálculos pertinentes.

Las variables de estudio presentadas en este trabajo son presión, flujo y temperatura, así consideradas por su universalidad y presencia dentro de prácticamente todos los procesos industriales. Los instrumentos ocupados en el prototipo fueron seleccionados principalmente por el costo de adquisición y su amplio uso industrial, en el trabajo se utiliza placa de orificio como elemento para medición de flujo, manómetro de diafragma y manómetro en U para medición de presión y termopar tipo k para medición de temperatura.

La instalación y cuidados básicos de transporte y almacenamiento, así como instrucciones de uso se muestran por cada uno de los instrumentos utilizados. El prototipo y las pruebas aquí realizadas tienen el propósito de instruir al estudiante en los principios de funcionamiento de los instrumentos básicos de medición y mecánica de fluidos.



## INTRODUCCIÓN

En el presente trabajo se desarrolla el diseño y construcción de un prototipo para realizar prácticas con fluidos incompresibles. A lo largo del trabajo se presenta la información de estudio relevante, el desarrollo de la problemática, el desarrollo de la ingeniería del prototipo, las pruebas realizadas al mismo y el análisis económico. El trabajo presenta algunas de las características que se consideran necesarias en la elaboración de un prototipo de prácticas que sea adecuado para trabajar con fluidos incompresibles e inclusive con fluidos compresibles de baja densidad.

En el capítulo uno podrá encontrar de forma simplificada la información relevante referente al trabajo con fluidos incompresibles y las características propias de los mismos. Se realiza una breve introducción al flujo de fluidos y los temas que se abordan proveen la información necesaria para trabajar con las propiedades, tipos y características de los mismos. Se presentan las diferentes variables de proceso objeto de estudio en el presente trabajo.

Consecutivamente, se puede encontrar en el capítulo dos el desarrollo de la problemática. Así mismo se observa un diagrama de árbol y un diagrama de pescado en donde se determina la causa de la problemática para proponer una serie de alternativas derivadas de la misma. Dentro de las alternativas encontradas, se selecciona la que satisfaga sino todas, la mayoría de las necesidades y sea la mejor solución al problema presentado. Se ha realizado una serie de preguntas a 65 estudiantes con la finalidad de justificar la alternativa de solución seleccionada y brindar una perspectiva más clara del problema.

El capítulo tres muestra el desarrollo de la ingeniería del proyecto. Los cálculos iniciales para el trabajo con fluidos incompresibles se muestran en éste apartado del trabajo, se muestran los cálculos y criterios de diseño para las placas de orificio



utilizadas y los instrumentos de medición que se emplearon en el prototipo. A su vez. Se muestran las características del sistema de tuberías y las diferentes longitudes que el tramo recto de tubería debe tener el prototipo en determinadas circunstancias.

Las pruebas realizadas en el prototipo, como son pruebas de fugas, pruebas de conexiones y pruebas de instrumentación se muestran en el capítulo 4. Estas pruebas incluyen el uso de la placa de orificio para el cálculo del flujo en la tubería; se observan de igual forma los resultados obtenidos de presión diferencial y temperatura medidos en las pruebas.

Finalmente, se puede encontrar el análisis económico en el capítulo cinco, además de las consideraciones teóricas de economía. En este capítulo se muestra un catálogo de conceptos de los materiales utilizados en la construcción del prototipo, así como también de los equipos e instrumentos utilizados para la elaboración de las pruebas.

# CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES

El objetivo de este capítulo es dar una introducción a la mecánica de fluidos exponiendo los conceptos básicos y ecuaciones necesarias para el cálculo de las características propias de los fluidos y cómo estos reaccionan en conductos cerrados. Se presentan las variables de proceso que se estudian en este trabajo y se exponen las características generales y principio de funcionamiento de los instrumentos que serán utilizados para la medición de dichas variables.





## 1.1 INTRODUCCIÓN AL FLUJO DE FLUIDOS

Los fluidos son sustancias capaces de fluir y que se adaptan a la forma del recipiente que los contiene. Se consideran dos tipos de fluidos: compresible e incompresible. Todos los fluidos son compresibles en cierto grado, incluyendo los líquidos, y ofrecen poca resistencia a los cambios de forma, los fluidos pueden dividirse en líquidos y gases. Los líquidos prácticamente son incompresibles, ocupan un volumen definido y tienen superficies libres, mientras que los gases son compresibles y se expanden hasta ocupar toda el área del recipiente que los contiene.

Cuando se opta por usar el término “compresible”, es porque se experimenta en el fluido un cambio grande en el volumen puesto que muestra una gran variación en su densidad como resultado de fluir. Estos cambios suceden principalmente en los gases por lo que tienen una alta compresibilidad, en cambio, los líquidos necesitan mayores presiones para poder fluir a altas velocidades. Por ejemplo, a una presión de 100 kPa el agua presenta un cambio de densidad de apenas 0.0048% y si se aplica esta misma presión al aire provoca un cambio de densidad del 50%, por esta razón se considera para casos prácticos a los líquidos como fluidos incompresibles.

El flujo de fluidos en conductos se encuentra en cualquier tipo de industria. Desde el transporte y suministro de agua potable hasta el transporte de líquidos industriales, la ingeniería se ha encargado de construir gran cantidad de sistemas de tuberías a pequeña y gran escala. Las tuberías aún más pequeñas se encuentran en aplicaciones como controles hidráulicos, sistemas de calefacción y aire acondicionado y en sistemas de flujo cardiovasculares y pulmonares, entre otros. Se pone especial atención en las diferentes características propias del fluido ya que en gran parte se selecciona en base a ellas las características del ducto que se requiere utilizar.



Se considera que las tuberías se componen de elementos y componentes, los elementos de tubos son tramos de tubos de diámetro constante y los componentes son válvulas, tes, codos, reductores o cualquier otro dispositivo que provoque una pérdida en el sistema, los elementos y componentes se unen en juntas. Además de estos elementos también están las bombas que agregan energía al sistema y las turbinas que extraen energía.

Se pueden encontrar diferentes sistemas de tuberías los cuales tendrán diferentes pérdidas, estos sistemas incluyen configuraciones ramales, en serie y paralelo. Los flujos internos incompresibles y el efecto de la viscosidad en ellos son de suma importancia para los ingenieros. El flujo de fluido en un tubo circular es siempre el más común, se localiza en las venas y arterias del cuerpo, en la red de suministro de agua de una ciudad, en los sistemas de tuberías que transportan fluidos en una fábrica, entre otros, por lo cual resulta sumamente importante centrarse en las características propias de estos fluidos y el flujo de los mismos en los sistemas de tuberías circulares. (Wiggert, 2009).

## **1.2 PROPIEDADES DE LOS FLUIDOS**

A continuación se presentan las propiedades más importantes de los fluidos en la mecánica de fluidos, sin embargo, si existe variación de densidad o la transferencia de calor es significativa, varias propiedades adicionales, que no se presentan en este capítulo, llegan a ser relevantes.

### **1.2.1 Densidad y Peso Específico**

La densidad de fluido se define como masa por unidad de volumen. Una propiedad de fluido directamente relacionada con la densidad es el peso específico. El peso específico de una sustancia es el peso por unidad de volumen de esa sustancia, puede considerarse constante para las variaciones ordinarias de presión. Para el



agua se utiliza el valor nominal  $9\,800\text{ (N/m}^3\text{)}$  o  $62.4\text{ (lb/ft}^3\text{)}$  en el sistema inglés (Wiggert, 2009). Esto se muestra en las ecuaciones ( 1.1) y ( 1.2)

$$\gamma = \rho g \quad (1.1)$$

$$\gamma = \frac{\omega}{v} \quad (1.2)$$

Donde:

$$\gamma = \textit{peso específico}, \left[ \frac{N}{m^3} \right].$$

$$g = \textit{aceleración de la gravedad}, \left[ \frac{m}{s^2} \right].$$

$$\rho = \textit{densidad}, \left[ \frac{kg}{m^3} \right].$$

$$\omega = \textit{peso}, [N].$$

$$v = \textit{volumen de la sustancia}, [m^3].$$

El peso específico del agua para es de  $1\,000\text{ (kg} \cdot \text{f/m}^3\text{)}$  o  $9\,810\text{ (N/m}^3\text{)}$  las temperaturas más comunes (Giles, 2010). Es importante recordar que las densidades de los gases y vapores varían en gran medida con la presión, sin embargo, la presión no tiene gran efecto sobre la densidad de los líquidos y por tanto esta variable carece de importancia con respecto a estos.

Como la presión no es de gran importancia sobre la densidad de los líquidos, la temperatura es la única variable que debe ser tomada en cuenta al querer establecer el peso específico. La densidad relativa ( $\delta$ ) (ecuación 1.3) de un líquido es la relación de su densidad a cierta temperatura o la relación del peso por unidad de volumen de un cuerpo entre el peso del mismo volumen con respecto al agua a una temperatura normalizada de  $4^\circ\text{C}$  para los sólidos y líquidos; es una unidad adimensional (Crane, 2006).



$$\text{Densidad relativa } (\delta) = \frac{\text{peso de la sustancia}}{\text{peso de igual volumen de agua}} = \frac{\gamma}{\gamma_{H_2O}} \quad (1.3)$$

Con frecuencia se utiliza la gravedad específica para determinar el peso específico o densidad de un fluido, en general de fluidos líquidos. La gravedad específica se define como la relación de la densidad de una sustancia con la del agua a una temperatura de referencia de 4°C y es adimensional. La densidad y peso específico de agua varían un poco con la temperatura. A temperaturas por debajo de 50°C, si se utilizan los valores nominales establecidos para agua y mercurio, el error es menor de 1% (Wiggert, 2009).

### 1.2.2 Viscosidad

La viscosidad de un fluido es la propiedad que determina la cantidad de resistencia opuesta a las fuerzas cortantes, se debe principalmente a las interacciones entre las moléculas del fluido (Giles, 2010), expresa la facilidad que tiene un fluido para fluir cuando se le aplica una fuerza externa. El coeficiente de viscosidad absoluta de un fluido es una medida de su resistencia al deslizamiento o a sufrir deformaciones internas.

Se puede saber la viscosidad de la mayoría de los fluidos, en algunos la viscosidad depende del trabajo que se haya realizado sobre ellos. La unidad de la viscosidad absoluta en el SI es el pascal segundo ( $Pa \cdot s$ ) o el newton segundo por metro cuadrado ( $N s/m^2$ ) es decir, kilogramo por metro segundo ( $kg/m \cdot s$ ). El efecto de la presión sobre la viscosidad de los líquidos y de los gases perfectos es tan pequeño que no tiene interés práctico en la mayor parte de problemas para flujo de fluidos. La viscosidad responde a las pérdidas de energía asociadas con el transporte de fluidos en ductos, canales y tuberías. Además, la viscosidad juega un papel importante en la generación de turbulencia. La velocidad de deformación de



un fluido está directamente ligada a su viscosidad, con un esfuerzo dado, un fluido altamente viscoso se deforma más lentamente que un fluido de baja densidad. Se observa que al aumentar la temperatura, la viscosidad de los líquidos disminuye y la viscosidad de los gases aumenta. (Wiggert, 2009).

Un fluido con un alto índice de viscosidad muestra un cambio pequeño de viscosidad con respecto a la temperatura. Un fluido con un bajo índice de viscosidad exhibe un cambio grande en su viscosidad con respecto a la temperatura. Una medida de qué tanto cambia la viscosidad de un fluido con la temperatura está dada por su índice de viscosidad. Éste es especialmente importante en los aceites lubricantes y en fluidos hidráulicos que se utilizan en equipos que deben operar en condiciones extremas de temperatura (Mott, 1996).

### 1.2.3 Tensión Superficial y Capilaridad

La tensión superficial es una propiedad originada por las fuerzas de atracción entre las moléculas que se manifiesta sólo en los líquidos. Las fuerzas entre las moléculas en la masa de un líquido son iguales en todas las direcciones y en consecuencia, ninguna fuerza en su totalidad es ejercida por las moléculas. La tensión superficial tiene unidades de fuerza por unidad de longitud ( $N/m$ ) en el SI y libras por pies ( $lb/ft$ ) para el sistema inglés (Wiggert, 2009).

Una molécula en el interior de un líquido está sometida a la acción de fuerzas atractivas en todas las direcciones, siendo la resultante nula. Si la molécula está en la superficie del líquido, sufre la acción de un conjunto de fuerzas de cohesión, cuya resultante es perpendicular a la superficie. Por tal motivo es necesario consumir cierta cantidad de trabajo para mover las moléculas hacia la superficie venciendo la viscosidad de estas fuerzas. En la mayoría de los trabajos de mecánica de fluidos, la tensión superficial no resulta de gran importancia.



La elevación o descenso de un líquido en un tubo capilar viene producido por la tensión superficial, dependiendo de las magnitudes relativas de la cohesión del líquido y de la adhesión del líquido a las paredes del tubo. La capilaridad tiene importancia en tubos de diámetros aproximadamente menores de 10 mm (Giles, 2010).

### 1.3 TIPOS Y CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO DE FLUIDOS

Para calcular la cantidad de energía perdida debido a la fricción en un sistema de tuberías, es necesario conocer la naturaleza del flujo. El flujo lento y uniforme se conoce como flujo laminar, mientras que el flujo rápido y caótico se conoce como flujo turbulento.

Los métodos que se utilizan para calcular la pérdida de energía son diferentes para cada tipo de flujo. El tipo de flujo puede determinarse mediante el número de Reynolds, este número es adimensional y relaciona las variables más importantes del flujo, como son, velocidad, longitud de la trayectoria del flujo, densidad de fluido y viscosidad (Mott, 1996).

El flujo de un fluido real es más complejo que el de un fluido ideal; se entiende por *fluido ideal* al fluido de viscosidad nula, incompresible y deformable cuando es sometido a tensiones cortantes aun que estas sean muy pequeñas, *el flujo real* es aquel que tiene viscosidad y es compresible, tal es el caso de los flujos laminares y turbulentos.

#### 1.3.1 Flujo Laminar

En los flujos laminares (Figura 1.1) el fluido fluye sin mezclado significativo de sus partículas próximas entre sí. Las partículas fluidas se mueven según trayectorias paralelas, formando junto de ellas capas o láminas, una sobre otra. La viscosidad

del fluido es la magnitud física predominante y su acción amortigua cualquier tendencia a la turbulencia. Se considera que existe una relación entre la velocidad y el tipo de flujo en una tubería, a velocidades más bajas que la crítica, el tipo de flujo que existe será el laminar.

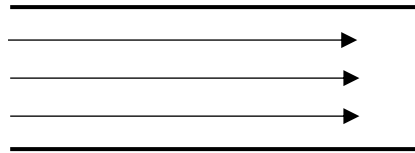


Figura 1.1 Flujo laminar

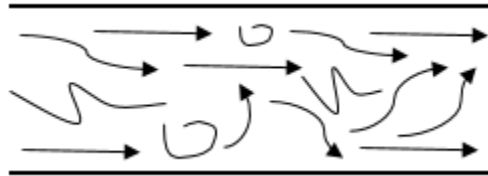
### 1.3.2 Flujo Turbulento

Como ya se mencionó anteriormente, la velocidad tiene relación con el tipo de flujo en las tuberías, a velocidades mayores a la crítica, el flujo que se presenta es turbulento, en éste, hay un movimiento irregular e indeterminado de las partículas del fluido en direcciones transversales a la dirección principal del flujo, es decir, en el flujo turbulento (Figura 1.2) las partículas fluidas se mueven de forma desordenada en todas las direcciones, aunque resulta imposible conocer la trayectoria de una partícula individualmente. Existen tres tipos de flujo turbulento; normalmente turbulento, flujo turbulento irregular, flujo pulsante.

La distribución de las velocidades en este tipo de flujo es más uniforme a través del diámetro de la tubería que en el flujo laminar. Es importante mencionar que a pesar de que existe un movimiento turbulento a través de la mayor parte del diámetro de la tubería, siempre hay una pequeña capa de fluido en la pared de la tubería conocida como la *capa periférica* o *subcapa laminar*, que se mueve en régimen laminar.

El tipo de flujo presente en las tuberías depende básicamente de tres factores, o parámetros físicos. El primero es una escala de longitud del campo de flujo como puede ser el espesor de una capa límite o el diámetro de un tubo, puesto que a

mayor diámetro existe mayor probabilidad de tener un flujo turbulento. El segundo es una escala de velocidad, con una velocidad suficientemente grande el flujo puede llegar a ser turbulento. El tercero es la viscosidad cinemática, con una viscosidad suficientemente pequeña el flujo puede llegar a ser turbulento. (Wiggert, 2009)



*Figura 1.2 Flujo turbulento*

Algunas de las razones importantes para crear un flujo turbulento es promover la mezcla en aplicaciones como:

1. Mezcla de dos o más fluidos.
2. Aceleración de reacciones químicas.
3. Aumento de la transferencia de calor hacia un fluido o fuera de éste.

#### 1.3.2.1 Flujo normalmente turbulento

Se presenta en tuberías largas y que no tienen vueltas, restricciones, ensanchamientos, ni conexiones; este tipo de flujo es el adecuado para la medición de caudal.

#### 1.3.2.2 Flujo turbulento irregular

Cuando en la tubería se tienen restricciones, ensanchamientos, codos o vueltas, el flujo normalmente turbulento se puede convertir en flujo turbulento irregular, también





es conocido como flujo turbulento disturbado y ocasiona problemas en la medición a menos que se utilicen venas enderezadoras de flujo o que se deje suficiente tramo de tubería recta antes del elemento primario de medición.

### 1.3.3 Pérdidas de Carga en el Flujo Turbulento

En una tubería, las pérdidas de carga son continuas y locales. Las pérdidas de carga continuas son proporcionales a la longitud, se deben a la fricción y se calculan por medio de la fórmula de Darcy. Las pérdidas de cargas locales o singulares ocurren en determinados puntos de la tubería y se deben a la presencia de algún elemento en ella como un codo, una válvula, un estrechamiento, entre otros (Felices, s.f.). Para el flujo turbulento de fluidos en secciones de conductos circulares, resulta más conveniente utilizar la ecuación de Darcy (ecuación 1.4) para calcular la pérdida de energía o pérdida de presión debido a la fricción. Es aplicable tanto al flujo laminar como al flujo turbulento, la diferencia entre los dos está en la evaluación del factor de fricción.

$$h_f = (f) \left( \frac{L}{D} \right) \left( \frac{V^2}{2g} \right) \quad (1.4)$$

Donde:

$h_f$  = pérdida de carga hidráulica, [m].

$f$  = factor de fricción, [adimensional].

$L$  = Longitud, [m].

$D$  = diámetro del conducto, [m].

$V$  = velocidad del fluido,  $\left[ \frac{m}{s} \right]$ .

$$f = \frac{64}{R_e} \quad (1.5)$$



Donde:

$f$  = factor de fricción, [adimensional].

$R_e$  = número de Reynolds, [adimensional].

#### 1.3.4 Pérdida de Carga en el Flujo Laminar

Debido a la viscosidad del fluido, se crea una tensión de corte entre las capas del fluido. La energía se pierde del fluido por la acción de vencer a las fuerzas de fricción producidas por la tensión de corte. Puesto que el flujo laminar es sumamente regular y ordenado, se puede derivar una relación entre la pérdida de energía y los parámetros medibles del sistema de flujo. Esta relación en la pérdida de carga en el flujo laminar viene dada por la fórmula de Hagen – Poiseuill (ecuación 1.6).

$$\text{Pérdida de carga (m)} = \frac{32(\mu)(L)(V)}{\gamma(D)^2} \quad (1.6)$$

Donde:

$\mu$  = viscosidad del fluido,  $\left[\frac{kg}{m \cdot s}\right]$ .

$\gamma$  = peso específico,  $\left[\frac{N}{m^3}\right]$ .

$D$  = diámetro del conducto, [m].

$L$  = longitud del conducto, [m].

$V$  = velocidad del fluido,  $\left[\frac{m}{s}\right]$ .

De la ecuación 1.6 se puede observar que la pérdida de energía en el flujo laminar es independiente de la condición de la superficie del conducto. Las pérdidas por fricción viscosa dentro del fluido determinan la magnitud de la pérdida de energía.



(Mott, 1996). De igual modo se puede usar la ecuación de Darcy para calcular las pérdidas de carga hidráulica.

### 1.3.5 Pérdidas de Carga Menores

En la mayor parte de los sistemas de flujo, la pérdida de energía primaria se debe a la fricción de conducto. Existen otro tipo de pérdidas que normalmente son más pequeñas y se hace referencia a ellas como pérdidas menores. Las pérdidas menores ocurren cuando hay un cambio en la sección cruzada de la trayectoria de flujo, en la dirección de flujo o cuando la trayectoria de flujo se encuentra obstruida como por ejemplo con las válvulas, T, codos de 90° y 45°, entre otros elementos.

La predicción teórica de estas pérdidas es compleja y se usan datos experimentales para su cálculo. Los valores experimentales de pérdidas de energía generalmente se reportan en términos de un coeficiente de resistencia ( $K$ ) (ecuación 1.7):

$$h_L = K \left( \frac{V^2}{2g} \right) \quad (1.7)$$

Donde:

$h_L$  = pérdida de carga menor, [m].

$K$  = coeficiente de resistencia, [adimensional].

$V$  = velocidad de flujo promedio en el conducto,  $\left[ \frac{m}{s} \right]$ .

$g$  = aceleración de la gravedad,  $\left[ \frac{m}{s^2} \right]$ .

Se pueden encontrar muchos tipos de válvulas y uniones de diferentes fabricantes. Las válvulas se utilizan para controlar la cantidad de flujo y pueden ser válvulas de globo, de ángulo, de mariposa, entre otros. Los elementos dirigen la trayectoria de



flujo u ocasionan un cambio en el tamaño de la trayectoria de flujo, se incluyen diseños como codos, tes, reductores, boquillas y orificios. La pérdida de energía a través de estos elementos se calcula a partir de la ecuación 1.7. La determinación del coeficiente de resistencia  $K$  se calcula mediante la ecuación 1.8 y los valores estandarizados para los diferentes elementos se muestran en la Tabla 1.1.

$$K = \frac{L_e}{D} fr \quad (1.8)$$

Donde:

$\frac{L_e}{D}$  = proporción de longitud equivalente, (Tabla 1.1)

$fr$  = factor de fricción, [adimensional].

$D$  = diámetro interno real del conducto, [m]

$L_e$  = Longitud equivalente, [m].

La longitud equivalente se refiere al tramo recto de tubería que tendría la misma resistencia que la válvula o junta. El factor de fricción es el del conducto al cual está conectada la válvula o junta (Mott, 1996).

En flujos turbulentos se puede utilizar el diagrama de Moody para conocer el factor de fricción, esto se hace tomando en cuenta el número de Reynolds y la rugosidad relativa del material que se esté utilizando (ecuación 1.9). Cuando el flujo es laminar, puede utilizarse el cálculo mediante la ecuación de Darcy para obtener el coeficiente de fricción tal como indica el diagrama de Moody.

$$\text{rugosidad relativa} = \frac{\varepsilon}{D} \quad (1.9)$$

$$f = f\left(R_e, \frac{\varepsilon}{D}\right)$$



Tabla 1.1 Resistencia en válvulas y juntas expresada como longitud equivalente en diámetros de conducto  $Le/D$  (Mott, 1996).

<b>ELEMENTO</b>		<b>LONGITUD EQUIVALENTE EN DIÁMETROS DE CONDUCTO <math>Le/D</math></b>
Válvula de globo – completamente abierta		340
Válvula de ángulo – completamente abierta		150
Válvula compuerta	Completamente abierta	8
	$\frac{3}{4}$	35
	$\frac{1}{2}$	160
	$\frac{1}{4}$	900
Válvula de mariposa – completamente abierta		45
Codo estándar de 90°		30
Codo estándar de 45°		16
Tee estándar – con flujo a través de un tramo		20
Tee estándar – con flujo a través de una rama		60

### 1.3.6 Número de Reynolds

El comportamiento de un fluido, particularmente con respecto a las pérdidas de energía, depende bastante de si el flujo es laminar o turbulento. Por lo tanto es importante y necesario tener medios para predecir el tipo de flujo sin tener la necesidad de observarlo, puesto que es imposible utilizar sólo la observación para fluidos en conductos cerrados opacos.

Osborne Reynolds (1842 – 1912) fue el primero en demostrar que un flujo laminar o turbulento se puede predecir si se conoce la magnitud de un número adimensional, que depende de otras propiedades de los fluidos, hoy en día se conoce como Número de Reynolds (ecuación 1.10).



$$R_e = \frac{VD\rho}{\mu} = \frac{VD}{\nu} \quad (1.10)$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (1.11)$$

Donde

$R_e$  = Número de Reynolds, [adimensional].

$\rho$  = densidad,  $\left[\frac{kg}{cm^3}\right]$ .

$D$  = diámetro del conducto, [m].

$\mu$  = viscosidad del fluido,  $\left[\frac{kg}{m \cdot s}\right]$ .

$V$  = velocidad del fluido en la tubería,  $\left[\frac{m}{s}\right]$ .

$\nu$  = viscosidad cinemática del fluido,  $\left[\frac{m^2}{s}\right]$ .

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

Para mayor practicidad en el cálculo del número de Reynolds, se tiene que si es menos a 2 000, el flujo será laminar, si es mayor a 4 000 se puede decir que el flujo es turbulento, entre el intervalo de 2 000 y 4 000, no se puede predecir qué tipo de flujo existe; a este intervalo se le conoce como *región crítica*, aunque es muy poco frecuente que se trabaje con estos flujos.

Cuando se da el caso de que el flujo de un sistema se encuentra dentro de la región crítica, la solución consiste en cambiar la rapidez de flujo o el diámetro del conducto



para hacer que el flujo sea claramente laminar o turbulento. Lo anterior es aplicable al flujo de fluidos en conductos cerrados.

Es importante mencionar que es posible mantener un flujo laminar para números de Reynolds hasta de 50 000, sin embargo cuando  $N_R$  es mayor que aproximadamente 4 000, una perturbación menor de la corriente de flujo ocasionaría un cambio súbito en el flujo de laminar a turbulento. Por eso se utiliza para fines prácticos (Mott, 1996):

Si  $N_R < 2000$  flujo laminar

Si  $N_R > 4000$  flujo turbulento

#### 1.4 VARIABLES DEL PROCESO

Una variable, es todo aquel parámetro que esta propenso a cambiar de valor dependiendo de las condiciones del medio que lo rodean, su cambio depende también de las características propias del parámetro y la reacción de las mismas a la excitación de agentes o modificaciones externas.

Se pueden encontrar dos tipos de variables de proceso: las variables físicas y químicas. Las *variables físicas* son aquellas relacionadas con las causas físicas que actúan sobre un cuerpo, con su movimiento o bien con las propiedades físicas de las sustancias; como lo son peso, la velocidad, la densidad y el peso específico, la humedad y el punto de rocío, la viscosidad, la turbidez, entre otras. Mientras que las *variables químicas* están relacionadas con las propiedades químicas de los cuerpos o con su composición.

Existen diferentes tipos de variables en los procesos industriales, dichas variables son medibles y controlables ya que de este modo se pretende llegar a un mejor producto así como mantener el proceso dentro de los rangos de seguridad correspondientes, incrementar la eficiencia y reducir el impacto ambiental y costos del proceso. En función de las variables de proceso se pueden encontrar diferentes



instrumentos de medición, los instrumentos se dividen en instrumentos de nivel, flujo, presión, temperatura, densidad y peso específico, viscosidad, entre muchos otros. Los diferentes instrumentos pueden estar situados en campo o en panel. Los instrumentos en campo incluyen instrumentos situados directamente en el proceso o en próximos a él, mientras que los instrumentos en campo se encuentran en paneles aislados de la zona del proceso.

Por los motivos mencionados anteriormente, resulta de gran importancia conocer los métodos adecuados de medición de variables para así, tener el conocimiento primario de cómo evitar, corregir y controlar las desviaciones en las variables en un proceso industrial. En este apartado se hace referencia a las variables de proceso seleccionadas para el prototipo, dichas variables: presión, flujo y temperatura, han sido seleccionadas por ser las que siempre se encuentran presentes un proceso industrial. En este capítulo de igual modo se hace mención del instrumento primario de medición que será utilizado para la medición de cada variable, seleccionado por su frecuente uso en la industria así como su bajo costo y universalidad.

#### 1.4.1 Presión

La presión es una de las magnitudes de mayor uso en la industria, dado que con ella es posible determinar el valor de diferentes variables de proceso como son: nivel, flujo y velocidad del aire con manómetros de presión diferencial, la razón de fugas y por supuesto la presión misma en sus diferentes tipos y alcances (Metas S.A. de C.V. Metrólogos asociados, 2002). La presión se define como la cantidad de fuerza ejercida sobre un área unitaria de una sustancia. Esto se establece en la ecuación 1.12.

$$P = \frac{F}{A} \quad (1.12)$$



Donde:

$$F = \text{fuerza}, \left[ \frac{N}{m} \right].$$

$$A = \text{área}, [m^2].$$

Blaise Pascal, un científico del siglo XVII describió dos importantes principios acerca de la presión, estos principios, en ocasiones llamados leyes de Pascal, se ilustran en la Figura 1.3.

1. La presión actúa uniformemente en todas direcciones sobre un pequeño volumen de fluido.
2. En un fluido confinado entre fronteras sólidas, la presión actúa perpendicularmente a la frontera.

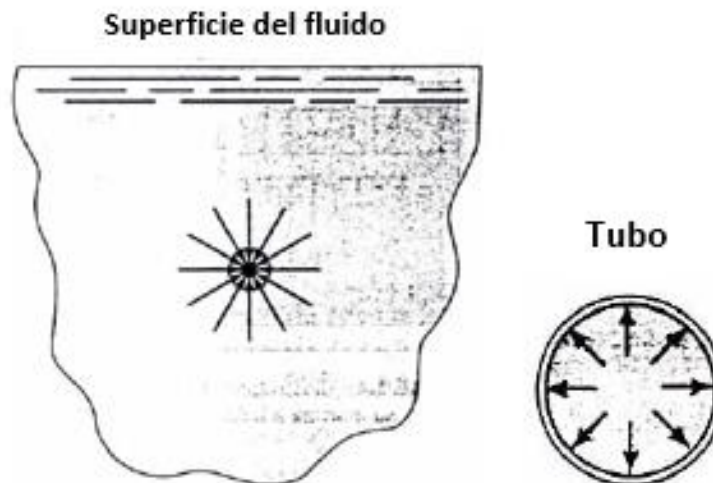


Figura 1.3 La presión actúa de manera uniforme en todas las direcciones sobre un pequeño volumen de fluido dirección de la presión de fluido sobre las fronteras de un tubo.

Aunque la unidad estándar de la presión en el sistema inglés es la libra pie cuadrada ( $lb/ft^2$ ) no se utiliza por ser considerada inconveniente. Las medidas de longitud más convenientes se hacen en pulgadas y la unidad libra por pulgada cuadrada



( $lb/pulg^2$  o  $psi$ ) se utiliza convenientemente para la unidad de presión. Otras unidades de presión son ( $N/m^2$ ) y el bar, medida utilizada en la mecánica de fluidos y termodinámica, definida como  $10^5$  Pa o  $10^5$  ( $N/m^2$ ).

#### 1.4.1.1 Tipos de presión

Al clasificar los tipos de presión se encuentran dos clasificaciones: la presión relativa, que tiene como punto de referencia la presión atmosférica y la presión absoluta, que tiene como referencia el cero absoluto de presión (Metas S.A. de C.V. Metrólogos asociados, 2002).

1. Presión atmosférica: es la presión que ejerce la atmosfera que rodea la tierra sobre todos los objetos que se hallan en contacto con ella. La presión atmosférica cambia con la altitud, a mayor altitud menor presión atmosférica, un aumento en la altitud de 1 000 m representa una disminución de presión atmosférica de aproximadamente 100 hPa.
2. Presión relativa: también conocida como presión positiva o manométrica (en inglés gauge pressure). Presión mayor a la presión atmosférica local, medida con referencia a la presión atmosférica.
  - La Presión diferencial es aquella que mide de la diferencia entre dos presiones A – B.
  - La presión estática es de gran importancia en el trabajo con fluidos, en las mediciones de presión en tuberías cerradas es común practicar un orificio pequeño y perpendicular a través de la pared de la tubería y conectar un manómetro, con lo cual se mide la presión estática.
  - La presión total es la suma de la presión estática y la presión de velocidad conocida también como presión de impacto o presión dinámica.



Cuando se realizan cálculos que implican la presión de un fluido, se debe hacer la medición en relación con alguna presión de referencia. Normalmente, la presión de referencia es la atmosférica, y la presión resultante que se mide se conoce como *presión manométrica*, una presión manométrica que esté por encima de la presión atmosférica es positiva, mientras que una presión manométrica que esté por debajo de la atmosférica es negativa, se le nombra en ocasiones *vacío*. La presión que se mide en relación con el vacío perfecto se conoce como *presión absoluta*, se entiende como vacío perfecto a la presión más baja posible. Por consiguiente, una presión absoluta siempre será positiva. Una relación entre estas presiones se muestra en la ecuación 1.13 (Mott, 1996).

$$P_{abs} = P_{manométrica} + P_{atm} \quad (1.13)$$

Existen muchos instrumentos de medición de presión, desde los más sencillos hasta las más recientes tecnologías. Algunos de ellos son el manómetro en U, el manómetro Bourdon, el manómetro inclinado y el manómetro de diafragma. El estudio de medición de presión para el prototipo, se centrará en el uso del manómetro de diafragma y el manómetro en U, esto debido a su versatilidad, fácil instalación y uso, además de bajo costo de adquisición y mantenimiento.

#### 1.4.1.2 Generalidades del Manómetro con Elemento Elástico

Los manómetros con elemento elástico se utilizan en gran medida para medir presiones en aplicaciones técnicas, debido a que son de gran durabilidad y de fácil manipulación. Estos manómetros incorporan elementos que se deforman elásticamente según la influencia de la presión y son fabricados con tubo Bourdon, diafragma, fuelle y elementos espirales, siendo diferentes según las necesidades.

Los materiales utilizados para hacer los elementos de medición suelen ser aleaciones de cobre, aleaciones de acero o con materiales específicos para cada aplicación. Cada uno de ellos varía en relación a los rangos de presión que pueden

medir, por ejemplo, mientras que un manómetro Bourdon mide presiones altas en psi, un manómetro de diafragma (Figura 1.4) puede medir bajas presiones en unidades de centímetros columna de agua o pulgadas de mercurio.



Figura 1.4 Manómetro de diafragma marca Metron.

#### 1.4.1.3 Principio de Funcionamiento del Manómetro de Diafragma

Los elementos de diafragma tienen láminas de forma circular y membranas onduladas. La presión se aplica en el centro de la membrana, la curvatura de la membrana es la medida de la presión. Existen los manómetros con diafragma vertical y diafragma horizontal. En la Figura 1.5 se muestra una vista frontal de las partes que componen un manómetro de diafragma vertical, mientras que en la Figura 1.6 se muestra una vista lateral de las mismas.

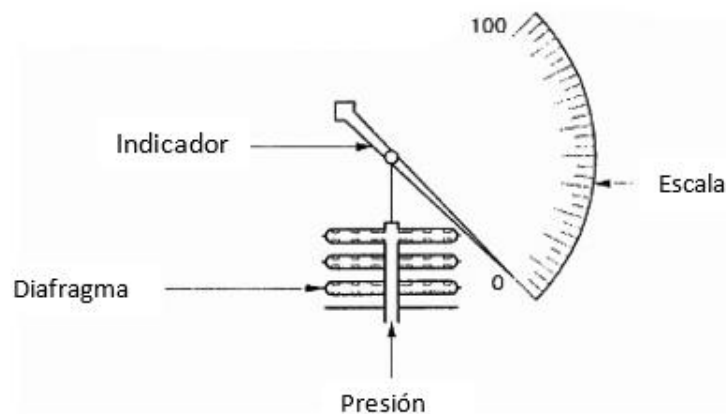


Figura 1.5 Partes que componen el manómetro de diafragma.

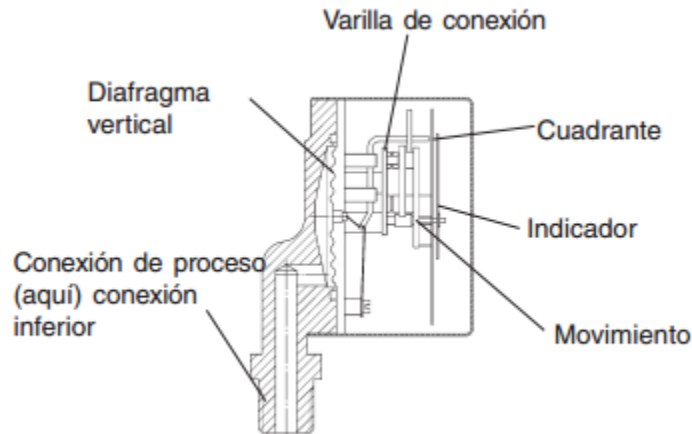


Figura 1.6 Partes que componen el manómetro de diafragma, vista lateral.

#### 1.4.1.4 Manómetro en U

El tipo más sencillo de manómetro es el de tubo en U, en donde, un extremo está conectado a la presión que se va a medir mientras que el otro se deja abierto a la atmósfera. El tubo contiene un líquido conocido como *fluido manométrico*, este no se mezcla con el fluido cuya presión se va a determinar, este fluido suele ser agua, mercurio y aceites ligeros coloreados (Mott, 1996).

Para realizar mediciones de presión estática, se practica un orificio pequeño perpendicular a través de la pared de la tubería y se conecta el manómetro. Para que el agujero no cause perturbaciones en la circulación del fluido, deberá ser suficientemente pequeño y no habrá succión por impacto. Si se hiciera una perforación en la tubería y se introdujera un tubo, de tal manera que el extremo abierto este de frente al sentido del flujo, y el otro extremo se conecta al manómetro en U, la presión medida excederá a la presión estática en una cantidad proporcional al peso específico del fluido y al cuadrado de su velocidad. Esta presión es la presión de velocidad, también llamada presión de impacto o presión dinámica.

Así mismo, si se practicaran dos agujeros paralelos a la tubería y se conectaran ambos extremos del manómetro dejando uno conectado al tubo sumergido en el fluido, se obtiene la presión total, es decir, la suma de la presión estática y la presión dinámica. La presión diferencial, es la diferencia entre las presiones estáticas en dos secciones de la corriente de flujo (Villalobos, 1999).

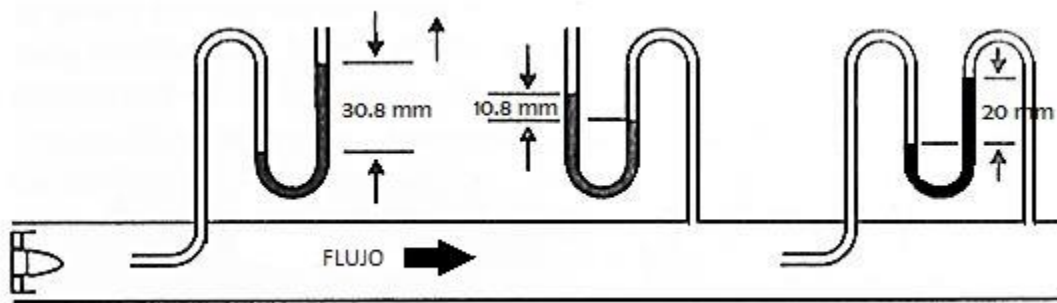


Figura 1.7 Medición de presión estática, presión de impacto y presión total.

#### 1.4.1.5 Golpes de Ariete

El golpe de ariete se produce cuando se cierra bruscamente un circuito de agua, ya sea por una válvula o grifo, esto genera ondas en el fluido a lo largo de la tubería y provoca sobrepresiones o pulsos de presión ocasionando fracturas en las tuberías además del daño a los instrumentos de medición y la reducción del ciclo de vida del instrumento. Los golpes de ariete no deben exceder el rango de aplicación de los manómetros. Se presentan por ejemplo cuando se monta el manómetro en bombas y se indican con grandes oscilaciones en las agujas indicadoras del manómetro.

Se puede reducir los golpes de ariete en los manómetros utilizando dispositivos protectores, esto aumenta significativamente el ciclo de vida del manómetro. Los elementos de amortiguación en el mecanismo de agujas retardan el movimiento de las agujas y llevan a un desgaste mayor en el mecanismo; llenar la caja con líquido



provoca una amortiguación del elemento de medición y reduce el desgaste de las piezas móviles.

#### 1.4.2 Temperatura

La sensación de calor o frío es una de las más comunes en los seres vivos y por tanto, el concepto de *temperatura* se origina en las ideas cualitativas de “frío” y “caliente”. El concepto de temperatura y su medición está presente en casi todas las actividades del ser humano. Puesto que el primer contacto con la medición de temperatura suele ser el termómetro casero, se suele creer que las aplicaciones de éste son exclusivas de tipo médico y de la determinación de la temperatura corporal de los enfermos. Sin embargo se requiere medir temperatura en forma adecuada para aplicaciones como farmacéutica, industria alimenticia, entre muchas otras.

En el caso de la temperatura, lo que se busca es tener un indicador del “*calor*” de un cuerpo. Sin embargo las definiciones de calor y temperatura claramente tienen significados diferentes. Se podría definir calor como una forma de energía asociada con una variable proporcional al movimiento molecular. Lo que se conoce como temperatura es realmente el valor de la lectura de un aparato de medición.

En 1742 Anders Celsius propuso una escala centígrada de temperatura basada en el agua con el cero en el punto de congelación y un valor de cien en el punto de ebullición. En 1854 William Thomson Kelvin propuso la unidad de temperatura nombrada en su honor que es ahora la unidad base de temperatura termodinámica o Kelvin que por su parte tiene su punto cero en el llamado *cero absoluto* y equivale a  $-273,16^{\circ}\text{C}$ ., aunque la escala más usada de temperatura es la escala Celsius (Rocío M. Marban, 2002).

Hoy en día existen diversos instrumentos de medición de temperatura que son aplicables en diferentes aspectos del día a día. El termómetro casero es el más conocido de los instrumentos de medición por expansión, pueden ser de mercurio,

de alcohol y algunos emplean gas. Los artefactos de resistencia conocidos como RTDs por sus siglas en inglés (resistance temperature detector) que varían su resistencia eléctrica al cambiar la temperatura. Los sensores o pirómetros ópticos que funcionan en base a la luz emitida por un objeto caliente relacionada directamente con la temperatura.

El termopar construido en base a diferentes metales y sus aleaciones, son exactos, robustos, confiables y de costo relativamente bajo. Aunque existen muchos otros instrumentos de medición de temperatura el estudio del proyecto se centra en los termopares debido a su universalidad, bajo costo y amplio rango de medición.

#### 1.4.2.1 Generalidades del Termopar

Un termopar es un dispositivo para la medición de temperatura basado en efectos termoeléctricos. Es un circuito formado por dos conductores de metales diferentes o aleaciones de metales diferentes, unidos en un extremo y entre cuyas uniones existe una diferencia de temperatura que origina una fuerza electromotriz (Figura 1.8). La fuerza electromotriz generada por un termopar está en función de la diferencia de temperatura entre la unión fría y caliente, se puede entender por unión caliente al punto en donde los metales se encuentran conectados y unión fría a las puntas de los metales que no están unidas entre sí (Metas S.A. de C.V. Metrólogos asociados, 2002).

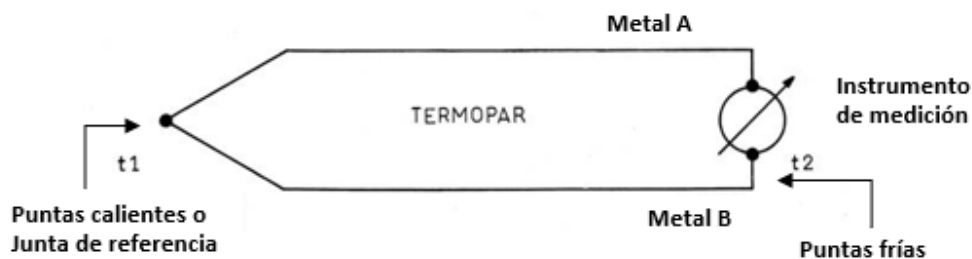


Figura 1.8 Partes que forman el termopar,  $t_1$  y  $t_2$ , temperatura 1 y temperatura 2 respectivamente.



Los termopares se fabrican de diferentes metales y sus aleaciones dependiendo del alcance de temperatura que se requiera medir y del tipo de proceso para el cual sean requeridos, algunos de los criterios de selección del termopar son el rango de temperatura, la resistencia química del termopar, resistencia a la abrasión y vibración y con las características generales de la instalación del proceso.

Tabla 1.2 Termopares de uso común.

TIPO	TERMOPAR	INTERVALO DE MEDIDA	ERROR MAX. (clase 1)	ERROR MAX. (clase 2)	ERROR MAX. (clase 3)	RANGO DE USO
B	Platino 30% Rodio (+) Platino 6% Rodio (-)	600 ... 1700 °C	-----	± 1,5°C ± 0,25%	± 4 °C ± 0,5%	1.370 °C 1.700 °C
E	Cromel (NiCr) (+) Constantan (-)	-40 ... 800 °C	± 1,5 °C ± 0,4 %	± 2,5°C ± 0,75%	± 2,5°C ± 0,75%	95 °C 900 °C
J	Hierro (+) Constantan (-)	-40 ... 750 °C	± 1,5 °C ± 0,4 %	± 2,5°C ± 0,75 %	-----	95 °C 760 °C
K	Cromel (NiCr) (+) Alumel (Ni) (-)	-40 ... 1.200 °C	± 1,5 °C ± 0,4 %	± 2,5°C ± 0,75 %	± 2,5°C ± 1,5 %	95 °C 1.260 °C
R	Platino 13% Rodio (+) Platino (-)	0 ... 1.600 °C	± 1 °C	± 1,5 °C ± 0,25 %	-----	870 °C 1.450 °C
S	Platino 10% Rodio (+) Platino (-)	0 ... 1.600 °C	± 1 °C	± 1,5 °C ± 0,25 %	-----	980 °C 1.450 °C
T	Cobre (+) Constantan (-)	-200 ...350 °C	± 0,5 °C ± 0,4 %	± 1 °C ± 0,75 %	± 1 °C ± 1,5 %	-200 °C 350 °C

Se ha estandarizado internacionalmente del código de colores para establecer uniformidad en la designación de termopares y cables de extensión por medio de colores en sus aislamientos así como para la identificación de su tipo, composición y polaridad, esto se rige actualmente por la norma ANSI/MC96.1-1992 y la IEC 584-3. La muestra los colores de los termopares más usados en las mediciones de temperatura. En la Tabla 1.2 se muestran diferentes tipos de termopares los más usados en la industria el “J” y “K”. Pueden consultarse los códigos de color para cada termopar según norma ANSI e IEC en el anexo 1.

Frecuentemente en la medición de temperatura en procesos industriales se utilizan sondas termopar, estas sondas constan de un termopar colocado en el interior de un tubo metálico, la pared de éste tubo se conoce como vaina. Los materiales más comunes de la vaina son acero inoxidable e Inconel, aunque éste último soporta temperaturas más elevadas, se prefiere el uso del acero inoxidable debido a su compatibilidad química.

La punta de la sonda termopar puede ser de tres modos diferentes: aterrizada, aislada y expuesta. En una unión expuesta, la punta del termopar sobresale fuera de la vaina. Los termopares de unión expuesta son los más adecuados para la medición de aire. La punta aterrizada está en contacto con la pared de la vaina y facilita la medición, pues proporciona un tiempo rápido de respuesta, mientras que la punta aislada está separada de la vaina por una capa de material aislante. En la Figura 1.9 se muestran las diferentes puntas de la vaina de una sonda termopar (OMEGA, 2016).



*Figura 1.9 Puntas en una sonda termopar.*

#### 1.4.2.2 Principio de Funcionamiento de un Termopar

El físico y médico alemán Thomas Johann Seebeck (1779 – 1831), descubrió entre 1821 y 1822 la termoelectricidad y la pila termoeléctrica. Descubrió el efecto que lleva su nombre, él descubrió que si unía una lámina de cobre con otra de bismuto en un circuito cerrado, al calentar una de las uniones se genera una corriente eléctrica, es decir una fuerza electromotriz, que circula por el circuito en tanto continúe la diferencia de temperaturas. Éste fenómeno (efecto Seebeck Figura 1.10)

ha sido ampliamente utilizado en la creación de dispositivos para la medición de temperatura con gran precisión y sensibilidad como es el caso del termopar.

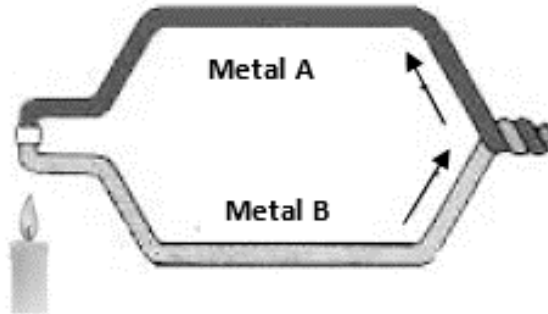


Figura 1.10 Representación gráfica del efecto Seebeck.

Para explicar más a detalle el principio de funcionamiento del termopar, se debe imaginar una simple barra de metal (Figura 1.11). Es importante recordar que la composición de este material incluye electrones, si esta barra se somete a una fuente de calor que eleve su temperatura, provocará que dichos electrones se muevan hacia el punto más frío de la barra generando la vibración y movimiento de las partículas produciendo una tensión medible para los circuitos abiertos y una corriente para los circuitos cerrados.

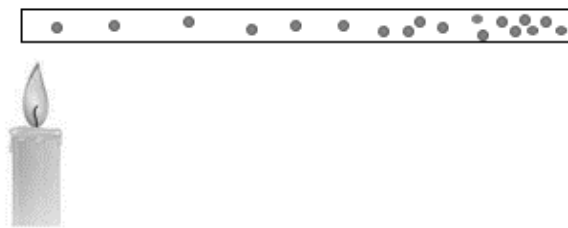


Figura 1.11 Principio de funcionamiento del termopar.

La magnitud de la fuerza electromotriz (FEM) depende de los materiales de los conductores utilizados por el termopar y de sus condiciones metálicas. Los cambios en la composición del material causados por la contaminación, mecanismos

extraños o choques termales influyen y modifican la FEM. Con el tiempo y el uso, la degradación del termopar es inevitable, por lo que debe ser establecido un esquema de calibración inicial, verificaciones regulares y reemplazo eventual (Metas S.A. de C.V. Metrólogos asociados, 2002).

### 1.4.3 Flujo

En los fluidos puede producirse un movimiento relativo de las moléculas o átomos que forma parte de la estructura interna del fluido tanto en movimiento como en reposo. El movimiento de fluidos que circula por una trayectoria concreta se denomina flujo interno, puesto que la circulación de fluidos se produce dentro del interior de conductos o cauces (I. Martín, 2011).

En la mayor parte de las operaciones realizadas en los procesos industriales y en las efectuadas en laboratorios y plantas piloto, es muy importante la medición de caudales de líquidos y gases. Existen dos tipos de medidores de flujo: los volumétricos que determinan el caudal en volumen de fluido (Figura 1.12), y los de masa que determinan el caudal másico. El uso de los medidores volumétricos está destinado a la medición de flujo en general mientras que los másicos a las aplicaciones que requieren de una mayor exactitud. En la Figura 1.13 se puede observar la clasificación de los medidores de flujo volumétricos.

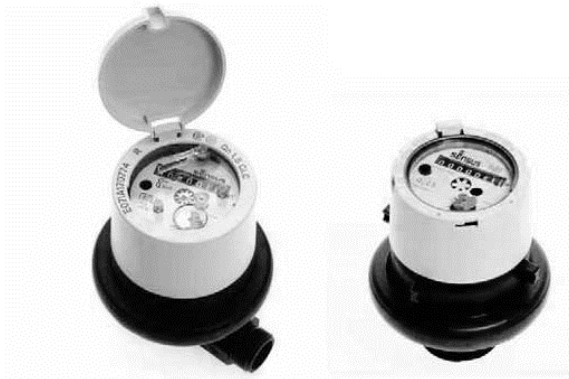


Figura 1.12 Medidores volumétricos

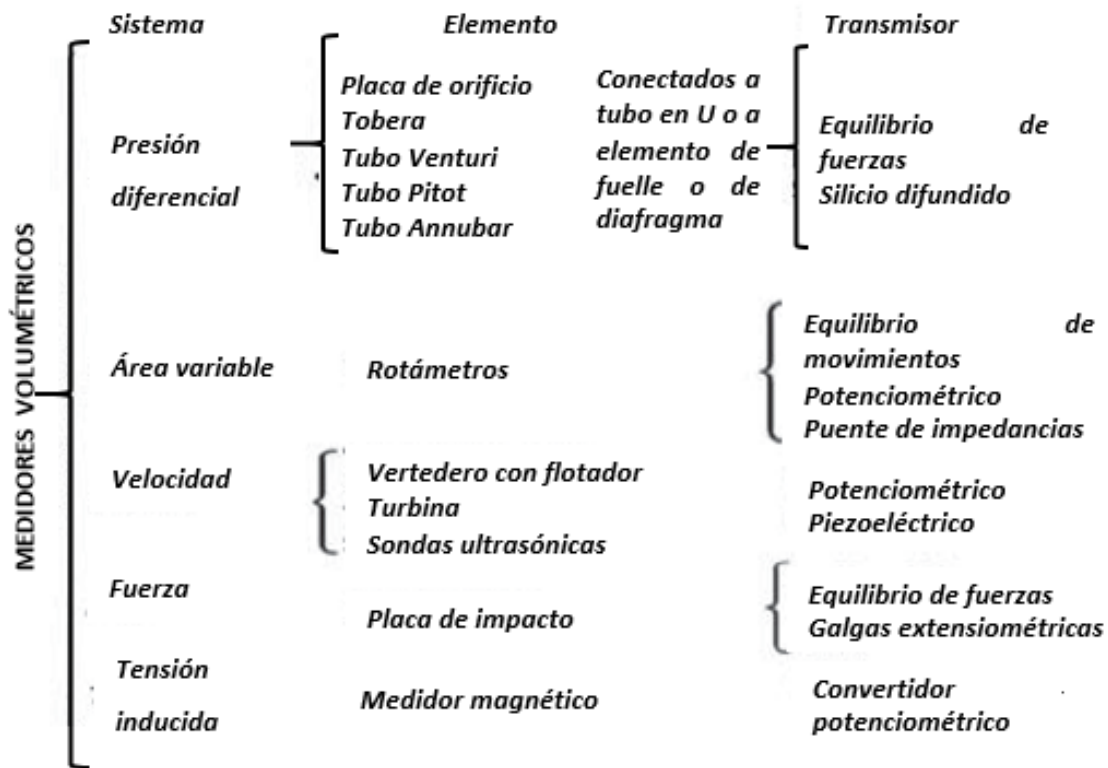


Figura 1.13 Clasificación de los medidores volumétricos

### 1.4.3.1 Generalidades de la Placa de Orificio

Para poder hacer uso eficiente de la placa de orificio en la medición de flujo, es necesario conocer sus características y saber el correcto manejo y funcionamiento de ésta. Para poder utilizarlo con eficiencia, se deben conocer las características del sitio de medición, estas se muestran a continuación:

1. Características de la tubería, como son diámetro de la tubería y diámetro del orificio. Este método de medición aplica únicamente para fluidos que fluyen a través de una sección transversal de tubería circular.
2. De acuerdo a cada caso se hace una evaluación para comprobar que la instalación sea correcta o bien, que éste medidor sea adecuado para la instalación.

La placa de orificio (Figura 1.14) es uno de los dispositivos de medición más antiguos, fue diseñada para usarse en gases, sin embargo, su aplicación se ha ampliado para usarse exitosamente en la medición del flujo de agua en tuberías.



*Figura 1.14 Placa de orificio.*

En 1991 se establecieron las características geométricas, reglas de instalación y operación de este dispositivo mediante la aportación de ingenieros de todo el mundo. Como resultado se obtuvo la norma internacional ISO 5167-1 que se aplica actualmente en México, es de suma importancia respetar las reglas que ahí se establecen para que las inspecciones y mediciones realizadas sean confiables.

La placa de orificio es un elemento primario puesto que se localiza dentro de la tubería del proceso, ésta es una placa delgada y plana, que va desde 1/8 de pulgada hasta 3/8" de pulgada de espesor, con una perforación circular que puede tener diferentes posiciones en relación con el centro de la tubería, esta posición puede ser concéntrica, excéntrica o segmentada (Figura 1.15). Las especificaciones técnicas para la construcción de la placa de orificio se mencionan más detalladamente en el capítulo 3.



Figura 1.15 Diferentes perforaciones de la placa de orificio

La placa se construye de acero inoxidable 316 para garantizar su dureza. Las placas de orificio concéntricas son las más comunes, además de que son las utilizadas para la medición de flujos, mientras que las excéntricas son usadas para gases y las segmentadas para los flujos que contengan cierta cantidad de sólidos y gases.

Para realizar la medición de la presión en la tubería se utilizan instrumentos secundarios de medición puesto que se localizan fuera de la tubería, esta operación se realiza con las tomas de presión. Para medir la presión se colocan dos tomas de presión una aguas abajo (después de la placa de orificio) y una aguas arriba (antes de la placa de orificio) como se muestra en la Figura 1.16.

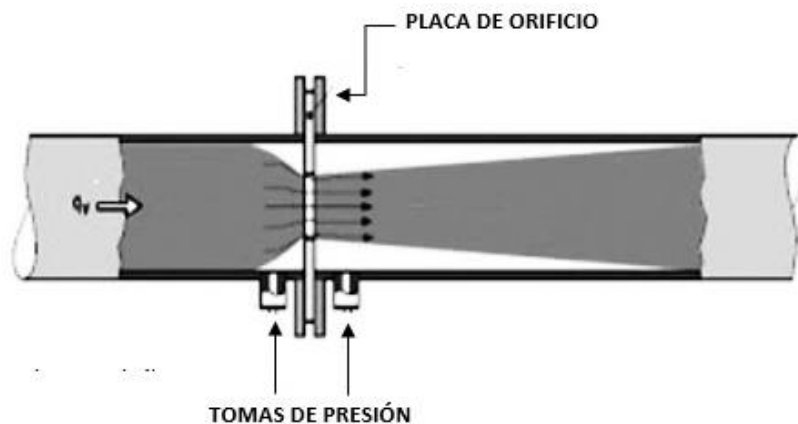


Figura 1.16 Tomas de presión antes y después de la placa de orificio

## 1.4.3.2 Principio de Funcionamiento de la Placa de Orificio

En cualquier tubería por la que circula agua, la presión aumenta cuando la velocidad disminuye y la presión disminuye cuando la velocidad aumenta, la placa de orificio produce un aumento en la velocidad y por lo tanto una disminución en la presión. En la Figura 1.17 se puede observar un corte transversal del instrumento de medición; si imaginamos que el flujo del agua en la tubería no tiene ningún tipo de obstrucción, la velocidad de ese flujo no varía de un punto de la tubería a otro.

En el punto "C" se ha colocado una placa de orificio, lo que provoca que el agua choque con la placa y exista una disminución de la velocidad. Debido al choque y a la reducción de la velocidad, justo antes del punto "B" se produce un incremento en la presión que será ligeramente mayor a la presión de operación o al punto "A".

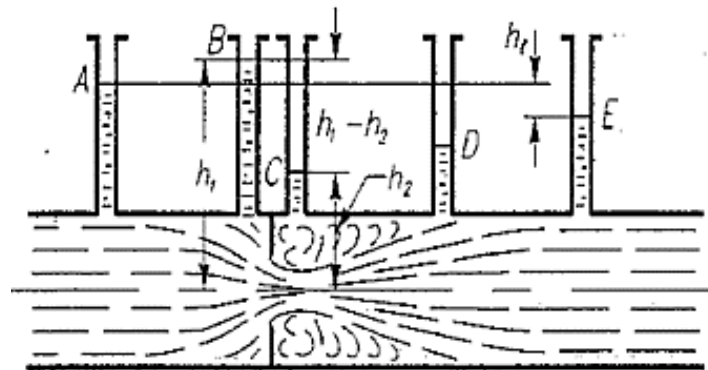


Figura 1.17 Corte transversal de la tubería con la placa de orificio.

Cuando el flujo de agua pasa por la placa de orificio, experimenta una reducción de área que será compensada con el incremento de la velocidad, esto producirá una disminución en la presión llegando a su mayor valor cuando la velocidad alcanza su máximo punto. Poco después de la placa de orificio, punto "D", el flujo se dispersa y se produce nuevamente una reducción en la velocidad y un aumento en la presión. Después de la placa de orificio, punto "E", se recupera la velocidad del flujo de agua





en la tubería. En la Figura 1.17 se denomina  $h_1$  a la presión aguas arriba de la placa de orificio, mientras que se denomina  $h_2$  para la presión aguas abajo. La diferencia de estas dos presiones está dada por  $h_1-h_2$  y se conoce como presión diferencial ( $h$ ) (CONAGUA, 1994).

## **CAPÍTULO 2**

# **DESCRIPCIÓN DE LA PROBLEMÁTICA Y PROPUESTA DE SOLUCIÓN**

En el capítulo 2 se describe la propuesta de solución así como la problemática y por qué se propuso la elaboración del prototipo como mejor alternativa de solución. Se muestra un diagrama causa efecto y un diagrama de pescado para determinar la causa del problema. De igual modo se muestran las alternativas de implementación del prototipo.



## 2.1 PLANTEAMIENTO DE LA PROBLEMÁTICA

La carrera de ingeniería en control y automatización del IPN tiene por objetivo formar profesionales que atiendan principalmente los sectores productivos y que tengan la capacidad de diseñar, innovar, dirigir y mantener equipos tomando en cuenta la calidad del proceso de trabajo y el uso eficiente de la energía y de los recursos naturales. Dentro del marco académico se presentan cursos que tienen por objetivo incrementar el conocimiento de los dispositivos de medición para así, seleccionar el instrumento adecuado dentro del entorno industrial para el análisis y control de las distintas variables de proceso.

El uso de instrumentos de medición de variables, se remonta hasta hace ya varios años con descubrimientos de grandes físicos, como el principio de funcionamiento del manómetro Bourdon descubierto en 1846 en Alemania por Schinz, el principio de funcionamiento del termopar en 1821 en Alemania por el físico Seebeck o inclusive el efecto Doppler descubierto en 1842 por el físico Christian J. Doppler que es el principio de funcionamiento de los instrumentos de medición ultrasónicos.

Hoy en día, las grandes industrias de procesos industriales que implementan sistemas de control y automatización, cuentan con la tecnología más avanzada dentro de cada uno de sus procesos, sin embargo, esto es siempre sin dejar de lado los principios de funcionamiento de los instrumentos de medición más básicos. Dentro de la institución, se cuenta con gran cantidad de equipo automático como son PLCs, PACs, variadores de frecuencia, computadores, simuladores de programación escalera, entre otros. Se puede observar que existe prioridad en el uso de estos equipos, sin considerar los elementos más básicos de medición dentro del entorno industrial o brindándoles poca atención y tiempo.

Los procesos industriales a controlar pueden dividirse ampliamente en dos divisiones siendo continuos y discontinuos. En ambos casos se deben mantener las variables como son presión, caudal, nivel, temperatura, etc, ya sea en un valor fijo



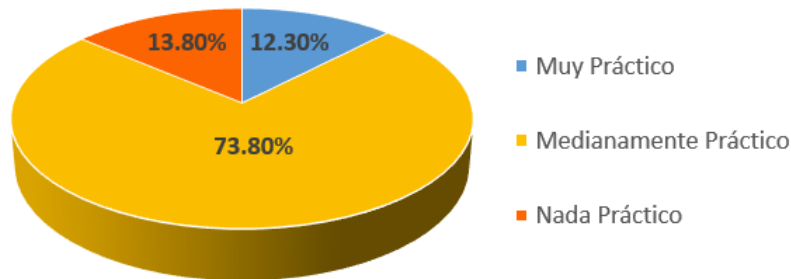
o en un valor variable con el tiempo. Para mantener estas variables, se debe comparar su valor o condición a controlar deseada y tener, para empezar, un instrumento de medición.

En muchas ocasiones el equipo necesario para realizar prácticas de laboratorio de procesos industriales (elementos primarios y secundarios de medición) no se encuentra disponible o es insuficiente para la cantidad de alumnos con los que cuenta la institución y por tanto resulta imposible la elaboración de estas actividades.

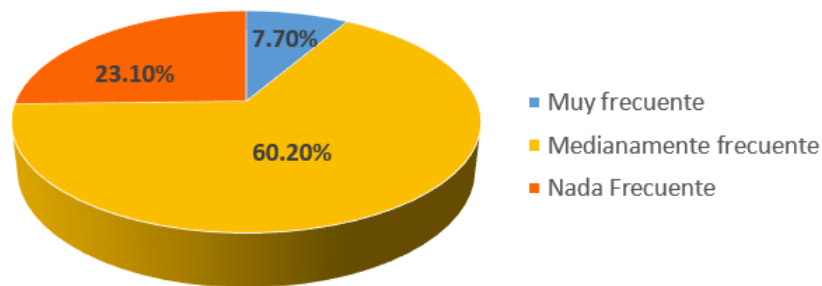
En algunas otras situaciones, el equipo que se encuentra disponible para los estudiantes, es almacenado por largos periodos de tiempo y no se utiliza debido a la poca información que poseen los alumnos con respecto al préstamo del material y porque ignoran que el equipo puede solicitarse y utilizarse. Aunado a esto el equipo con el que se cuenta es de alto costo de adquisición y por tal motivo no se pone a disponibilidad del estudiante sin supervisión, eso dificulta de igual forma su uso.

Todo esto dificulta el aprendizaje práctico del estudiante, generando la falta de conocimiento en el uso de los elementos primarios y secundarios de medición, localizados en toda el área de procesos industriales. Esto va muchas veces desde los conocimientos más básicos requeridos en el control de procesos y pone en una situación compleja al estudiante cuando éste intenta incorporarse al sector industrial.

En una encuesta realizada a 63 alumnos del Instituto Politécnico Nacional, específicamente de la carrera de Ingeniería en Control y Automatización de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, acerca de las prácticas de laboratorio, la frecuencia de las mismas a lo largo de la duración de la carrera y la importancia que tienen en el campo laboral, se obtuvieron los resultados mostrados a continuación.

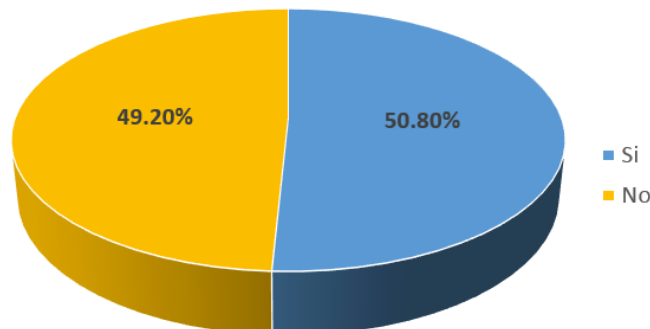


Gráfica 2.1 ¿Qué tan práctico consideras que es el programa de estudios de la institución?



Gráfica 2.2 ¿Qué tan frecuente realizas prácticas de laboratorio que consideres serán de utilidad dentro del entorno industrial?

Cuando se les cuestionó a los estudiantes acerca de si realizaban prácticas de laboratorio con instrumentos primarios y secundarios de medición, que consideraran realmente aplicables dentro del entorno industrial casi el 50% de ellos respondió de forma negativa.



Gráfica 2.3 ¿Has realizado prácticas, que consideres realmente importantes para el entorno industrial, con equipo de medición de variables de procesos?

### 2.1.1 Determinación de la Causa, Diagrama de Árbol

Uno de los Métodos aplicables y realmente flexible para el análisis y solución de problemas es el “Diagrama de Árbol”, en él se realizó la identificación del problema localizado en el centro del árbol, la identificación de las posibles causas del problema (localizadas en la parte inferior) y los efectos que este problema conlleva (parte superior del árbol) (Figura 2.1). Posterior a esto, se han definido los objetivos que se quieren lograr así como la corrección de las causas de la problemática y la redundancia si existiera, para esto se cambia la situación esperada a una situación positiva.

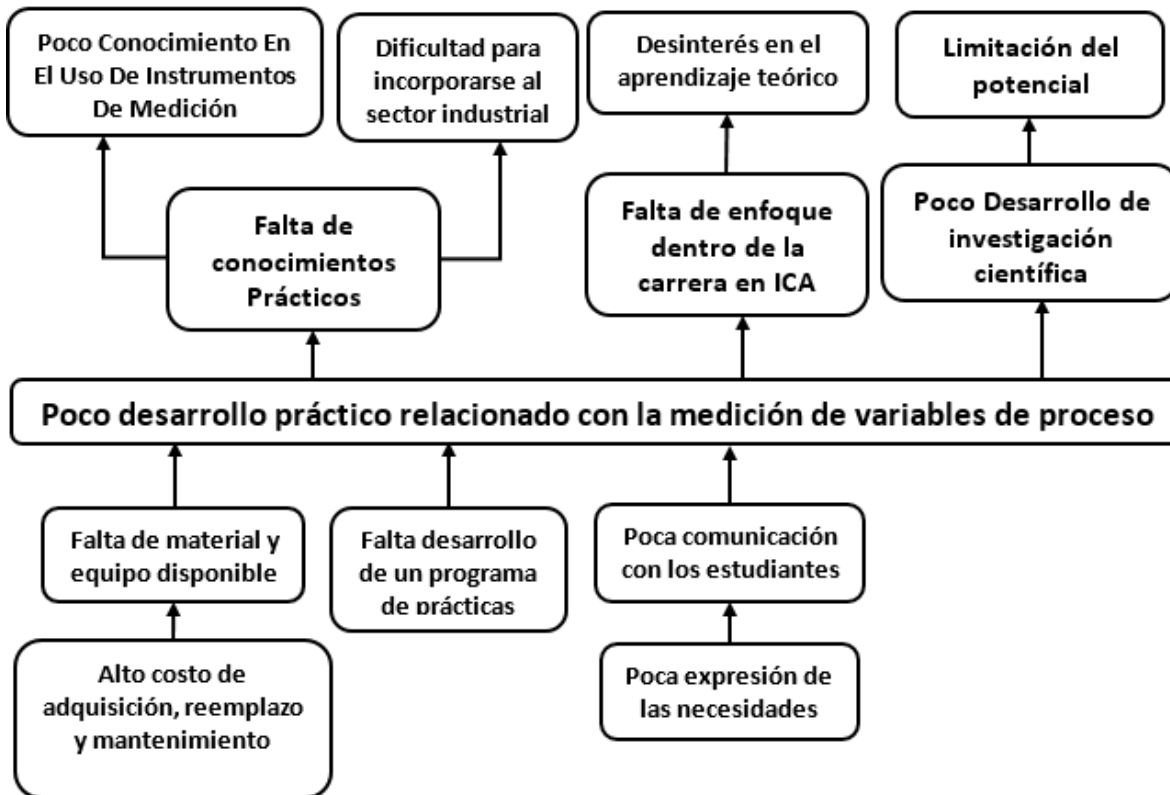


Figura 2.1 Árbol de análisis de la problemática.



Figura 2.2 Análisis de objetivos y corrección de las redundancias.

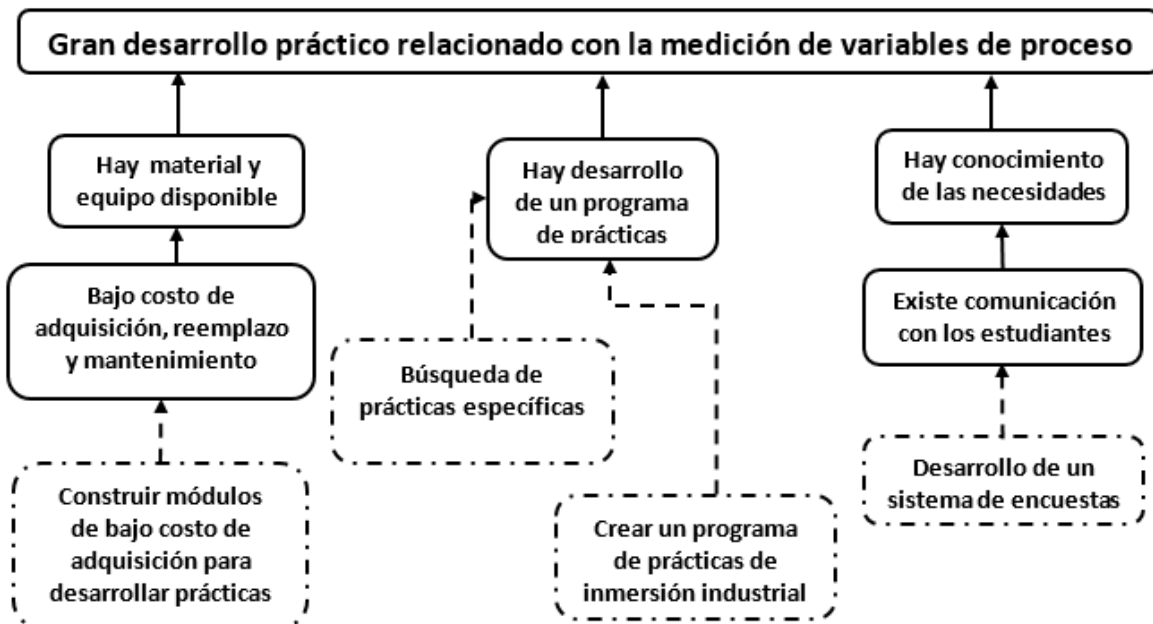


Figura 2.3 Formulación de las acciones.

2.1.2 Diagrama de Ishikawa, Diagrama Causa-Efecto

El diagrama de causa y efecto (Figura 2.4), fue desarrollado por el Dr. Kaoru Ishikawa egresado como ingeniero de la Universidad de Tokio, dicho diagrama, sirve para ilustrar de forma racional, las relaciones entre la causa y el efecto inherentes a un problema. Puede ser aplicado en áreas como Control de la producción, educación, investigación, desarrollo, entre otras. Tiene como objetivo detectar las causas de los efectos que nos provocan problemas. Si no se conoce la relación entre la causa y el efecto, que nos provoca un problema, no se podrán tomar medidas para resolver el problema ni las acciones contra la causa. El diagrama, es una herramienta que permite identificar claramente, las causas sobre las cuales se pueden o deben tomar acciones correctivas.

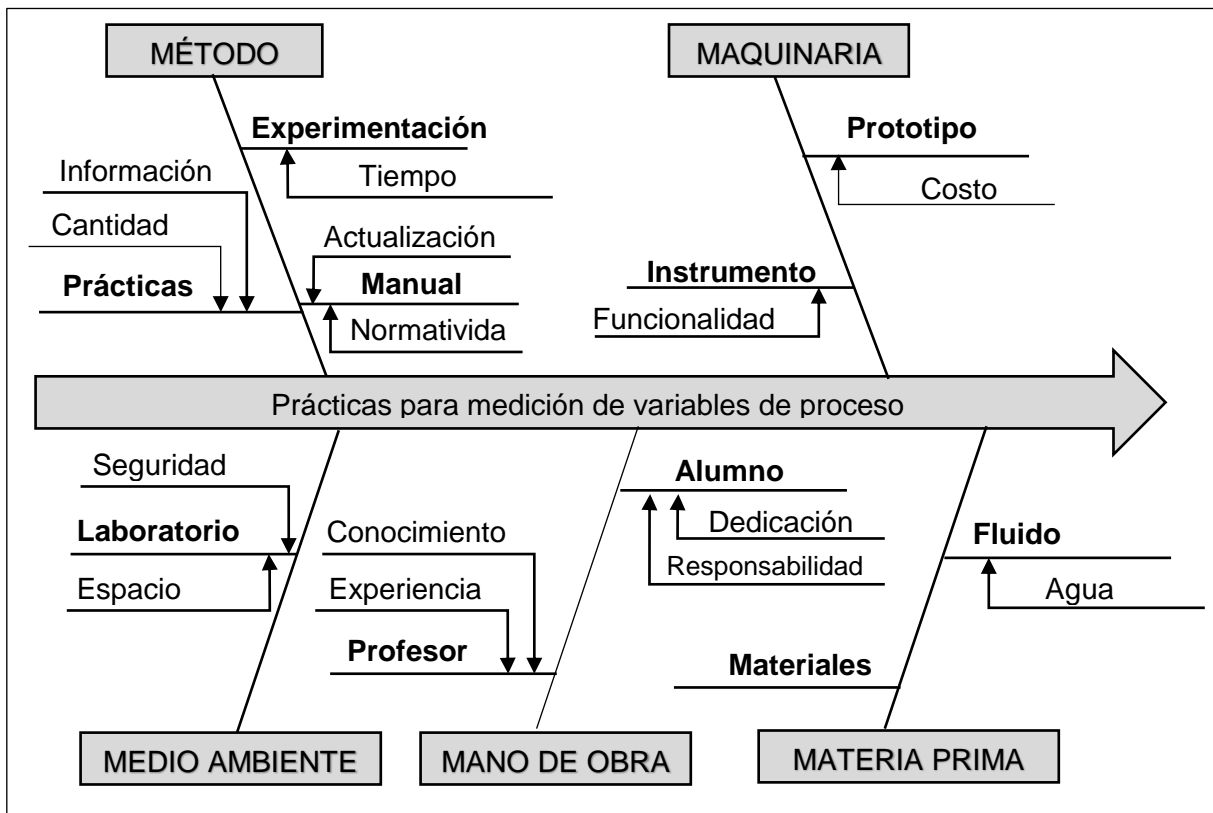


Figura 2.4 Diagrama Causa-Efecto.





### 2.1.3 Alternativas de Solución

En la Tabla 2.1 se muestran las alternativas de solución seleccionadas y la forma en la que estas pueden ser llevadas a cabo.

*Tabla 2.1 Alternativas de solución.*

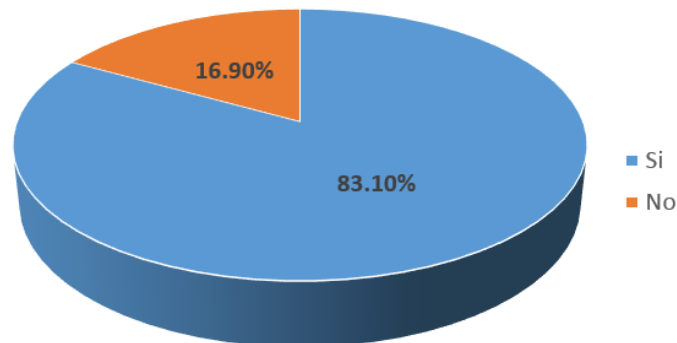
<b>Construir módulos de bajo costo de adquisición para desarrollar prácticas</b>	1. Búsqueda de material económico o de segunda mano
	2. Búsqueda de proveedores con precios preferenciales a grupos universitarios o estudiantes
	3. Creación de convenios con grandes empresas distribuidoras y productoras de material y equipo de medición industrial
<b>Desarrollo de un sistema de encuestas</b>	1. Comunicación con los estudiantes para conocer las necesidades.
	2. Cuestionar acerca de las carencias y oportunidades de mejora para las instalaciones de laboratorios de prácticas dentro de la institución.
	3. Brindar la oportunidad de expresión mediante comentarios y opiniones.

Posterior a la exposición del problema y las alternativas de solución, se ha llegado a la conclusión de que la mejor forma de resolver el problema es suministrar más equipo y material que contribuya al desarrollo de prácticas dentro de los laboratorios de control de procesos industriales. Así como realizar una serie de encuestas para conocer las necesidades mayoritarias de los estudiantes de la carrera de ingeniería en control y automatización.

Esto beneficiaría a la mayoría de los estudiantes y proporcionaría una idea clara de cuáles son los aspectos a mejorar y las carencias con las que cuentan las instalaciones para el desarrollo de prácticas de laboratorio. La elaboración de este prototipo o módulo de prácticas de medición de variables de procesos podría generar y motivar a la elaboración proyectos de investigación e innovación dentro del control de procesos industriales y la automatización de los mismos.

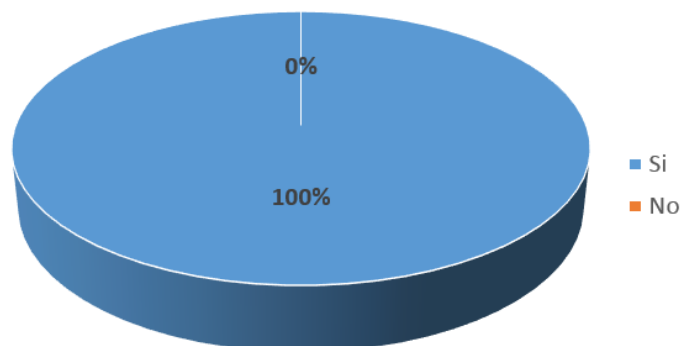
#### 2.1.4 Implementación del Proyecto

Dentro de la encuesta anteriormente mencionada, se les preguntó a los estudiantes que tan importante consideraban la elaboración de prácticas, que pudiesen darles una noción de la problemática a resolver dentro del entorno productivo. El 83.1% es decir 54 encuestados contestaron que era importante.



Gráfica 2.4 ¿Qué tan importante consideras la elaboración de prácticas?

La última pregunta que se realizó a los 65 estudiantes fue sobre la necesidad de incrementar el material disponible en los laboratorios. Los 65 estudiantes respondieron que era importante incrementar la cantidad de material para la elaboración de prácticas.



Gráfica 2.5 ¿Consideras importante incrementar la cantidad de material y equipo de laboratorio disponible?

Tomando en cuenta los resultados anteriores se puede llegar a la conclusión de que la construcción de un prototipo de prácticas y la instrucción en la construcción del mismo, sería un gran apoyo para la elaboración de mediciones con equipo primario y secundario de medición. Las prácticas realizables en este prototipo pueden ser variadas y algunas de ellas se mencionan en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Propuesta de prácticas para trabajar en el prototipo.

Nombre de la práctica	Fuente	Descripción
Calibración de la placa de orificio: método de pesado	ISO 4185:1980; <u>Measurement of liquid flow in closed conduits: weighing method</u> ; 1993	Se especifica un método para la medición de flujo de líquidos en conductos cerrados mediante el pesado del líquido entregado en un tanque o depósito en un intervalo de tiempo.
Calibración del termopar	EAL-G31; <u>“Calibration of thermocouples”</u> ; Octubre, 1997	Brinda un asesoramiento básico para la realización de la calibración de termopares en laboratorios. Válido para termopares de tipo estandarizado cubriendo rangos de temperatura entre -200 °C a +1600 °C
Medición de flujo de fluidos incompresibles mediante placa de orificio	CONAGUA; <u>PLACA DE ORIFICIO</u> ; ISBN 968-7417-70-6; México	Establece los requisitos básicos de construcción e instalación del medidor de orificio, así como una guía para la medición de flujos de fluidos líquidos.
Obtención del perfil de velocidades usando tubo pitot	Universidad de Navarra; <u>“Práctica de laboratorio1: Caudalímetros y tubo de pitot”</u> ; 2007-2008  CONAGUA; <u>“Tubo Pitot”</u> ; ISBN 968-7417-69-2; México.	Se estudia el funcionamiento de los caudalímetros de Presión diferencial y Tubo de Pitot.  Dirigido a Técnicos, ingenieros u operadores que estén trabajando con tubos Pitot, para instruirlos en la instalación, uso y manejo adecuado del instrumento.
Cálculo de incertidumbre en la medición de flujo másico mediante placa de orificio	Arias Romero Roberto, CENAM; <u>Incertidumbre en la medición de flujo másico mediante una placa de orificio</u> ; México, Querétaro, 2001	



## 2.2 DESCRIPCIÓN TÉCNICA DE LA ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN

La idea principal del proyecto consiste en construir un sistema de tuberías que incorpore elementos primarios y secundarios de medición y trabajo con flujos de fluidos incompresibles. Se ha llegado a la conclusión de que el sistema de tuberías y los elementos que lo componen deberán cumplir con algunas características como son:

1. Bajo costo de adquisición.
2. Fácil montaje y desmontaje.
3. Universalidad en la medición de variables y uso en procesos industriales.
4. Fácil y económico mantenimiento.

Se pretende incorporar elementos de medición de flujo, medición de temperatura y medición de presión. Se ha pensado en analizar estas variables ya que se encuentran siempre presentes en el entorno industrial y resulta de gran importancia conocer el proceso de medición y análisis básico de estas. El fluido con el que se considera mejor realizar las prácticas es con agua limpia, sin embargo, es posible realizar las prácticas, así como pruebas y mediciones con otros fluidos compresibles e incompresibles, tales como son gases, aceites entre algunos otros.

Los instrumentos con los que se considera viable trabajar son manómetro de diafragma para medir la presión en la tubería, placa de orificio para medir el flujo del fluido y el uso de un termopar para medir la temperatura del fluido. La Tabla 2.3, Tabla 2.4 y Tabla 2.5 muestran las ventajas y desventajas de los instrumentos de medición sugeridos para hacer las mediciones pertinentes.

Tabla 2.3 Tabla de ventajas y desventajas de uso para el manómetro de diafragma.

MANÓMETRO DE DIAFRAGMA	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
Bajo costo de adquisición	Fallas mecánicas por sobrepresión
Gran versatilidad en su aplicación, se puede usar para gases y líquidos.	
Gran cantidad de características según las necesidades de la aplicación (medio ambiente, características del fluido, etc.)	Sensible a las vibraciones
Fácil instalación	
Facilidad en el uso y lectura de la variable	Sensible a explosiones, ambientes corrosivos y temperaturas extremas.
Gran rango de medición, además de adaptable dependiendo de las condiciones del proceso	

Tabla 2.4 Tabla de ventajas y desventajas de uso para la placa de orificio.

PLACAS DE ORIFICIO	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
Facilidad de instalación	No se puede usar para flujos con partículas en suspensión
Bajo costo	No puede usarse para fluidos con altas viscosidades
Facilidad de uso	La placa se desgasta debido al flujo continuo
Diseño y fabricación poco complejo	
Medición precisa y fiable	Requiere de condiciones especiales en la tubería para su instalación
Se puede usar para la mayoría de las aplicaciones de gas, líquido y vapor, así como para alta temperatura y alta presión	
Es el instrumento de medición de flujo más usado	Requiere limpiezas regulares debido a las partículas de fluido que pudieran quedar en ella.

Tabla 2.5 Ventajas y desventajas del uso del termopar.

TERMOPAR	
VENTAJAS	DESVENTAJAS
Tamaño reducido	Debe realizarse una calibración y mantenimiento constante
Rapidez de lectura	
Facilidad en la instalación	Poca precisión
Amplio rango de medición	
Bajo costo de adquisición	Sensibilidad a los cambios de temperatura en la punta de referencia durante la medición
Se puede extender varios metros con cables de compensación	
Alta resistencia a las vibraciones	

### 2.2.1 Diagrama del Sistema

El sistema es un circuito cerrado (Figura 2.5) formado por una bomba conectada a la salida del contenedor “A” para suministrar el líquido, haciendo pasar el fluido por el termopar, que se encargará de medir la temperatura, y la placa de orificio para producir la diferencia de presión.

La presión antes y después de la placa de orificio será medida mediante la implementación de manómetros de diafragma para baja presión con escala en centímetros columna de agua. Las válvulas 1 y 2 serán utilizadas para regular el flujo del fluido en la tubería y a su vez como aislantes para los instrumentos de medición en caso de requerir cambio o modificación, redirigiendo el flujo del fluido hacia las válvulas 3 y 4. El agua finalmente se descarga al contenedor B recirculando por gravedad al contenedor A. La válvula colocada a la salida del

contenedor B podrá ser utilizada para almacenar cantidades de agua y realizar mediciones volumétricas del fluido.

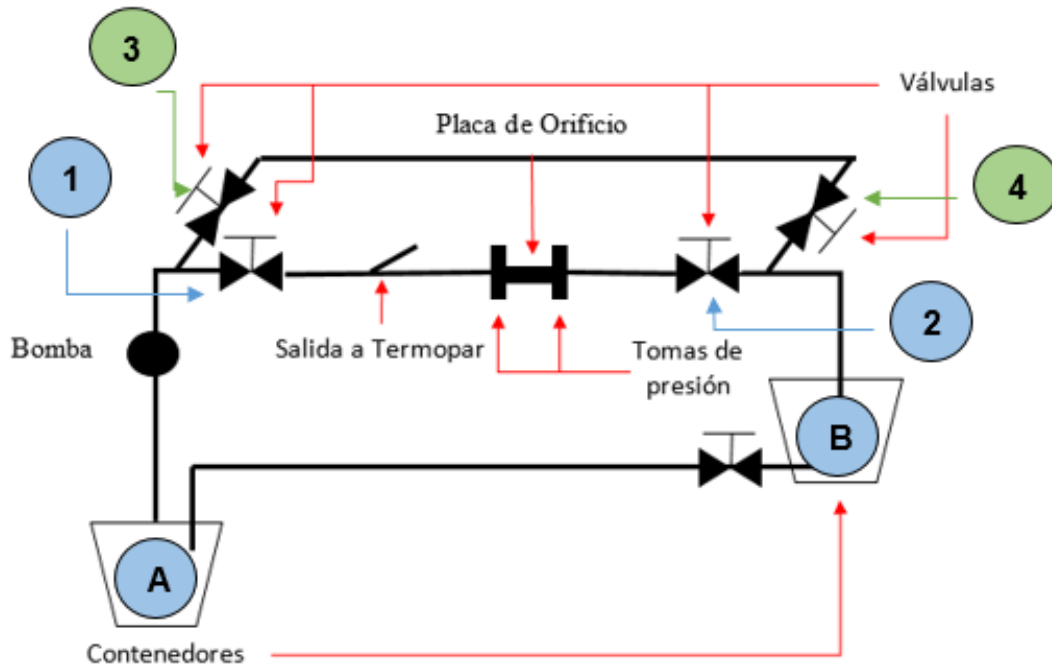


Figura 2.5 Diagrama del sistema.

# **CAPÍTULO 3**

## **DESARROLLO DE LA CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO**

En el presente capítulo se muestran los cálculos realizados para obtener las características propias del flujo y del fluido de trabajo. Se muestran los cálculos y datos empleados para diseñar la placa de orificio en base a la norma ISO 5167 y el método de fabricación de las misma. Así mismo se describen los elementos de medición utilizados, las características de construcción del prototipo y las medidas con las que se realizó el mismo en base a las diferentes normas aplicables a los instrumentos de medición.





### 3.1 CÁLCULOS GENERALES DE LOS PARÁMETROS DEL FLUIDO

A continuación se calcula la velocidad máxima a la que debería circular el fluido por la tubería, si se desea tener un flujo laminar, es decir, un número de Reynolds menor a 2000. La Tabla 3.1 muestra los valores de velocidad deseados para diferentes valores del  $R_e$ . Utilizando la ecuación 1.10 se despeja la velocidad obteniendo la ecuación 3.1.

$$\frac{R_e \mu}{D \rho} = V \quad (3.1)$$

Tabla 3.1 Cálculo de la velocidad máxima deseada en la tubería

Diámetro de la tubería [m] = 0.0254	
Viscosidad dinámica del agua (21° C) = 0.000979 kg/m s	
Densidad del agua (21° C) = 998 kg/m <sup>3</sup>	
Número de Reynolds	Velocidad del fluido [m/s]
2000	0.0785
1950	0.0765
1900	0.0746
1850	0.0726
1800	0.0706
1750	0.0687
1700	0.0667
1650	0.0647
1600	0.0628
1550	0.0608
1500	0.0589



Para calcular el caudal volumétrico en la tubería se utiliza la ecuación 3.2.

$$Q = AV \quad (3.2)$$

Donde:

$$Q = \text{flujo volumétrico, } \left[ \frac{m^3}{s} \right].$$

$$A = \text{Área transversal en la tubería, } [m^2]$$

$$V = \text{velocidad promedio del fluido, } \left[ \frac{m}{s} \right].$$

$$A = 0.000507 \text{ m}^2$$

$$Q = 0.000507 \text{ m}^2 * 0.0785 \frac{m}{s} = 0.00004 \frac{m^3}{s}$$

$$Q = 40 \frac{cm^3}{s} = 4 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s}$$

Si esto es convertido a litros, se obtiene:

$$4 \times 10^{-5} \frac{m^3}{s} \left( \frac{60\,000 \frac{l}{min}}{1 \frac{m^3}{s}} \right) = 2.4 \frac{l}{min}$$



La conversión anterior muestra los litros máximos por minuto que se supone, deberían fluir por la tubería a una velocidad deseada para un número de Reynolds igual a 2000 y tener por consecuencia un flujo laminar. Es importante observar que para trabajar con flujos laminares, la velocidad de trabajo debe ser en extremo pequeña y la viscosidad elevada. En los cálculos realizados anteriormente se observa que la velocidad del fluido es en extremo pequeña y no sería suficiente para el trabajo con agua, además de que la viscosidad de este fluido es en extremo pequeña.

### 3.2 SELECCIÓN E INSTALACIÓN DEL EQUIPO

A continuación, se pueden encontrar los cálculos necesarios para el diseño y construcción de la placa de orificio, así como las medidas de tramo de tubería que debe tener el prototipo antes y después de la placa de orificio. Se muestra el diagrama final del prototipo para continuar con la construcción del mismo.

#### 3.2.1 Diseño de la Placa de Orificio

La normativa pertinente que rige el uso de las placas de orificio en conductos cerrados se menciona a continuación:

1. ISO 5167 -1 Medición del flujo de fluidos mediante el uso de dispositivos de presión diferencial insertados a través de un conducto de sección circular llenos, parte 1: principios generales y requerimientos. (*Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full -- Part 1: General principles and requirements*).
2. ISO 5167 -2 Part 2: Orifice Plates, (*Parte 2: Placas de orificio*).

3.2.1.1 Características generales del diseño

La Figura 3.1 muestra las medidas que debe tener el diseño de la placa de orificio, estas medidas han sido calculadas en base a los valores mínimos y máximos mostrados en la Tabla 3.2. Esto se hace considerando un diámetro interior de tubería (D), en este caso igual a 25.4 mm. Los valores mínimos y máximos de los espesores y del diámetro del orificio (d) se muestran en la Tabla 3.3.

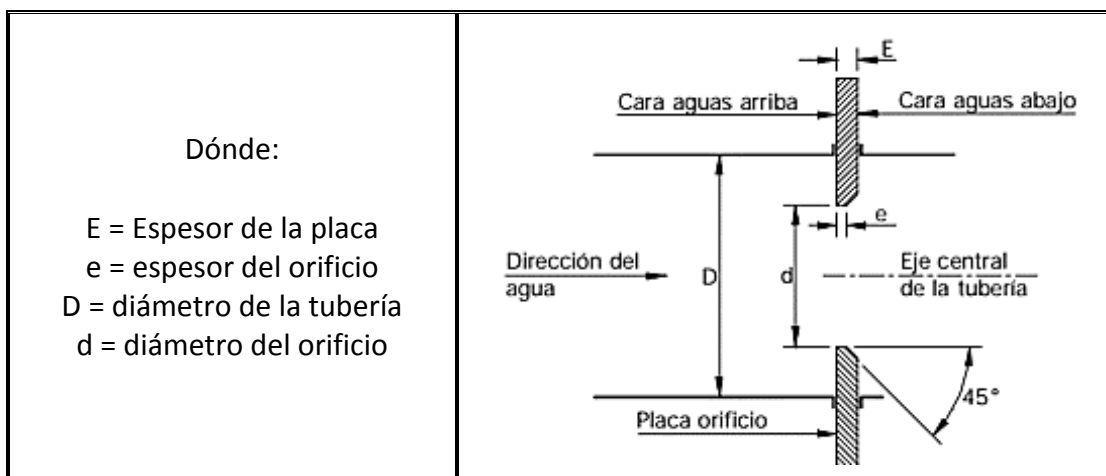


Figura 3.1 Características de diseño de la placa de orificio.

Tabla 3.2 Diámetro y espesor mínimo y máximo para el diseño de la placa de orificio

Dimensión	Mínimo	Máximo
e	0.005D	0.02D
E	0.005D	0.05D
d	½ pulg	38 pulg
d/D	0.20	0.75

Tabla 3.3 Valores calculados para el espesor de la placa de orificio.

Dimensión	Mínimo	Máximo
e	0.005 (25.4 mm) = 0.127 mm	0.02 (25.4 mm) = 0.508 mm
E	0.005 (25.4 mm) = 0.127 mm	0.05 (25.4 mm) = 1.27 mm



Para calcular el diámetro de orificio ( $d$ ) se utilizan los valores de pérdida de carga (Tabla 3.4) obtenidos del manual de medición de flujo de CONAGUA y la relación de diámetros ( $\beta$ ) sugerida para el proceso, siendo entre 0.35 y 0.70, ya que este intervalo ofrece un mejor resultado en la medición de flujo con placa de orificio.

Tabla 3.4 Porcentaje de pérdida de carga en función de la relación de diámetros. Tabla tomada de (CONAGUA, 1994)

$\beta$	% de pérdida de carga
0.20	96
0.30	92
0.40	85
0.50	76
0.60	67
0.70	55
0.75	48

Utilizando la ecuación 3.3 de *relación de diámetros* ( $\beta$ ) y utilizando los valores de  $\beta$  de la Tabla 3.4 y el diámetro interior de la tubería, es posible calcular el diámetro del orificio (ver ecuación 3.4). Los valores obtenidos se muestran en milímetros y en pulgadas en la Tabla 3.5.

$$\beta = \frac{d}{D} \quad (3.3)$$

Donde:

$\beta$  = relación de diámetros, [adimensional].

$d$  = diámetro del orificio, [m].

$D$  = diámetro de la tubería, [m].

$$d = \beta D \tag{3.4}$$

Tabla 3.5 Cálculo del diámetro del orificio en relación con la pérdida de carga

D = 25.4 mm (1")		
$\beta$	$d$ [mm]	$d$ [in]
0.30	7.62	0.3"
0.40	10.16	0.4"
0.50	12.7	0.5"
0.60	15.4	0.6"
0.70	17.78	0.7"

Se han calculado 5 diámetros de orificio ( $d$ ) en relación a la pérdida de carga y a las relaciones de diámetro ( $\beta$ ) recomendadas para trabajar en un proceso. Las diferentes placas de orificio se han diseñado en SolidWorks y serán fabricadas con aluminio. Un ejemplo del diseño de las placas se muestra en la Figura 3.2 en donde se muestra una vista transversal de la placa y las medidas de la misma.

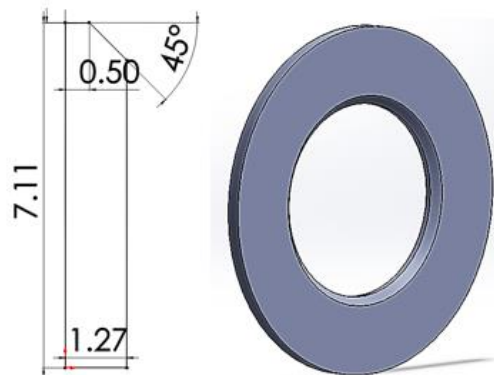


Figura 3.2 Ejemplo de diseño de placa de orificio en acero inox en Solid Works. Vista transversal con  $d = 17.78$  mm.

Las placas de orificio se fabricaron en torno a partir de una barra redonda de aluminio de 15 cm y diámetro de 1 ¾ “. Lo primero que se realizó fue la limpieza de la barra rebajando 0.5 mm el diámetro de la barra con un buril (Figura 3.3).



*Figura 3.3 Limpieza de la barra de aluminio.*

Posteriormente se realiza la perforación de la barra con diferentes tamaños de broca para cada caso y se realiza el ángulo a 45°, con un espesor aproximado de 2 mm (Figura 3.4). Para posteriormente cortar la barra en un espesor aproximado a 1.27 mm o menor (Figura 3.5), esto se repite para cada una de las 5 placas que se van a fabricar.



*Figura 3.4 Ángulo a 45° en la placa de orificio.*



*Figura 3.5 Corte de la placa de orificio*

Finalmente, se observan en la Figura 3.6 las diferentes placas de orificio fabricadas en el torno. Las placas de orificio serán colocadas en la tuerca unión localizada entre las dos tomas de presión del prototipo para crear la diferencia de presión.



*Figura 3.6 Placas de orificio fabricadas de diferentes diámetros.*





### 3.2.1.2 Instalación de la placa de orificio

El elemento primario deberá ser ajustado entre dos secciones rectas de tubería cilíndrica y de diámetro constante y de la longitud mínima especificada en la cual no debe haber obstrucciones o conexiones rama. Para el correcto uso y aplicación del medidor tipo orificio, es necesario que en las instalaciones se verifique y revise lo siguiente:

1. La tubería debe ser circular. El diámetro antes y después de la placa debe ser el mismo.
2. La tubería debe ser horizontal.
3. El agua debe circular a tubo lleno para que la medición sea lo más precisa posible. Esto se logra con la longitud correcta de tubería antes y después de la placa.
4. El interior de la tubería se debe encontrar limpio y libre de incrustaciones, al menos 10 diámetros aguas arriba de la placa (antes de la placa) y 4 diámetros después de la misma.

Conociendo la relación de diámetros es posible determinar que longitud de tramo recto de tuberías se requiere aguas arriba (Anexo Tabla v) (antes de la placa de orificio) y aguas abajo (después de la placa de orificio).

### 3.2.2 Diseño del Sistema de Tuberías

Las tomas de presión se colocan a una pulgada (25.4 mm) de la placa de orificio (Figura 3.7) llamadas “Tomas sobre pestaña” (Arturo, 2008). Para conocer la longitud de tramos rectos mínimos que deben existir antes y después de la placa de orificio se observa la gráfica del Anexo V.

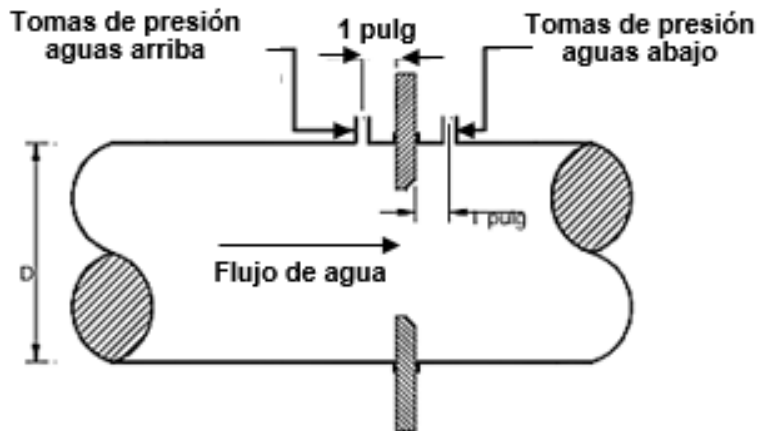


Figura 3.7 Diferentes posiciones de las tomas de presión.

Se considera la relación de diámetro más grande para realizar el cálculo correspondiente. La 3.6 muestra las medidas de tramo recto antes y después de la placa que han sido calculadas. La Figura 3.8 muestra un diagrama de las diferentes medidas que se calcularon para los tramos de tubería necesarios mínimos antes y después de la placa.

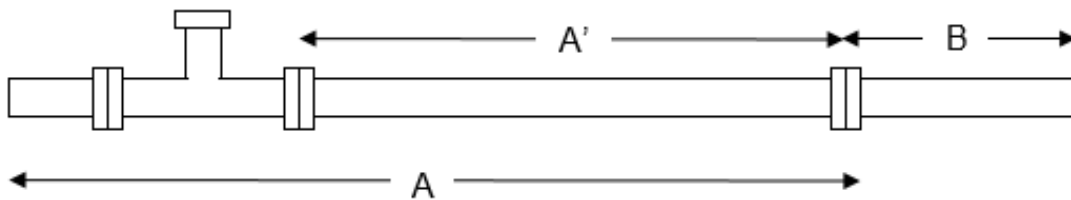


Figura 3.8 Relación de medidas mínimas para tubo recto.

El tramo A' representa la longitud "n" diámetros antes de la placa de orificio, mientras que el tramo B, representa "n" cantidad de diámetros después de la placa de orificio. Los resultados se muestran en la Tabla 3.6 para un diámetro de tubería de 25.4 mm.

Tabla 3.6 Medidas de construcción para la tubería aguas arriba y aguas abajo de la placa.

Diámetro de la tubería = 25.4 mm (1")		MEDIDAS SELECCIONADAS PARA LA CONSTRUCCIÓN
Relación de diámetro = 0.70		
<b>A</b>	12D = 12 (25.4 mm) = 304.8 mm	31 cm
<b>A'</b>	10D = 10 (25.4 mm) = 254 mm	26 cm
<b>B</b>	4D = 4 (25.4 mm) = 101.6 mm	11 cm

Finalmente, se puede observar el DTI del prototipo, realizado en base a la norma ANSI/ISA 5.1 2009. En este se incluyen los tramos de tubería calculados antes y después de la placa de orificio, así como un cálculo de los tramos de tubería recta antes y después necesarios para poder utilizar el medidor tipo “tubo pitot” en la tubería paralela. Se puede observar la posición que se le ha asignado a las válvulas de compuerta y de esfera, así como de la posición que tendrán los manómetros de diafragma.

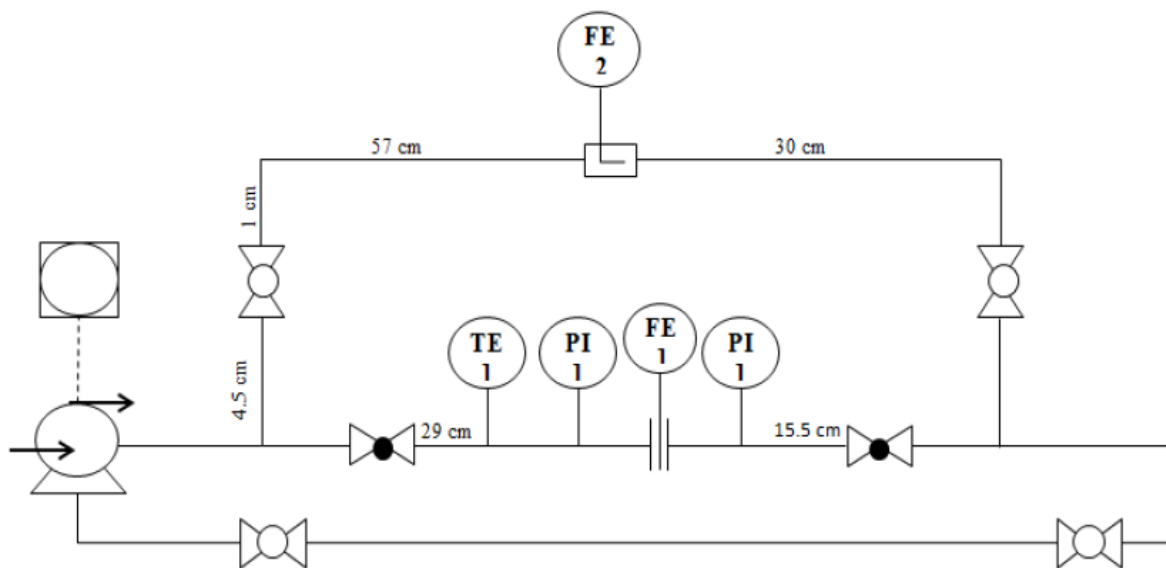


Figura 3.9 Diagrama final del prototipo

### 3.2.3 Descripción y Características de los elementos del sistema

El material seleccionado fue PVC cédula 40, esto por sus características de resistencia a la presión y que es el adecuado para trabajar con agua. Las características técnicas se muestran en la Tabla 3.7

Tabla 3.7 Características técnicas del PVC seleccionado.

Tubo PVC blanco liso		
Marca	Charlotte Pipe USA	
Cédula 40		
Medida 1"		
Diámetro interior	25.4 mm	
Diámetro exterior 33 mm		
Temperatura Máxima de op. 60 °C		
Presión de trabajo a 23 °C		
450 psi	31.5 kgf/cm <sup>2</sup>	




Tabla 3.8 Características técnicas de las válvulas seleccionadas

Válvula de compuerta Hembra roscada	
Medida 1" (25.4 mm)	200 psi WOG Anti choques
Diseño en latón forjado	Vástago no ascendente
Peso 1.10 lbs	No. De vueltas 4
Extremos roscados cumplen con certificación ANSI/ASME B1.20.1	
Altura 3.15 in	Diámetro = 2.28"
Largo 2.13 in	





Tabla 3.9 Características técnicas de las válvulas de esfera seleccionadas

Válvula esfera PVC soldar	
Cédula 40	cumple normatividad ASTM D2466
150 Psi a 23°C	Cuerpo y manija en PVC virgen
Alta resistencia a la corrosión y al desgaste	



### 3.2.4 Selección de los Manómetros

La norma inglesa BS EN 837-2, es aplicable para aquellos medidores de presión cuyo sistema de medición es un elemento metálico que se deforma bajo el efecto de la medición de presión, establece la recomendación para la selección e instalación de instrumentos de medición con elemento elástico y en ella se mencionan los rangos de presión para los manómetros de diafragma van de los 2.5 mbar hasta los 25 bar. La norma *BS EN 887-3 parte 3* menciona recomendaciones específicas para los medidores de presión de diafragma, además de las características metrológicas, dimensiones, pruebas y requerimientos.

La norma mexicana que establece las principales características técnicas y metrológicas para los medidores de presión con elementos sensores elásticos e indicación indirecta, es la NOM-013-SCFI-2004. Sin embargo, la norma es aplicable sólo a los instrumentos de alcance de medición entre 0.1 MPa a 1 000 MPa (Anexo 1).



### 3.2.4.1 Consideraciones Generales

Toda medición debe ser confiable, uno de los primeros puntos a considerar es la precisión, para una alta exactitud se utilizan manómetros de 0.25%. La precisión en un manómetro es expresada en porcentaje con relación a la presión máxima del rango. Los fabricantes en algunos casos garantizan esta precisión para un determinado rango de trabajo, es decir, entre el 25% y el 75% de la presión máxima de trabajo, fuera de estos límites la precisión es menor (Sergio Augusto Caporali, 1995).

Se debe seleccionar el rango de indicación de tal manera que la carga máxima de presión no exceda al 75% del valor final de escala del manómetro para la carga estática o al 65% del valor final de escala en caso de carga dinámica. De esta manera se prolonga la duración de vida del manómetro (British Standard, 1998). Durante el transporte y almacenamiento de los manómetros para mantener su precisión, extender su tiempo de vida útil y no dañar el manómetro antes de su instalación, se recomienda lo siguiente: (AFRISO EUROINDEX, 2007).

1. No arrojar o dejar caer el equipo
2. Almacenar el equipo en un ambiente seco y limpio.
3. Almacenar el equipo sólo dentro del rango de temperatura permitida. Debe ser en ambientes secos y limpio en condiciones de temperatura entre el rango de  $-40^{\circ}\text{C}$  a  $+70^{\circ}\text{C}$ .
4. Las conexiones de presión deberán hacerse a prueba de fugas.

Es importante mencionar que los manómetros de diafragma no son recomendables para usos con oxígeno o acetileno, aunque en caso de ser necesario, se puede hacer el pedido con los requerimientos necesarios al fabricante para esta o cualquier otra especificación especial.

3.2.4.2 Características del Manómetro Seleccionado

Tabla 3.10 Características técnicas del manómetro seleccionado

Manómetro de diafragma seco Marca Metron MOD. 63200	
Rango de presión	0 cm H <sub>2</sub> O – 88 cm H <sub>2</sub> O 0 oz/in <sup>2</sup> – 20 oz/in <sup>2</sup>
Características de la carátula	2 ½ "Color de fondo blanco, caracteres negros y escala dual. Puntero de aluminio anodizado
Tipo y tamaño de conexión	¼ " NPT inferior
Diafragma	Bronce fosforado
Caja y bisel	Acero al carbón con acabado en pintura electrostática color negro
<b>Observaciones:</b>	
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Es necesario realizar una corrección para un manómetro de precisión 0.6 o mejor que es usado en temperaturas fuera de la de referencia (20° C ± 2° C).</li> <li>2. Para las atmósferas corrosivas considerar los materiales adecuados de medición.</li> <li>3. Considerar los estándares de protección del manómetro si se instala en intemperie, en lugares expuestos a choques mecánicos, vibraciones o medio ambiente hostil.</li> </ol>	



3.2.4.3 Instalación del Manómetro de diafragma

1. No sujetar el manómetro de la caja o aplicar fuerza en esta durante el montaje y desmontaje.
2. El manómetro se puede colocar en la instalación dando dos o tres vueltas con la mano y apretándolo con una llave apropiada sobre la conexión.
3. Se debe evitar el error de paralelaje durante la lectura.
4. El manómetro debe ser legible en el lugar de montaje. Para llevar el manómetro a una posición en la que se pueda leer se recomienda para la conexión con rosca, el montaje mediante unión hembra o tuerca de unión.
5. El manómetro debe estar limpio y libre de polvo así como el lugar de montaje.
6. Nunca montar el manómetro de cabeza.

7. Cuando se aplique presión por primera vez, se debe checar que no existan fugas.
8. Si el manómetro viene incorporado con un dispositivo de escape, debe existir una distancia mínima de 20 mm desde cualquier obstáculo u obstrucción.
9. La posición del manómetro debe ser siempre vertical a menos que se pida con condiciones especiales de instalación y venga indicado desde fabricante.
10. Abrir las válvulas de aislamiento lentamente para evitar sobrepresiones.
11. Remover el manómetro en caso de detectar mediciones anormales para verificar o recalibrar en caso de ser necesario.



Figura 3.10 Posición adecuada de los manómetros en el proceso

### 3.2.5 Selección del Termopar


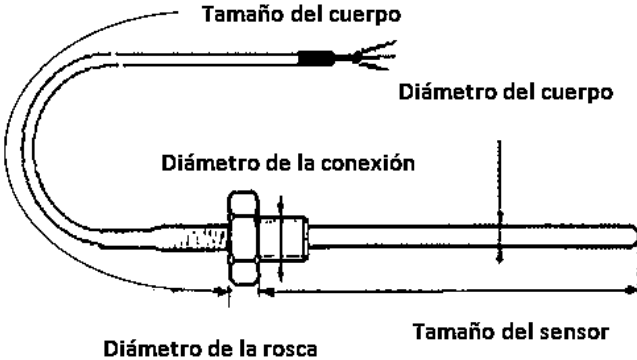
La Figura 3.11 muestra el termopar que se adquirió para su instalación en el prototipo. Las características técnicas del termopar se muestran en la Tabla 3.11.



Figura 3.11 Termopar tipo K seleccionado



Tabla 3.11 Características técnicas del termopar seleccionado

Termopar seleccionado	Sonda termopar tipo K Figura 3.12) para inmersión en agua	 <p><b>Termopar Tipo K</b></p> <p><b>Polaridad de los cables de aislamiento</b>          + → Amarillo          - → Rojo</p> <p><b>Material del cable</b>          + → Cromel          - → Alumel</p> <p><b>Propiedades</b>          Moderadamente magnético          Ambiente para unión expuesta, Oxidación limpia</p> <p><i>Figura 3.12 Características generales del termopar tipo k</i></p>
Marca	Desconocida	
Rango de operación	-270 °C a 800 °C	
Material	Acero inoxidable	
Longitud del cuerpo	3 m	
Longitud del sensor	10 cm (3.94")	 <p><i>Figura 3.13 Termopar para uso general</i></p>
Diámetro del cuerpo	5mm (0.196")	
Tamaño de la rosca de conexión	1/8" NPT	
Velocidad de respuesta	30 s	
<b>Observaciones:</b>		
<ol style="list-style-type: none"> <li>1. No se utiliza cabezal ni vaina de protección</li> <li>2. No sobrepasar la temperatura de operación y observar la placa de especificaciones o manual proporcionado por el fabricante.</li> <li>3. La selección del termopar se realizó en base al costo de adquisición, universalidad y rango de medición.</li> <li>4. Si fuera necesario extender el termopar, puede consultarse la norma DIN EN 60584, sobre la normalización de los cables de extensión y compensación del termopar.</li> <li>5. Gran resistencia a la abrasión y corrosión.</li> </ol>		

### 3.2.5.1 Instalación

1. El termopar se ha suministrado listo para su funcionamiento.
2. La temperatura máxima recomendada para la unión fría es de 204 °C.
3. Para instalar el termopar, lo ideal es instalar el sensor de tal forma que este alcance el flujo en el centro de la tubería.
4. Puesto que el diámetro de la tubería es reducido, la temperatura de trabajo no es elevada y se quieren evitar errores de medición, el termopar se debe instalar en la tubería a 45° Siempre opuesto al sentido del flujo (Figura 3.14).

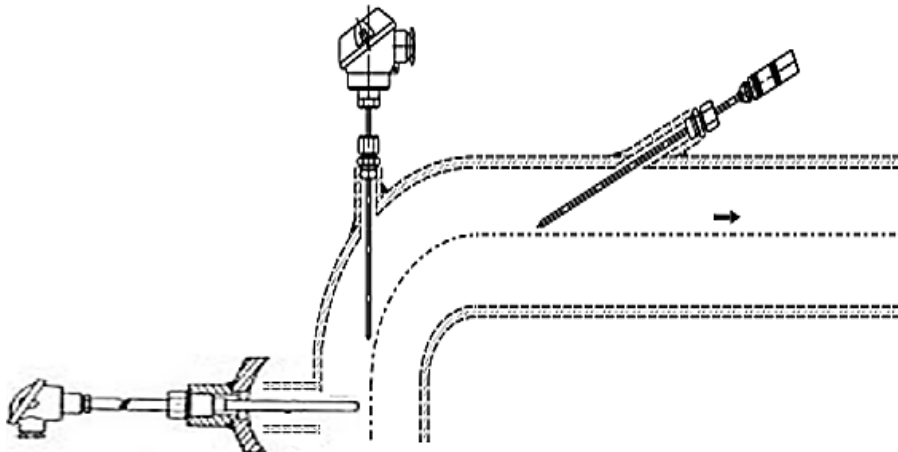


Figura 3.14 Montaje del termopar en la tubería

Como mantenimiento, se debe calibrar el termopar. La frecuencia de la calibración estará determinada por cada aplicación. Las calibraciones se suelen hacer en base a un estándar de calibración, el termopar debe ser removido de su instalación y revisado por equipos de medición eléctricos.

### 3.3 CONSTRUCCIÓN DEL PROTOTIPO

La bomba que se utilizará es una bomba trifásica Kracht – Pumpen Werdohl tipo SS13 – B2, las características técnicas de la misma se muestran en la Figura 3.15.

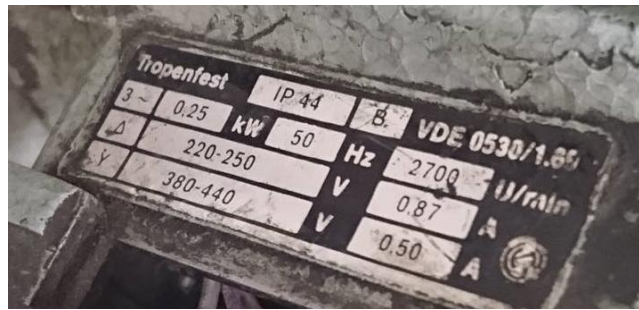
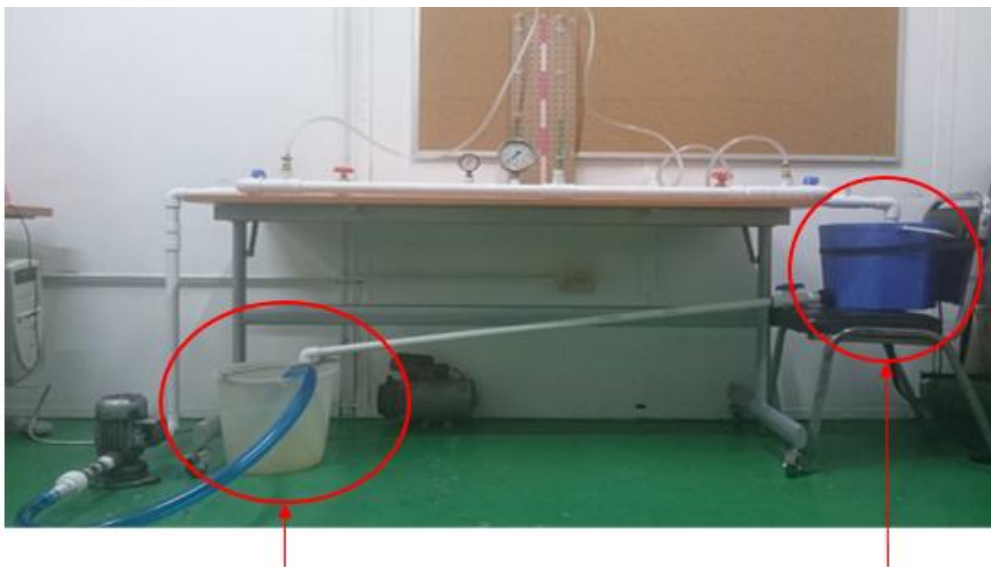


Figura 3.15 Características técnicas de la bomba trifásica

Es importante mencionar que la bomba no cuenta con ficha o manual técnico, además de que la placa de datos eléctricos ha sido removida, por lo que no se ha determinado cuál es su máxima altura de succión o flujo por unidad de tiempo. La Figura 3.16 muestra el prototipo finalizado, en la imagen se pueden observar la zona de carga y descarga y la conexión realizada entre la bomba y el prototipo.



Zona de carga (succión de la bomba)

Zona de descarga de agua

Figura 3.16 Prototipo finalizado, zona de succión de agua y descarga de agua.

El prototipo cuenta con tomas de presión localizadas en diferentes puntos del prototipo (Figura 3.17), que tienen como función principal la elaboración de prácticas de medición de presión en diferentes puntos, utilizando principalmente el manómetro en U. Aguas arriba de la placa de orificio se localiza la entrada en donde será colocado el termopar o el instrumento de medición de temperatura (Figura 3.17). La Figura 3.18 muestra la tuerca unión en donde se localiza la placa de orificio y a un lado de ésta se localizan las tomas de presión para realizar las mediciones con los manómetros de diafragma o el manómetro en U.

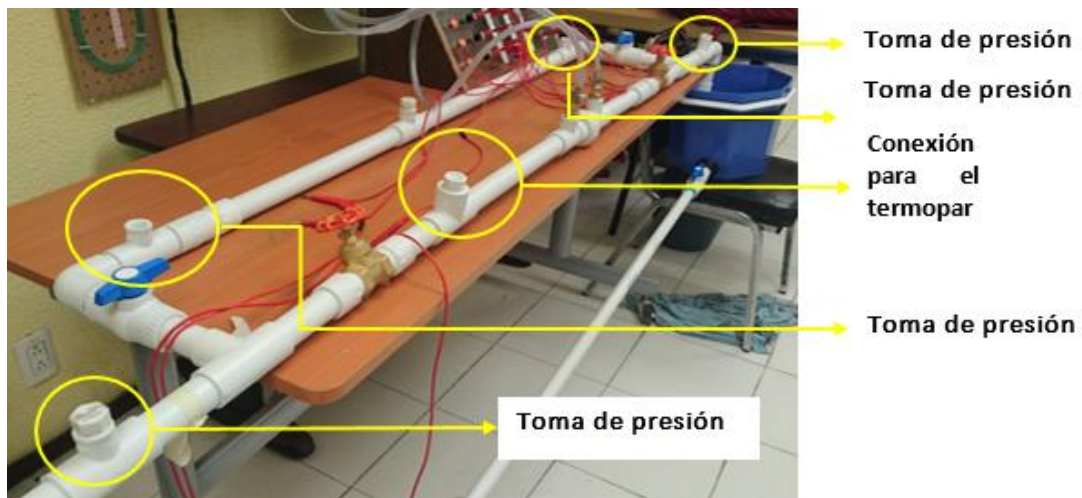


Figura 3.17 Tomas de presión en el prototipo y conexión al termopar.

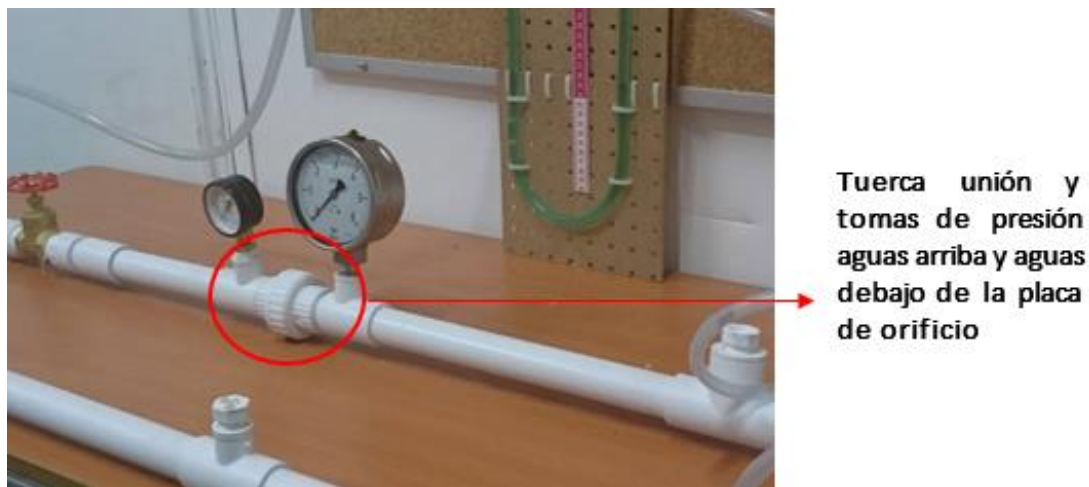


Figura 3.18 Tuerca unión, tomas de presión aguas arriba y aguas abajo de la placa de orificio. Sección de inserción del termopar.

De igual modo, se ha diseñado una conexión para poder utilizar el tubo de pitot como medidor de presión diferencial y medidor de flujo (Figura 3.19). Este ha sido diseñado con las medidas requeridas por norma, en diámetros antes y después de las placas de orificio, se deben utilizar 10D como mínimo aguas arriba de la conexión y 5D como mínimo aguas debajo de la conexión.

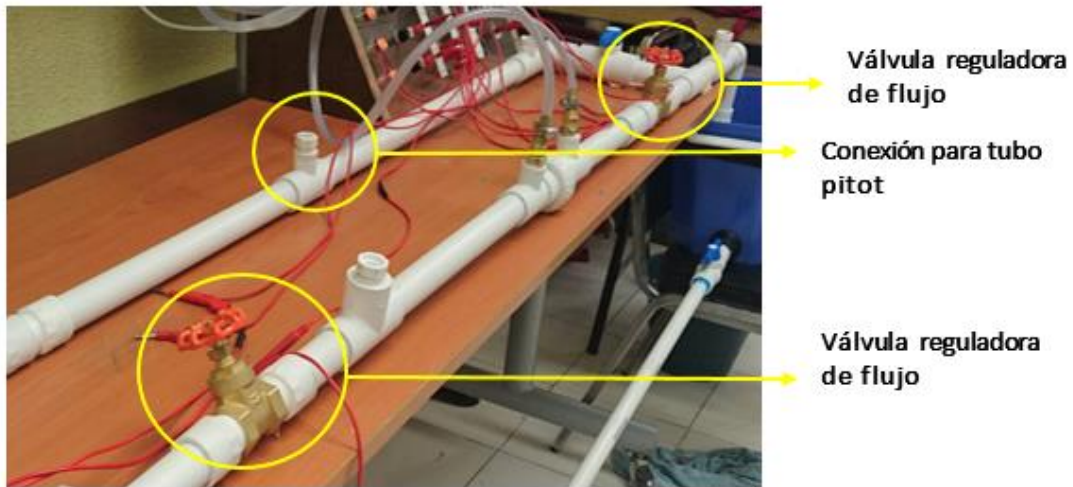


Figura 3.19 Localización de la conexión para el tubo pitot y las válvulas reguladoras de flujo.

El manómetro en U diseñado (Figura 3.20), permitirá medir la diferencia de presión en dos puntos requeridos y será utilizado para hacer pruebas de medición de caída de presión aguas arriba y aguas debajo de la placa de orificio. La unidad de medición en este caso será en  $\text{cmH}_2\text{O}$  y es útil en medición de bajas presiones.

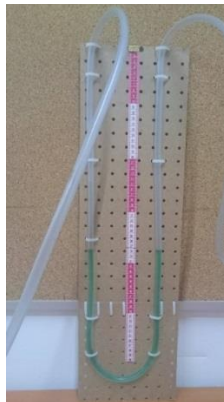
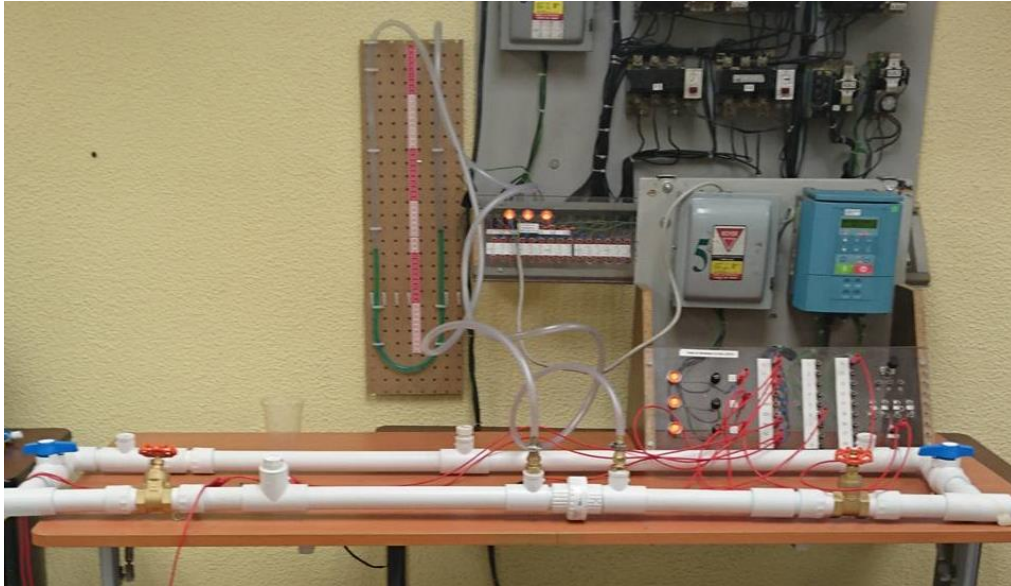


Figura 3.20 Manómetro en U



En la Figura 3.21 se muestra una de las aplicaciones del prototipo, la cual consiste en la medición de presión diferencial utilizando el manómetro en U. Como se observa en la figura, las mangueras del manómetro se encuentran conectadas aguas abajo y aguas arriba de la tuerca unión en donde se localiza el medidor de orificio.



*Figura 3.21 Conexión del manómetro en U a las tomas de presión aguas arriba y aguas abajo de la placa de orificio*

# **CAPÍTULO 4**

## **PRUEBAS EXPERIMENTALES Y RESULTADOS**

A continuación se muestran las pruebas realizadas al prototipo y los resultados obtenidos en las mismas. Dichos resultados se han escrito en tablas de acuerdo a la relación de diámetro del orificio. En las pruebas realizadas se recabaron los datos necesarios de presión diferencial para hacer los cálculos de flujo con el medidor de orificio. Se muestran los resultados en base a la frecuencia de trabajo, esto como resultado de variar la velocidad de la bomba con el variador de frecuencia para así obtener diferentes mediciones.

## 4.1 PRUEBAS DE FUGAS Y CONEXIONES

Para las pruebas de fugas, se dejó fluir agua por la tubería, esto para asegurarse de que no existan fugas que puedan dañar el equipo eléctrico. En todas las conexiones roscadas se utilizó cinta teflón para reforzar la conexión y bloquear el paso del agua. Las pruebas se realizan utilizando un variador de frecuencia, de este modo se podrá variar la velocidad de la bomba. El modelo de variador utilizado es el EURO THERM 605 (Figura 4.1), el datasheet o manual técnico puede descargarse desde la página del proveedor con el modelo del driver o el número de serie localizado en el lateral derecho del variador.



Figura 4.1 Driver EURO THERM 605

Se utiliza un tablero trifásico de pruebas a 220 V y 60 Hz para poder alimentar el variador. A continuación, se muestran las conexiones físicas (Figura 4.2) y el diagrama de conexiones (Figura 4.3) realizadas de la bomba al variador y al tablero de conexión trifásico. Antes de comenzar con la medición de variables, se realizan las pruebas de conexión con la bomba y conexión con el variador; todo esto con la finalidad de



comprobar el correcto funcionamiento de la bomba y verificar la continuidad en las conexiones bomba-variador-tablero.

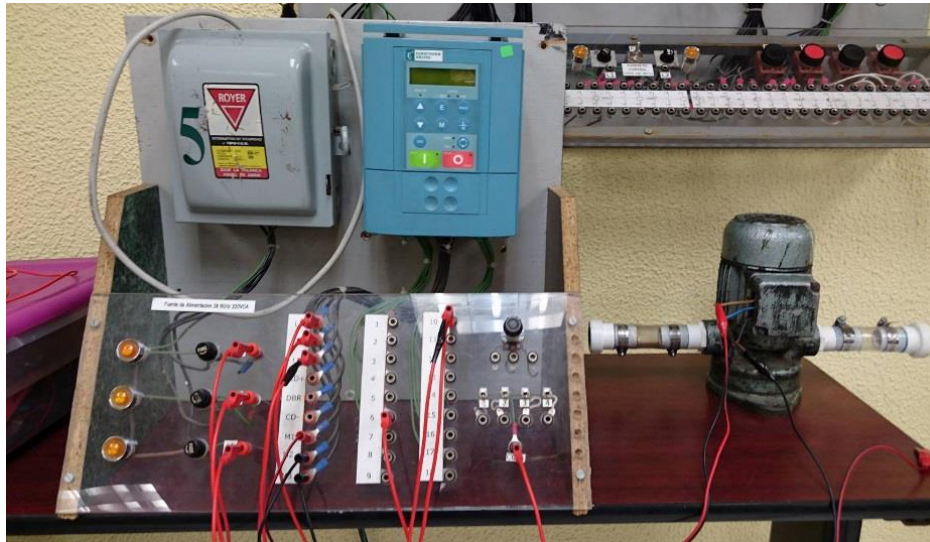


Figura 4.2 Diagrama de conexiones del tablero de control del variador a la bomba

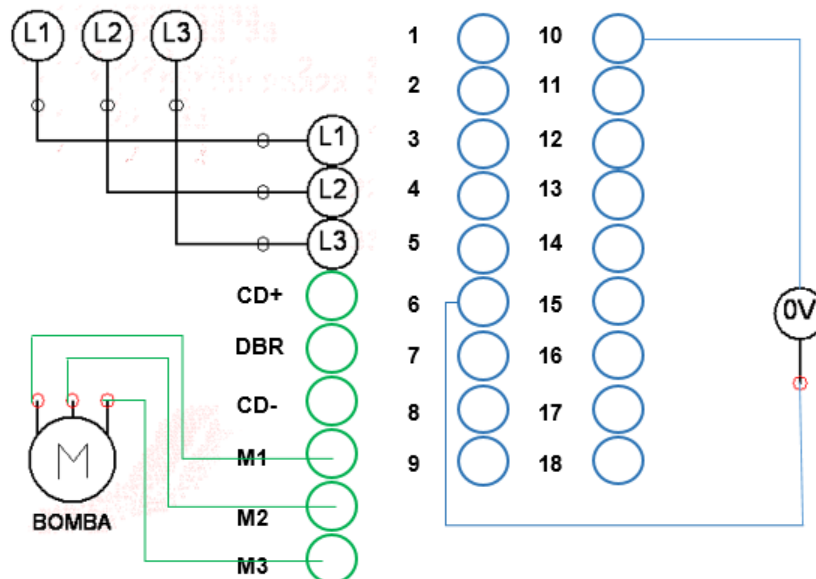


Figura 4.3 Diagrama de conexiones

Una vez realizadas las pruebas preliminares se procedió a conectar el prototipo a la bomba y a su vez al variador de frecuencia. En la Figura 4.4 se puede observar el prototipo conectado al tablero trifásico y al variador de velocidad.



Figura 4.4 Conexión del prototipo al tablero trifásico de pruebas y al driver.

## 4.2 PARÁMETROS DEL FLUJO DE FLUIDO EN LA TUBERÍA

En la Figura 3.15 se muestran las rpm a las que gira la bomba, que en este caso son 2700 expresadas en ( $U/min$ ) del idioma alemán “Umdrehungen pro Minute”. Es importante mencionar que las rpm son una velocidad angular que indica el número de rotaciones, de un cuerpo que gira sobre un eje, por unidad de tiempo.

Como no se cuenta con la placa de datos de la bomba y tampoco con el manual de datos técnicos, se procede a realizar los cálculos pertinentes para obtener la velocidad de la bomba en ( $m/s$ ), obtener el flujo volumétrico y el flujo en ( $L/min$ ). Lo primero que se tiene



que hacer es convertir la unidad de velocidad angular a unidades del SI, es decir, radianes por segundo ( $rad/s$ ). Una vuelta completa, o revolución, equivale  $2\pi$  radianes y un minuto a 60 s, por lo que la conversión se realiza de la siguiente forma:

$$1 \frac{r}{min} = \frac{2\pi rad}{60 s} \text{ por lo tanto } 2700 * \frac{2\pi rad}{60 s} = 282.743 \frac{rad}{s}$$

Como consecuencia y ya que los radianes son una unidad adimensional, la velocidad angular obtenida se cambia a velocidad lineal multiplicando el radio de la circunferencia que gira sobre el eje en metros, es decir:

$$282.743 \frac{rad}{s} * 0.05 m = 14.13 \frac{m}{s}$$

La velocidad obtenida será considerada como el 100% de velocidad de trabajo. Consecutivo a esto, se calculará el número de Reynolds, correspondiente a esta velocidad, utilizando la ecuación 1.10 y los valores mostrados a continuación.

**Diámetro de la tubería [m] = 0.0254**

**Viscosidad dinámica del agua  $\mu$  (21° C) = 0.000979  $\frac{kg}{m \cdot s}$**

**Densidad del agua  $\rho$  (21° C) = 998  $\frac{kg}{m^3}$**

**Velocidad promedio = 7.065  $\frac{m}{s}$**

$$R_e = \frac{7.065 * 0.0254 * 998}{0.000979} = 182.933 \times 10^3$$

Una vez calculado el número de Reynolds, se procede a calcular el flujo volumétrico utilizando la ecuación 3.2, así como el flujo en litros por minutos.

$$Q = 0.000507 \text{ m}^2 * 7.065 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0.00358 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$0.00358 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \left( \frac{60\,000 \frac{\text{l}}{\text{min}}}{1 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}} \right) = 215 \frac{\text{l}}{\text{min}}$$

En la Tabla 4.1 se muestran los resultados obtenidos a partir de los cálculos hechos con diferentes velocidades (25%, 50% y 75%), así como los resultados de flujo másico y la velocidad del flujo en litros por minuto a través de la tubería. En cada caso se muestra la velocidad promedio y total, calculada a partir del 100% de la misma.

Tabla 4.1 Resultados obtenidos de los cálculos para obtener los parámetros del flujo del fluido.

Porcentaje de trabajo	Velocidad total [m/s]	Velocidad promedio [m/s]	$R_e$	Flujo volumétrico [m <sup>3</sup> /s]	Flujo [L/min]
100%	14.13	7.065	$182.933 \times 10^3$	0.00358	215
75%	10.59	5.29	$136.97 \times 10^3$	0.00268	161
50%	7.065	3.5325	$91.46 \times 10^3$	0.00179	107
25%	3.5325	1.766	$45.73 \times 10^3$	0.00089	53

Como se puede observar, el número de Reynolds en todos los casos es mayor a 2000, por lo que se puede suponer que el flujo de trabajo es turbulento. Esto es en gran medida debido a la baja viscosidad del agua, otro de los factores puede ser la alta velocidad.



### 4.3 RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DE PRESIÓN

Una vez que el prototipo ha sido armado, se ha verificado el correcto funcionamiento del mismo y calculado el 100% de la velocidad de la bomba, se procede a realizar las pruebas de medición de presión con cada una de las placas de orificio y los instrumentos. A partir de las mediciones se obtendrá el cálculo de flujo másico, pérdida de carga hidráulica y coeficiente de descarga en la placa de orificio. Durante las mediciones, la velocidad de la bomba es controlada utilizando la consigna local del variador en un rango del 25% al 80% de la velocidad de la misma.

Con la finalidad de obtener más mediciones y hacer una comparación entre los resultados obtenidos con los diferentes instrumentos de medición, se realizan en total tres series de pruebas. La primera serie, se hace midiendo antes y después de la placa de orificio con el manómetro en U. La segunda serie de mediciones, se realiza usando antes de la placa el manómetro de diafragma y después de ella un instrumento para calibración de presión. Finalmente, la tercera serie, se realiza midiendo con el manómetro de diafragma antes de la placa y después en manómetro en U.

Como las placas de orificio fueron construidas con diámetros variados, cada una de estas será intercambiada y las mismas pruebas deberán ser realizadas con cada una de ellas. La Tabla 4.2 muestra los resultados obtenidos en las mediciones utilizando el manómetro en U, cabe destacar que los valores de velocidad. La Tabla 4.3 muestra los resultados utilizando, aguas abajo de la placa, el instrumento para calibración de presión y aguas arriba de la placa el manómetro de diafragma. Los resultados de las mediciones, son registrados a partir de la primera señal de variación de presión en los instrumentos. La Tabla 4.4 muestra los resultados obtenidos al medir, aguas arriba de la placa de orificio, con el manómetro de diafragma y aguas abajo con el manómetro en U; el manómetro en U, fue colocado de tal forma que pudiese medir presión estática, es decir, practicando una perforación en la tubería y conectando el manómetro dejando uno de sus lados libre.

Tabla 4.2 Diferencia de presión obtenida de las mediciones realizadas con el manómetro en U para cada una de las placas de orificio.

Diámetro de la placa	Velocidad (%)	$P_1$ (cmH <sub>2</sub> O)	$P_2$ (cmH <sub>2</sub> O)	$P_{diferencial}$ (h) (cmH <sub>2</sub> O)	Velocidad (%)	$P_1$ (cmH <sub>2</sub> O)	$P_2$ (cmH <sub>2</sub> O)	$P_{diferencial}$ (h) (cmH <sub>2</sub> O)
0.7	30	-0.5	0.1	0.6	60	-5.2	4.4	9.6
	35	-0.7	0.2	0.9	65	-6.9	4.8	11.7
	40	-1.3	0.9	2.2	70	-7	5.2	12.2
	45	-2.3	1.5	3.8	75	-8	7.5	15.5
	50	-3.2	2.5	5.7	80	-9.6	9.4	19
	55	-4.2	3.4	7.6				
0.6	25	-0.6	0	0.6	55	-9.4	9.5	18.9
	30	-1.5	0.5	2.0	60	-12.8	11.8	24.4
	35	-2.7	2	4.7	65	-17.5	16.4	33.9
	40	-4.6	3.6	8.2	70	-20	18.8	38.8
	45	-6.5	5.5	12	75	-22	20	42
	50	-8.2	7	15.2	80	-24	21	45
0.5	25	-1.3	0.5	1.8	45	-13	12	25
	30	-2.9	2.2	5.1	50	-17.5	18.4	35.9
	35	-5.8	5	10.8	55	-21	21.5	42.5
	40	-9.2	8.3	17.5				
0.4	22	-1	0.3	1.3	28	-5.5	4.6	10.1
	23	-1.5	0.8	2.3	29	-6.6	5.6	12.2
	24	-2.2	1.5	3.7	30	-7.3	6.5	13.8
	25	-3	2.1	5.1	35	-13	11.1	24.1
	26	-3.7	2.9	6.6	40	-18.5	16.2	34.7
	27	-4.7	3.6	8.3				
0.3	20	-1	0.5	1.5	26	-10.1	9.1	19.2
	21	-2.4	1.6	4	27	-11.8	11	22.8
	22	-3.1	2.9	6	28	-13.5	12.7	26.2
	23	-5.3	4.4	9.7	29	-15.5	23.7	39.2
	24	-6.6	5.8	12.4	30	-17.7	20	37.7
	25	-8.3	7.4	15.7				

Tabla 4.3 Diferencia de presión obtenida de las mediciones realizadas con el manómetro de diafragma y el calibrador de presión para cada una de las placas de orificio.

Diámetro de la placa de	Velocidad (%)	P <sub>1</sub> (cmH <sub>2</sub> O)	P <sub>2</sub> (cmH <sub>2</sub> O)	P <sub>diferencial</sub> (h) (cmH <sub>2</sub> O)	Velocidad (%)	P <sub>1</sub> (cmH <sub>2</sub> O)	P <sub>2</sub> (cmH <sub>2</sub> O)	P <sub>diferencial</sub> (h) (cmH <sub>2</sub> O)
<b>0.7</b>	50	2	-1	3	70	8.3	-3	11.3
	55	3	-1	4	75	12	-4	16
	60	5	-2	7	80	15.1	-4	19.1
	65	7.5	-2	9.5	85	17.5	-5	22.5
<b>0.6</b>	35	0	-1	1	65	23.5	-6	29.5
	40	4	-1	5	70	25.5	-7	32.5
	45	7	-2	8	75	28.8	-9	37.8
	50	12.5	-2	14.5	80	32	-9	42
	55	14.7	-3	17.7	85	33.1	-10	43.1
	60	17.3	-4	21.3				
<b>0.5</b>	30	4	0	4	60	28	-16	44
	35	8	-1	9	65	32.1	-18	50.1
	40	13.3	-2	15.3	70	35.4	-19	54.4
	45	16	-4	20	75	40.8	-21	61.8
	50	20.7	-9	29.7	80	46	-23	69
	55	24.9	-13	37.9	85	52.6	-26	78.6
<b>0.4</b>	30	15	-2	17	50	39	-11	50
	35	22.7	-9	31.7	55	44.4	-13	57.4
	40	28.6	-10	38.6	60	51.8	-14	65.8
	45	33.8	-1	44.8				
<b>0.3</b>	20	1	0	1	32	33.2	-5	38.2
	22	6	-1	7	34	39	-6	45
	24	13	-2	15	36	44.9	-6	50.9
	26	20	-2	22	38	49	-7	56
	28	24	-4	28	40	53.1	-8	61.1
	30	28.5	-5	33.5				

Tabla 4.4 Diferencia de presión obtenida de las mediciones realizadas con el manómetro en U para cada una de las placas de orificio.

Diámetro de la placa	Velocidad (%)	$P_1$ (cmH <sub>2</sub> O)	$P_2$ (cmH <sub>2</sub> O)	$P_{diferencial}$ (h) (cmH <sub>2</sub> O)	Velocidad (%)	$P_1$ (cmH <sub>2</sub> O)	$P_2$ (cmH <sub>2</sub> O)	$P_{diferencial}$ (h) (cmH <sub>2</sub> O)
<b>0.7</b>	50	2	0	2	70	8.3	2.8	11.1
	55	3	0.2	3.2	75	12.2	3.5	15.7
	60	5.4	1.2	6.6	80	15	4.1	19.1
	65	7.1	2	9.1	85	17.5	5.2	22.7
<b>0.6</b>	40	3.9	1	4.9	65	23.5	6	29.5
	45	7.2	1.5	8.7	70	25.5	7.2	32.7
	50	12.5	2.9	15.4	75	28.7	8.8	37.5
	55	14.8	3.3	18.1	80	32.2	10.2	42.4
	60	17.5	3.9	21.4	85	33	10.8	43.8
<b>0.5</b>	30	4.2	0	4	60	28	16.4	44.4
	35	7.9	0.9	8.8	65	32.2	18	50.2
	40	13.2	2.2	15.4	70	35.4	19.6	55
	45	16	4.1	20.1	75	40.5	21.5	62
	50	20.5	9.5	30	80	46	23	69
	55	24.9	13.2	38.1	85	52.4	26.7	79.1
<b>0.4</b>	30	15	2.2	17.2	50	39.2	11.9	51.1
	35	22.8	8.9	31.7	55	44.5	13	57.5
	40	28.6	10.2	38.8	60	51.8	14.1	65.9
	45	34	11.5	45.5				
<b>0.3</b>	22	5.9	1.2	7.1	32	33.5	4.9	38.4
	24	13.3	2.5	15.8	34	38.9	5.7	44.6
	26	20	2.2	22.2	36	44.2	6.9	51.1
	28	23.9	3.1	27	38	49.3	7.7	57
	30	28.5	4	32.5	40	53.8	8.2	61.6



#### 4.4 CÁLCULO DE FLUJO MÁSCICO Y PERDIDAS HIDRÁULICAS EN EL MEDIDOR DE ORIFICIO

Para calcular el flujo máscico por medio de elementos de presión diferencial, se utiliza la ecuación 4.1 (Romero R. A., 2001). Este valor dependerá del coeficiente de descarga, la presión diferencial medida, la relación de diámetros y la densidad que para el agua tiene un valor de  $998 \text{ kg/m}^3$  (ver Anexo Tabla iv).

$$Q_m = \frac{C_d}{\sqrt{1 - \beta^4}} \left( \frac{\pi}{4} d^2 \right) (\sqrt{2h\rho}) \quad (4.1)$$

Donde:

$Q_m = \text{flujo que pasa por la tubería, } \left[ \frac{\text{kg}}{\text{s}} \right]$ .

$C_d = \text{Coeficiente de descarga [adimensional]}$ .

$\beta = \text{relación de diámetros [adimensional]}$ .

$d = \text{diámetro de la tubería. [m]}$

$\rho = \text{densidad del fluido } \left[ \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$ .

$h = \text{diferencia de presión [Pa]}$ .

El  $C_d$  es un valor de ajuste que compensa la distribución de velocidad y las pérdidas de carga menores que no fueron tomadas en cuenta al obtener la ecuación del flujo. El  $C_d$  se determina por cada dispositivo y depende de cómo se coloquen las tomas de presión, para los cálculos con la placa de orificio se utiliza la ecuación 4.2 y los valores para las tomas de presión a 1 pulgada se muestran en la Tabla 4.5.

$$C_d = 0.5959 + 0.0312\beta^{2.10} - 0.1840\beta^8 + 0.0029\beta^{2.5} \left( \frac{10^6}{Re} \right)^{0.75} + \frac{0.09000L_1\beta^4}{1 - \beta^4} - 0.0337L_2\beta^3 \quad (4.2)$$

Tabla 4.5 Valores asignados para los diferentes tipos de instalación y calcular  $C_d$ .

Tipo de instalación	$L_1$	$L_2$
D-D/2	1.00	0.50
A una pulg	25.40 / D*	
En los bordes	0.00	

\* D en mm

A continuación se muestra un ejemplo de los cálculos realizados para obtener el  $C_d$ . Las tomas de presión en el prototipo se localizan a 25.4 mm aproximadamente de la placa de orificio, utilizando los valores para  $L_1$  Y  $L_2$  mostrados en la Tabla 4.5, se obtiene:

$$L_1 \text{ y } L_2 = \frac{25.40}{25.40} = 1$$

Utilizando la relación de diámetro 0.7, un número de Reynolds igual a 2000 y la ecuación ( 4.2) se obtiene el coeficiente de descarga. De este modo se calcula el coeficiente de descarga para cada una de las relaciones de diámetro y números de Reynolds calculados.

$$C_d = 0.5959 + 0.0312(0.7)^{2.10} - 0.1840(0.70)^8 + 0.0029(0.7)^{2.5} \left( \frac{10^6}{54880.11} \right)^{0.75} \\ + \frac{0.090(1)(0.70)^4}{1 - (0.70)^4} - 0.0337(1)(0.70)^3 = 0.627$$

Una desventaja importante de los medidores de orificio es la pérdida de carga hidráulica ( $h_l$ ) que genera. Esta pérdida es la diferencia de presiones estáticas entre la presión medida en la pared de la tubería aguas arriba de la placa de orificio donde la influencia de la placa es despreciable (aproximadamente un diámetro de distancia) y la presión

aguas abajo del elemento primario donde el flujo se recupera del impacto con la placa (aproximadamente seis diámetros). Con la ecuación ( 4.3) se pueden calcular las pérdidas de carga hidráulica que genera la placa de orificio.

$$h_L = \frac{\sqrt{1 - \beta^4} - C_d \beta^2}{\sqrt{1 - \beta^4} + C_d \beta^2} h \quad (4.3)$$

Donde:

$h_L$  = pérdida de carga hidráulica [cm H<sub>2</sub>O].

$C_d$  = Coeficiente de descarga.

$\beta$  = relación de diámetros, [adimensional].

$h$  = diferencia de presiones [cm H<sub>2</sub>O].

Un ejemplo de cálculo para pérdida de carga hidráulica se muestra a continuación. El ejemplo se realiza utilizando valores de la primer serie de mediciones, para una relación de diámetro igual a 0.7 y una diferencia de presión de 0.6 cm H<sub>2</sub>O a 30% de velocidad de la bomba y coeficiente de descarga 0.627.

$$h_L = \frac{\sqrt{1 - 0.7^4} - 0.627(0.7)^2}{\sqrt{1 - 0.7^4} + 0.627(0.7)^2} (0.6) = 0.2872$$

Los resultados obtenidos del cálculo para número de Reynolds, flujo másico a través de la tubería, coeficiente de descarga y pérdidas hidráulicas, en relación al porcentaje de velocidad y presión diferencial medida se muestran en la Tabla 4.6 para la primer serie de mediciones, en la Tabla 4.7 para la segunda serie de mediciones y la Tabla 4.8 para la tercer serie de mediciones.

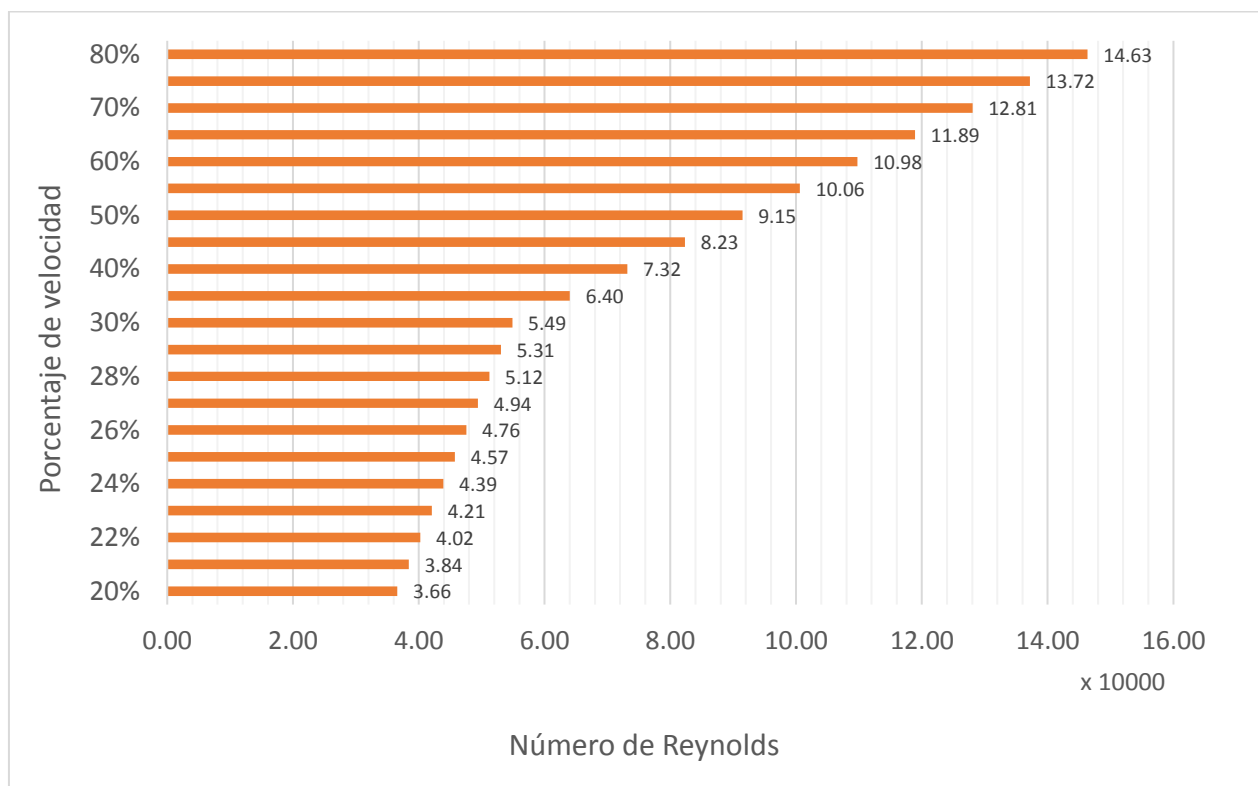




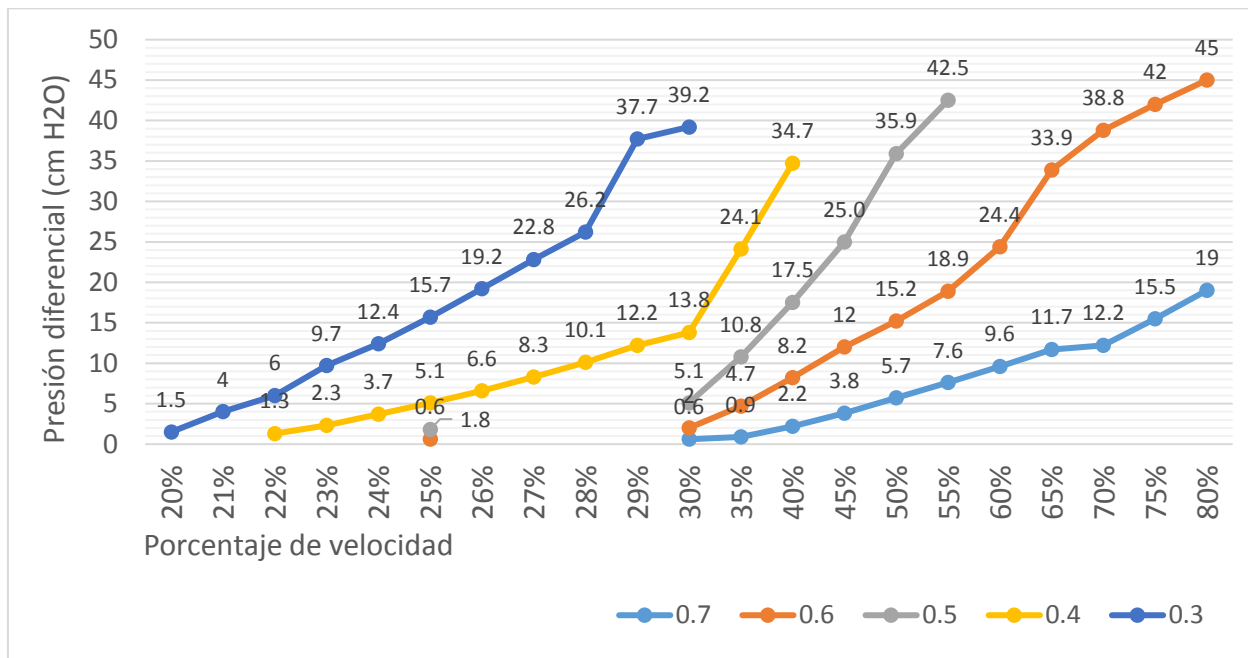


## 4.5 RESULTADOS GRÁFICOS

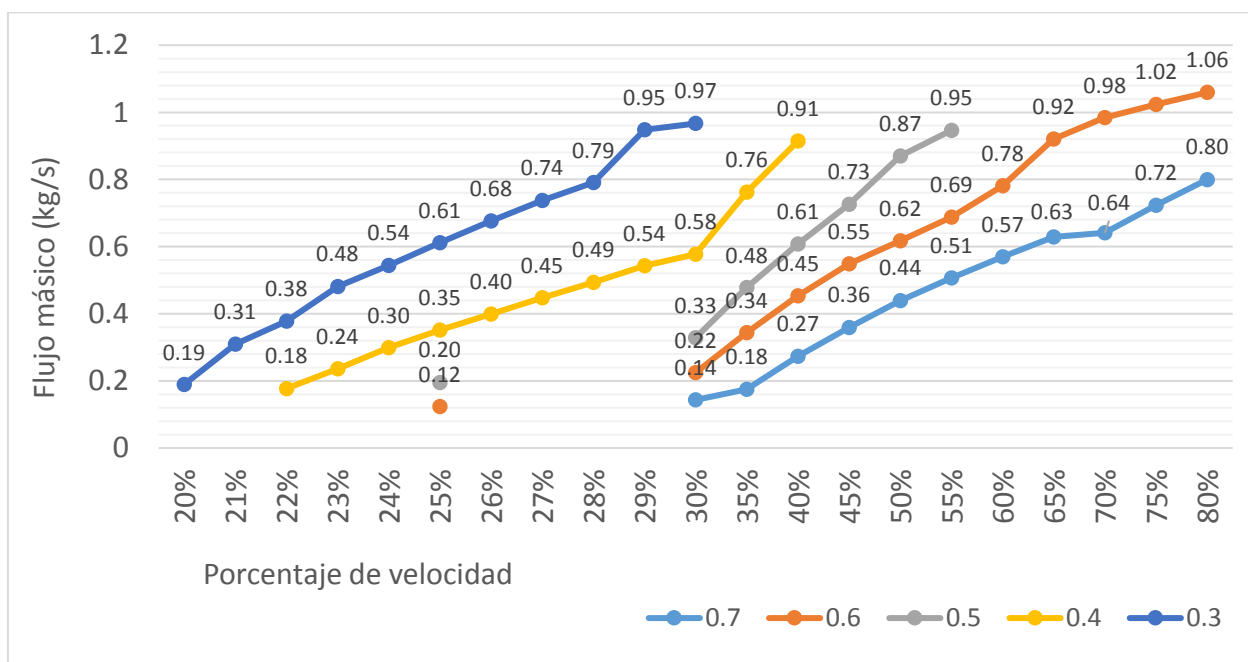
Las siguientes gráficas, se elaboraron en función a los diferentes resultados obtenidos en las mediciones de presión diferencial con los instrumentos de medición. La Gráfica 4.1 Muestra los resultados obtenidos de número de Reynolds en relación a la velocidad. Se elaboraron un total de 4 gráficas para cada una de las tablas de datos. La primera gráfica, para cada caso, muestra los resultados obtenidos de las mediciones de presión diferencial en relación al porcentaje de velocidad. La segunda gráfica muestra el flujo másico calculado, mientras que la tercera gráfica muestra la pérdida de carga hidráulica, ambas en relación al porcentaje de velocidad. En la cuarta gráfica, se muestra una relación entre la presión diferencial medida y la variación del flujo másico.



Gráfica 4.1 Número de Reynolds calculado en relación al porcentaje de velocidad

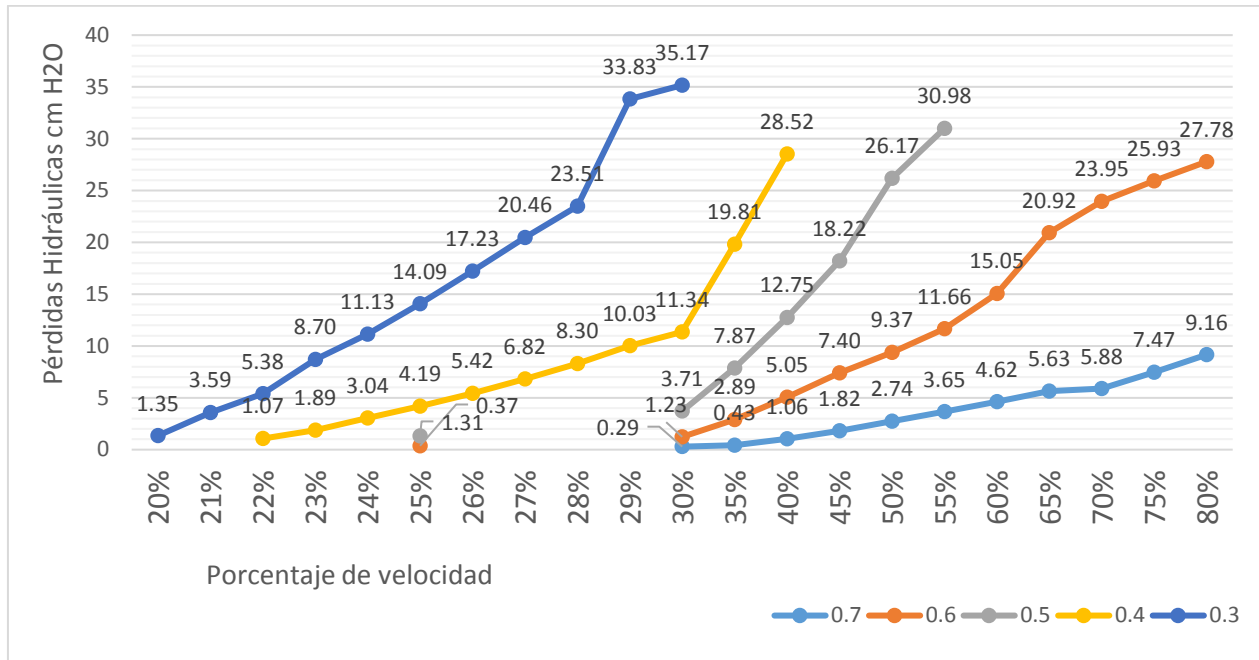


Gráfica 4.2 Relación entre presión diferencial medida y porcentaje de velocidad, tomando como referencia los datos mostrados en la tabla 4.6

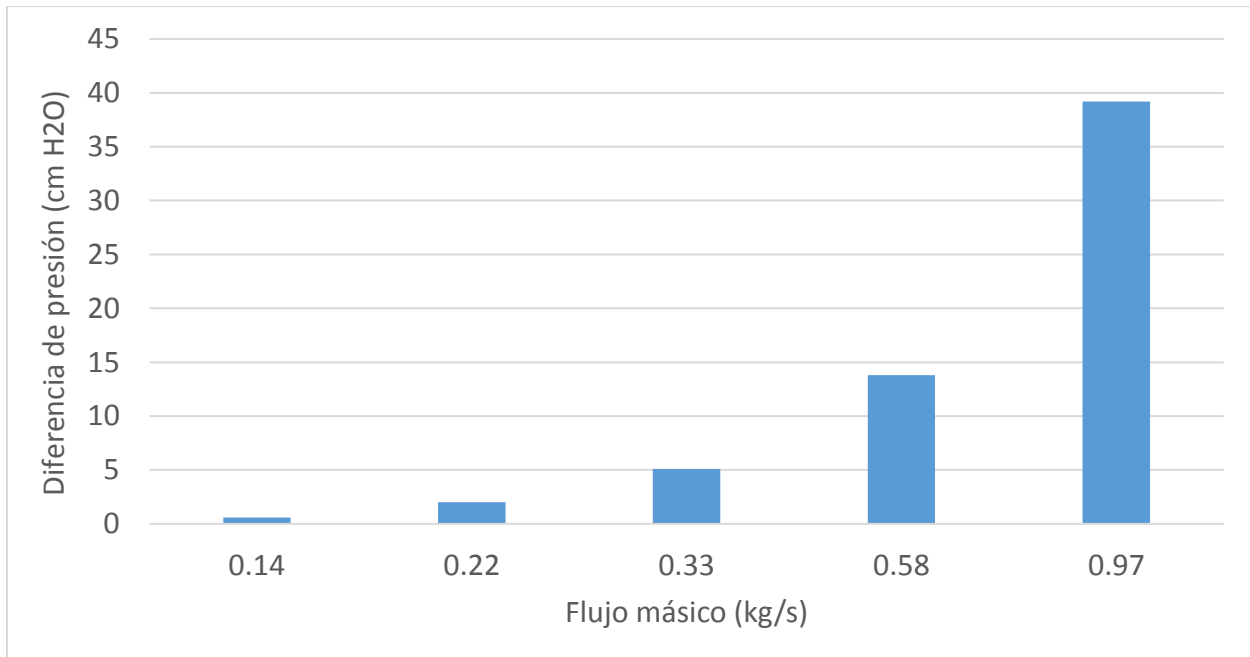


Gráfica 4.3 Relación entre flujo másico y porcentaje de velocidad, tomando como referencia los datos mostrados en la tabla 4.6.

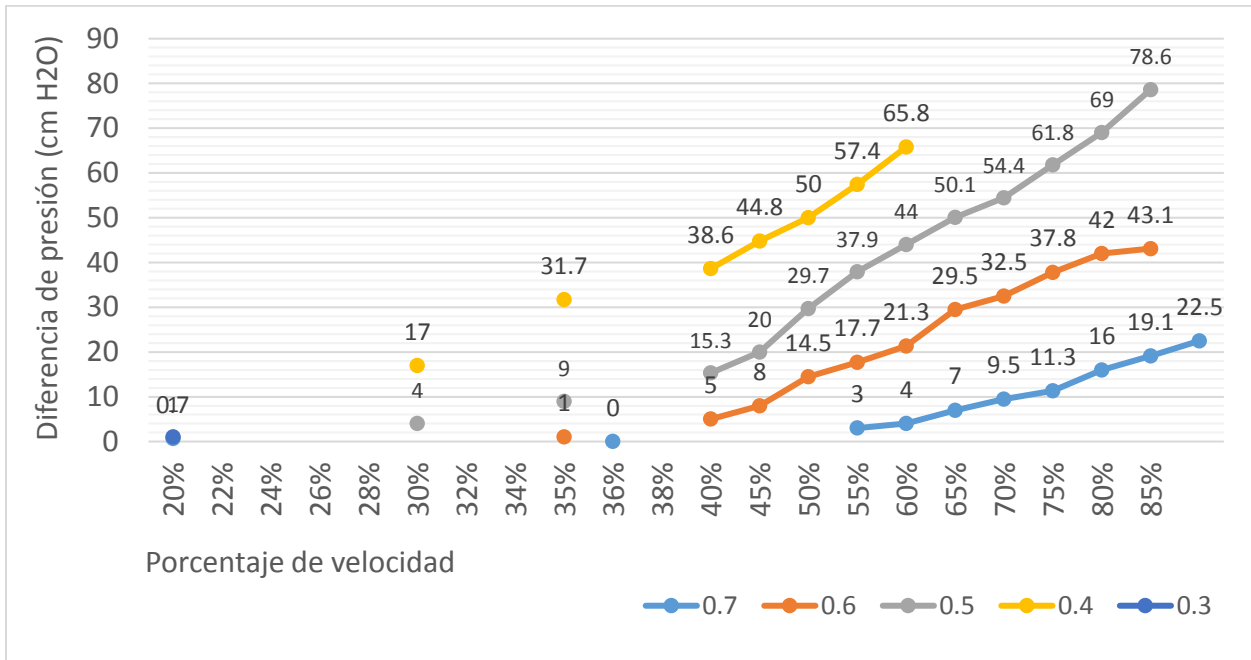




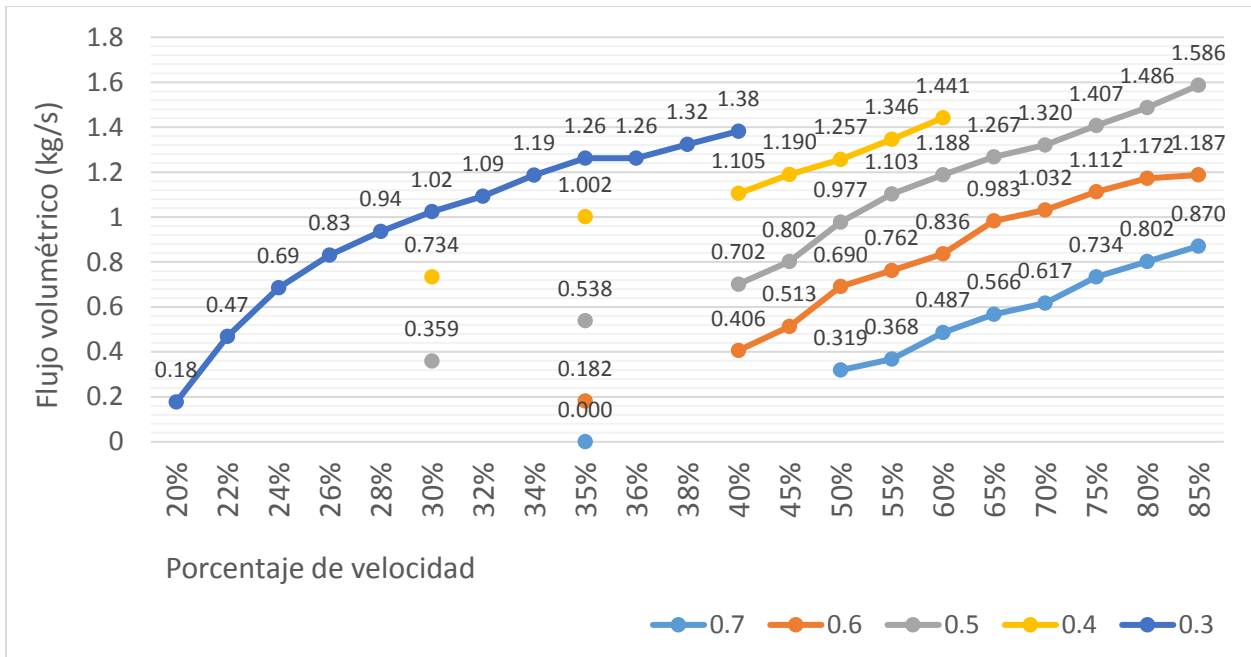
Gráfica 4.4 Relación entre el porcentaje de velocidad y pérdida de carga hidráulica tomando como referencia los valores mostrados en la tabla 4.6



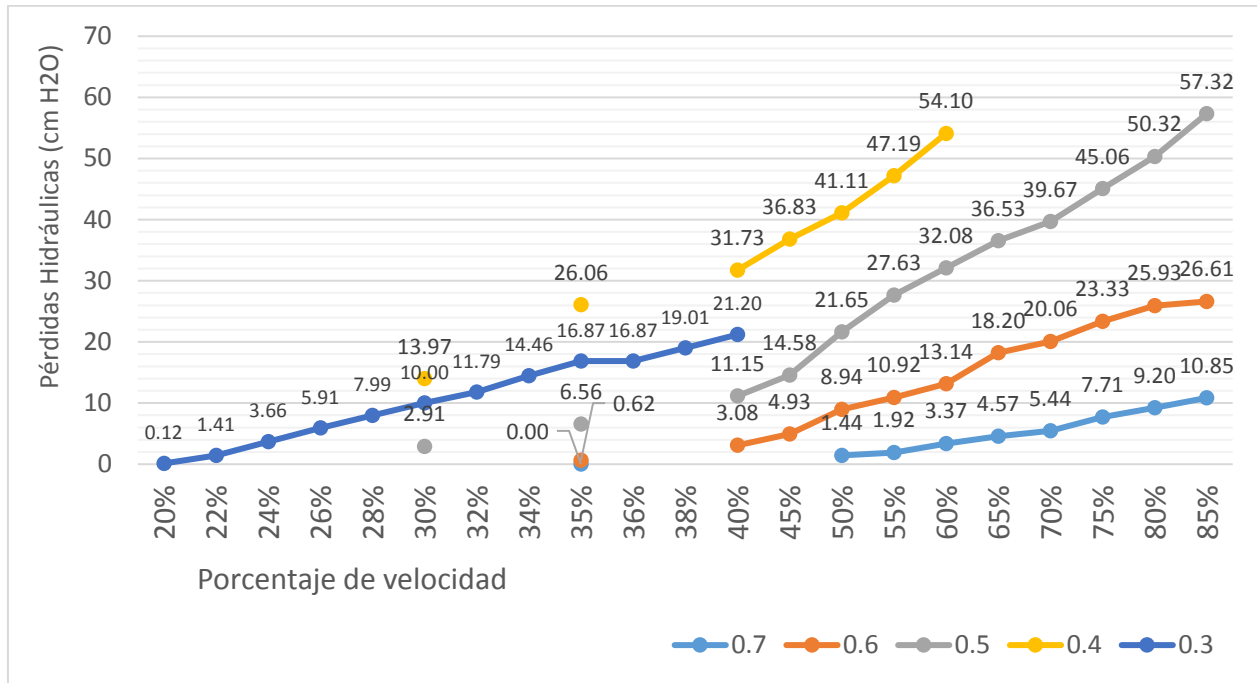
Gráfica 4.5 Relación entre presión diferencial medida y flujo másico, tomando como referencia los datos mostrados en la tabla 4.6



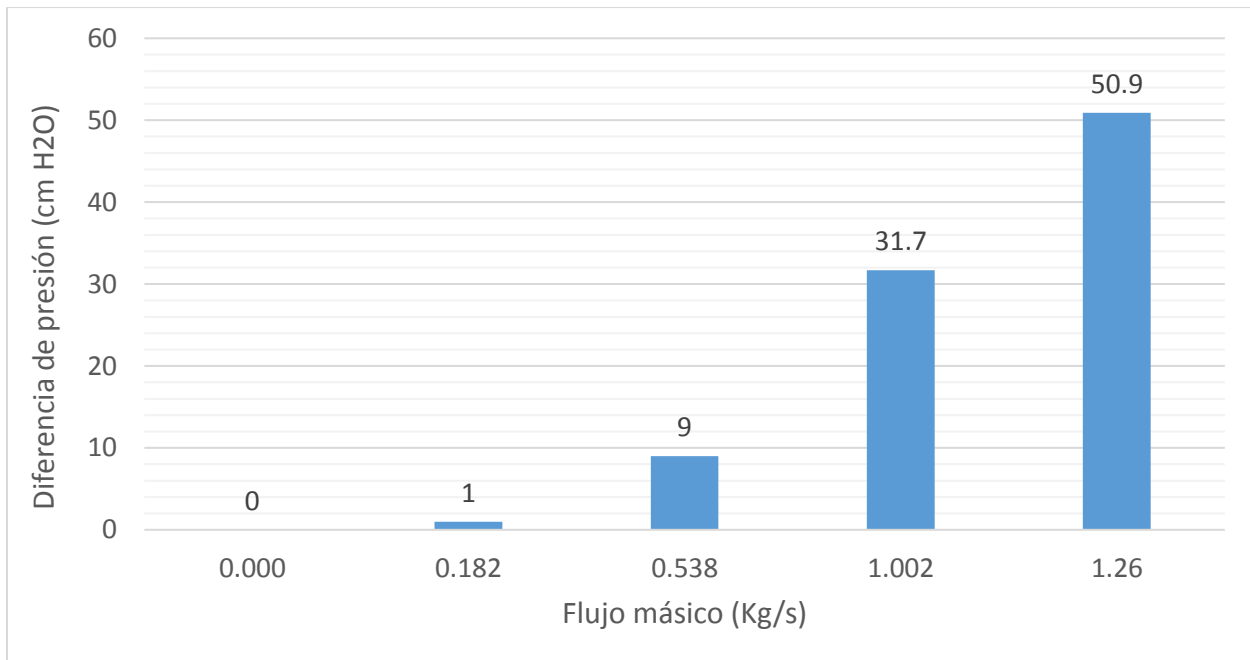
Gráfica 4.6 Relación entre la diferencia de presión y el porcentaje de velocidad tomando como referencia los valores mostrados en la tabla 4.7



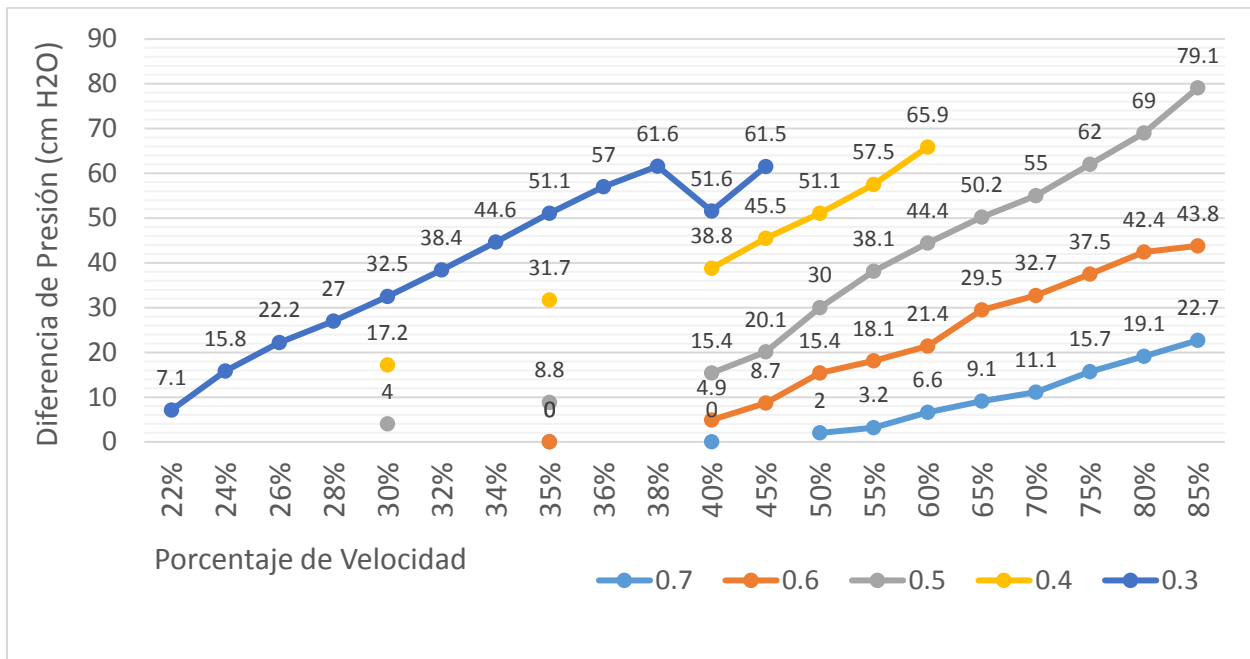
Gráfica 4.7 Relación entre el flujo másico y el porcentaje de velocidad tomando como referencia los valores mostrados en la tabla 4.7



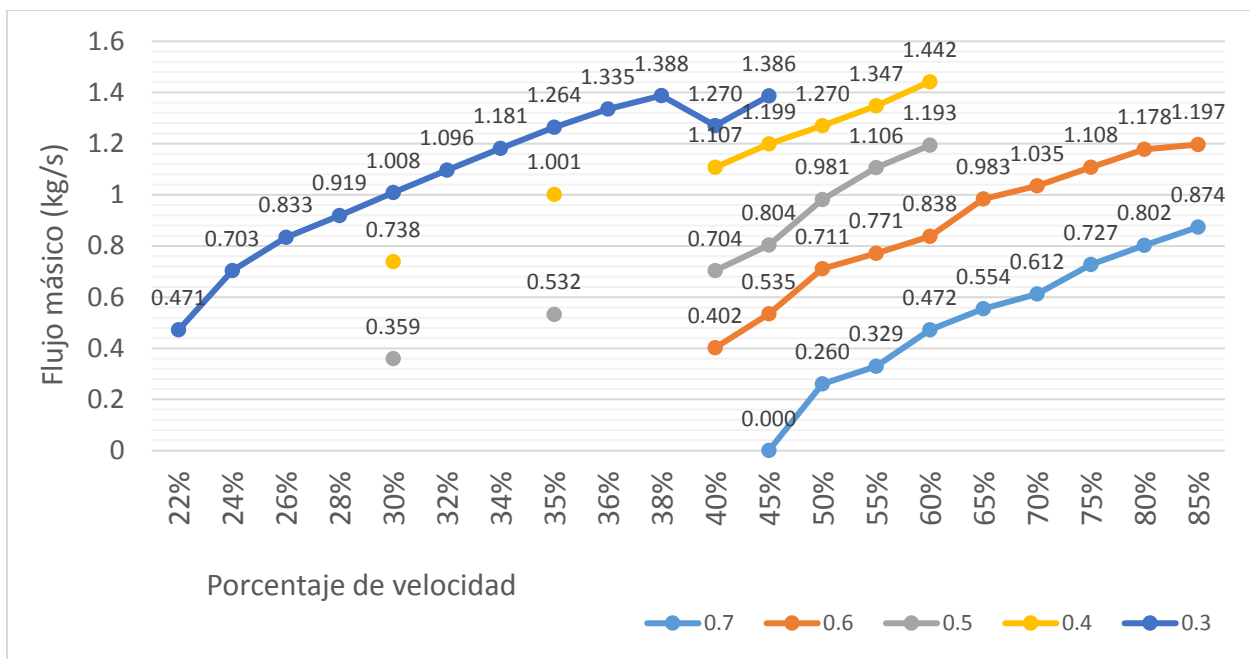
Gráfica 4.8 Relación entre el porcentaje de velocidad y pérdida de carga hidráulica tomando como referencia los valores mostrados en la tabla 4.7



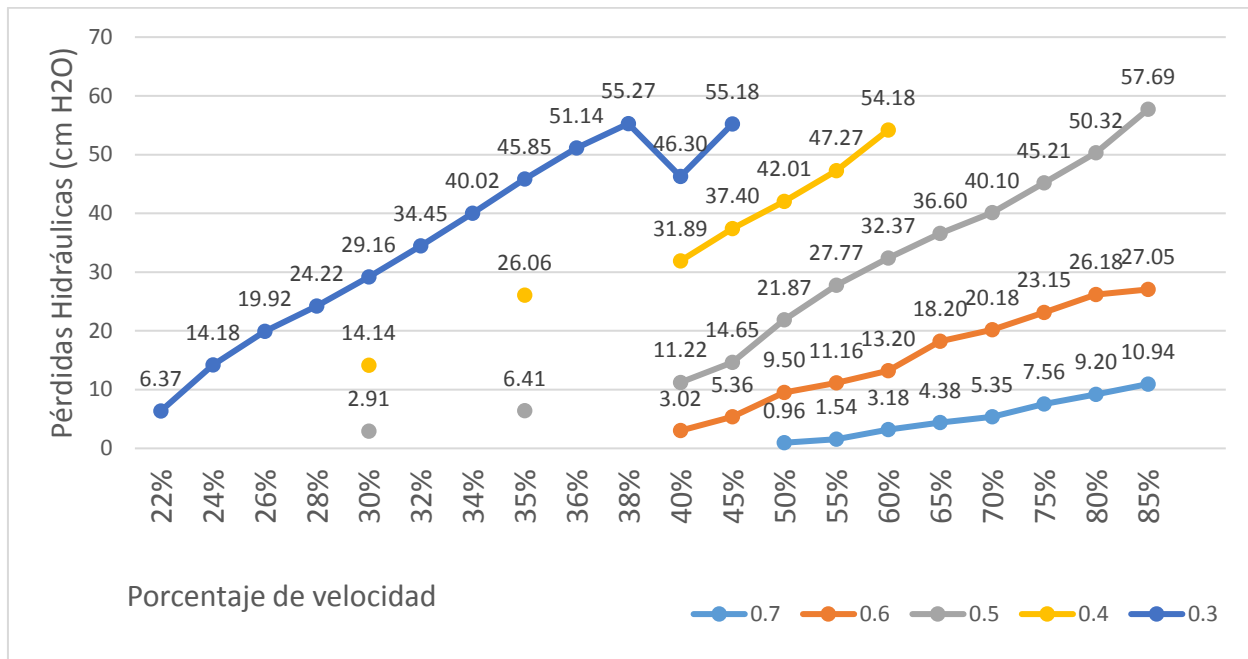
Gráfica 4.9 Relación entre la diferencia de presión y el flujo másico tomando como referencia los valores mostrados en la tabla 4.7



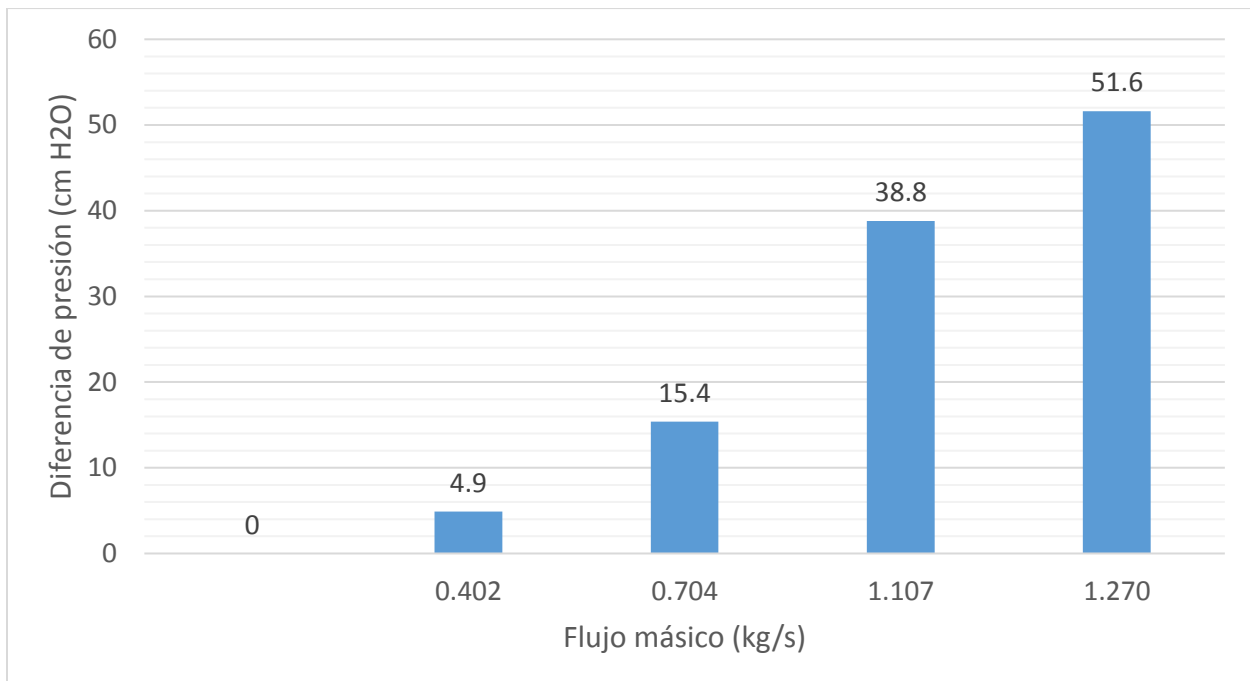
Gráfica 4.10 Relación entre la diferencia de presión y el porcentaje de velocidad tomando como referencia los valores mostrados en la tabla 4.8



Gráfica 4.11 Relación entre el flujo másico y el porcentaje de velocidad tomando como referencia los valores mostrados en la tabla 4.8



Gráfica 4.12 Relación entre el porcentaje de velocidad y pérdida de carga hidráulica tomando como referencia los valores mostrados en la tabla 4.8



Gráfica 4.13 Relación entre la diferencia de presión y flujo másico tomando como referencia los valores mostrados en la tabla 4.8



#### 4.5.1 Análisis de Resultados

La Gráfica 4.1 muestra claramente un incremento en el número de Reynolds a medida que la velocidad se incrementa, se considera que los factores que influyen en este incremento, son la baja viscosidad del agua y las altas velocidades con las que se trabaja, esto da como resultado un número de Reynolds superior a 2000 y por consecuencia se puede suponer un flujo turbulento. Para que el flujo pueda suponerse laminar, la velocidad tendría que ser igual o menor a 1.5% es decir 0.212 *m/s* de la velocidad de la bomba, lo cual resulta prácticamente imposible. Otra alternativa de solución, sería el incremento de la viscosidad, para lo cual se optaría por trabajar con otro tipo de fluido, puesto que la viscosidad del agua no incrementa en gran medida aun cuando se incremente la temperatura.

Las Gráficas 4.2, 4.6 y 4.10 muestran la relación que existe entre la diferencia de presión medida y el porcentaje de velocidad a la cual trabajó la bomba. En los tres casos, se observa el incremento de la presión diferencial a medida que la velocidad aumenta. No se observa gran variación en las mediciones comparando los tres instrumentos de medición. De igual modo, se puede observar que el aumento de la presión diferencial no es constante y presenta ciertas variaciones en las velocidades más bajas como son 20%, 25%, 30%, se regulariza entre 30% y 65% y tiene a variar nuevamente arriba del 65%, presentando constantemente incrementos y decrementos en la medición.

En las Gráficas 4.3, 4.7 y 4.11 se observa la relación que existe entre el flujo másico a través de la tubería y el porcentaje de velocidad, se puede observar en los tres casos, que el flujo másico aumenta a medida que el orificio de la placa es menor, alcanzando su punto máximo en el medidor de presión con relación de diámetro 0.3 y medida de orificio de 0.3" a una velocidad de 45%. Este incremento en el flujo másico, puede explicarse en función del incremento de velocidad que se produce cuando se reduce el diámetro de la tubería colocando la placa de orificio, es decir, al hacer fluir el agua a través del medidor



de orificio se produce un incremento en la velocidad de la misma cuando esta pasa la placa y a su vez, esta velocidad se incrementa cuando se aumenta la presión. Esto explicaría el incremento del flujo másico a medida que el orificio de la placa se reduce. Se puede observar que la pérdida de carga hidráulica se hace mayor a medida que el orificio de la placa se reduce. Las Gráficas 4.4, 4.8 y 4.12, ciertamente muestran el incremento de las pérdidas de carga hidráulica a medida que la velocidad aumenta y el diámetro del orificio se reduce, esto es comprensible debido a que el paso del agua se ve bloqueado y restringido en su flujo, lo que genera pérdidas en la presión inicial antes de la placa de orificio. Esta pérdida medida a una pulgada (25.4 mm) aguas arriba y aguas abajo de la placa, se normaliza aproximadamente a seis diámetros (152.4 mm) aguas abajo de la placa.

Por último, se observa en las gráficas 4.5, 4.9 y 4.13 la relación existente entre la diferencia de presión y el flujo másico calculado, para la primera serie de mediciones a 30% de velocidad y para segunda y tercera serie de mediciones al 40%. Durante la primera serie de mediciones, se puede medir una variación en la presión para todas las relaciones de diámetro y son coincidentes en 30% de la velocidad, lo mismo sucede en el segundo y tercer caso para 40% de velocidad. Se aprecia que a mayor diferencia de presión, el flujo másico tiende a aumentar.

Durante las primeras mediciones, en las que se utilizó como instrumento de medición en manómetro en U, la presión se dispara mostrando oscilaciones a partir de la placa con diámetro de orificio igual a 0.5". En este punto, se redujo la velocidad puesto que la presión se incrementa *dentro de la tubería y aguas arriba de la placa de orificio* a medida que la velocidad aumenta. El rango de medición del manómetro en U, a partir del uso de esta placa de orificio, comienza a ser insuficiente para las mediciones, además de que las conexiones roscadas del sistema comienzan a colapsar por la presión.

En todos los casos, se puede observar que mientras mayor es el orificio de la placa, la velocidad necesita ser mayor en comparación a las placas con diámetro más pequeño,



para que se detecte un cambio en la presión. Así, mientras que para la placa de orificio con 0.7" de diámetro, se observa una variación en la presión empezando el 50% de la velocidad, para la placa de 0.3" se observa una variación de presión desde el 25%.



## **CAPÍTULO 5 ANÁLISIS ECONÓMICO**

El capítulo 5 muestra el análisis económico, el cual tiene como finalidad dar a conocer la inversión que se realizó para la construcción del prototipo. Se muestra un presupuesto detallado, en el que se incluyen los precios de los materiales, equipos y servicios que se utilizaron.



## 5.1 INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS ECONÓMICO

La toma de decisiones para definir las distintas alternativas de uso, debe ser lo más eficiente posible para aspirar a un sistema de producción sostenible. Para mejorar la eficacia de técnicos y productores en la toma de decisiones y optimizar la distribución de los recursos, es necesario efectuar un análisis de las diferentes alternativas tecnológicas disponibles, este análisis incluye un análisis económico para complementar la evaluación técnica y social. La evaluación económica muestra como satisfacer necesidades con recursos escasos tomando en cuenta la rentabilidad (evaluación de beneficios y costos) (Herrera & Velazco, 1994). A continuación se muestran algunos de los conceptos más importantes para el correcto análisis económico.

### *Definición de Gasto*

Para realizar sus funciones cotidianas, una empresa, requiere los servicios de electricidad, agua, entre otros; consume papelería y materiales de oficina, gasolina y aceites para el transporte, así como para el funcionamiento de la maquinaria y equipo de producción; contrata diversos servicios, además de pagar sueldos y salarios. Al importe monetario de los bienes y servicios consumidos durante un periodo, se le denomina *gasto*.

### *Definición de Costo*

El costo es un conjunto de gastos. Por ejemplo, el gasto de los materiales consumidos para elaborar un producto, el gasto de los sueldos y salarios del personal, y otros gastos como electricidad, combustibles, mantenimiento, entre otros, de un periodo, se le denomina *costo de producción* (Santana, 2010).

*Definición de Presupuesto*

Presupuesto, significa literalmente “*antes de hecho*”, tiene su origen en la palabra francesa *bougete*, que significa bolsa y posteriormente de *budget*, que en su traducción al español significa *presupuesto*. Existen variadas definiciones de presupuesto algunas de ellas se presentan a continuación:

“Un presupuesto es la estimación programada, en forma sistemática, de las condiciones de operación y de los resultados a obtener por una organización, en un periodo determinado” (Cristobal del Río).

“Un presupuesto es un método sistemático y formalizado para lograr las responsabilidades directivas de planificación, coordinación y control” (Glenn Welsch).

Los presupuestos constituyen una de las principales herramientas de planeación y control de gastos. El presupuesto, es un plan financiero completo diseñado para llegar a una meta propuesta, implica materializar los planes empresariales en información cuantitativa y monetaria. Es igualmente el cimiento de los estados financieros proyectados, y representa la base para la toma de decisiones económicas (Roca, 2004).

*Tabla 5.1 Catálogo de conceptos de materiales*

<b>PARTIDA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>CANT.</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>PRECIO UNITARIO</b>	<b>IMPORTE</b>
1	Tubo PVC HID Ced.40 Blanco 1” 3 metros	3	Pza	\$47.30	\$141.90
2	Tubo PVC HID Ced. 40 blanco ¾ “ 3 metros	1	Pza	\$37.00	\$37.00
3	Válvula esfera ¾” PVC HID. blanco	1	Pza	\$30.00	\$30.00



Tabla 5.2 Continuación

4	Válvula De Esfera PVC Cementar Blanco 1" HID	2	Pza	\$49.00	\$98.00
5	Válvula Compuerta Latón Roscada 1"	2	Pza	\$114.00	\$228.00
6	Tee PVC HID Ced.40 Blanco 1"X1"X1" Liso	3	Pza	\$9.70	\$29.10
7	Tee PVC HID Roscada Ced.40 Blanco 1"X ½ "X1"	9	Pza	\$16.21	\$145.89
8	Codo 90° PVC HID Ced.40 1"	9	Pza	\$6.30	\$56.70
9	Codo 90° PVC HID Ced.40 3/4 "	1	Pza	\$7.80	\$7.80
10	Cople PVC HID Blanco 1"	1	Pza	\$6.50	\$6.50
11	Tuerca Unión Universal PVC HID Blanco 1"	1	Pza	\$32.00	\$32.00
12	Tuerca unión 3/4" PVC HID.	2	Pza	\$36.50	\$73.00
13	Adaptador Macho PVC HID Ced.40 Blanco Roscado 1"	7	Pza	\$6.50	\$45.50
14	Adaptador Hembra PVC HID Ced.40 Blanco Roscado 1"	4	Pza	\$7.51	\$30.04
15	Toma De Manguera latón con adaptador roscable 1/4 "	3	Pza	\$40.00	\$120.00
16	Brida para contenedor roscable 3/4 "	1	Pza	\$40.00	\$40.00
17	Cemento Azul 60 MI	2	Tubo	\$15.00	\$30.00
18	Arco Ajustable Para Segueta	1	Pza	\$77.00	\$77.00
19	Spray PT 2x Blanco 430 MI	1	Bote	\$115.00	\$115.00
20	Reducción 1 x ½ " PVC Beige Macho	1	Pza	\$11.90	\$11.90



Tabla 5.3 Continuación

21	Reducción 1 x 3/4 " PVC Beige Macho	3	Pza	\$7.50	\$22.50
22	Lija Para Agua 600	3	Pliego	\$6.90	\$20.70
23	Lija uso general para acabado de superficies	1	Pliego	\$20.00	\$20.00
24	Tapón Roscado Exterior	6	Pza	\$12.40	\$74.40
25	Barra Aleac. 6061 T-6 AL Red 31.70 X 3660mm	1	Pza	\$69.80	\$69.80
26	Manguera transparente para nivel 3/4"	2	Metro	\$18.00	\$36.00
27	Manguera transparente para nivel 1/4"	5	Metro	\$4.00	\$20.00
28	Contenedor plástico rosa	1	Pza	\$35.00	\$35.00
29	Contenedor plástico azul	1	Pza	\$45.00	\$45.00
30	Cinta velcro	2	Metro	\$10.00	\$20.00
31	Cinta teflón	4	Carrete	\$6.50	\$26.00
32	Paño de algodón	2	Metro	\$7.70	\$15.40
33	Abrazadera 1" a 1/2"	2	pza	\$8.50	\$17.00
<b>TOTAL</b>					<b>\$1,777.13</b>

Tabla 5.4 Catálogo de conceptos del equipo utilizado

<b>PARTIDA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>PRECIO UNITARIO</b>	<b>IMPORTE</b>
1	Manómetro de diafragma conexión inferior 1/4" NPT CARÁTULA 2 1/2"	2	Pza	\$650.00	\$1,300.00
2	Manómetro Bourdon conexión inferior 1/4" carátula 2"	1	pza	\$149.00	\$149.00
3	Manovacuómetro conexión inferior 1/4" carátula 3"	1	pza	\$350	\$350.00
4	Variador de frecuencia trifásico 220V	15	hora	\$150.00	\$2,250.00
5	Bomba trifásica 220V	1	pza	\$1,200	\$1,200
<b>TOTAL</b>					<b>\$5,249.00</b>



Tabla 5.5 Catálogo de conceptos diseño de ingeniería

<b>PARTIDA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>PRECIO UNITARIO</b>	<b>IMPORTE</b>
<b>1</b>	INGENIERO	30	hora	\$ 250.00	\$ 7,500.00
<b>2</b>	CAPTURISTA	18	hora	\$ 45.00	\$ 810.00
<b>3</b>	TÉCNICO	6	hora	\$ 150.00	\$ 900.00
<b>4</b>	ASESOR	18	hora	\$ 400.00	\$ 7,200.00
<b>5</b>	ASESOR	18	hora	\$ 400.00	\$ 7,200.00
<b>TOTAL</b>					<b>\$23,610</b>

Tabla 5.6 Catálogo de conceptos para la mano de obra.

<b>PARTIDA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>PRECIO UNITARIO</b>	<b>IMPORTE</b>
<b>1</b>	Técnico en plomería	24	hora	\$150.00	\$3,600.00
<b>2</b>	Ayudante general	24	hora	\$150.00	\$3,600.00
<b>TOTAL</b>					<b>\$7,200</b>

El costo total del prototipo, tomando en cuenta los gastos de mano de obra, equipo, instrumentos de medición e ingeniería se muestra a continuación:

<b>TOTAL</b>	<b>\$37,836.13</b>
--------------	--------------------

Considerando únicamente los servicios de calibración de manómetros y termopares, la compra de un equipo para calibración de presión, el equipo eléctrico, la asesoría de un ingeniero especialista en certificaciones y la misma certificación, se obtiene un precio total de \$55,700.00 pesos mexicanos, como se muestra en la Tabla 5.5. Sumado a esto, se deben considerar gastos de materiales y equipo de construcción y el servicio de construcción mismo.



Tabla 5.7 Precio de compra externo

<b>PARTIDA</b>	<b>DESCRIPCIÓN</b>	<b>CANTIDAD</b>	<b>UNIDAD</b>	<b>PRECIO UNITARIO</b>	<b>IMPORTE</b>
<b>1</b>	Calibración de manómetros	1	servicio	\$4,500.00	\$4,500.00
<b>2</b>	Calibración de termopar	1	servicio	\$3,500.00	\$3,500.00
<b>3</b>	Equipo calibrador de presión	1	equipo	\$3,700.00	\$3,700.00
<b>4</b>	Bomba trifásica	1	equipo	\$3,000.00	\$3,000.00
<b>5</b>	Variador de frecuencia medio uso	1	equipo	\$15,000.00	\$15,000.00
<b>6</b>	Ingeniero especialista certificaciones	1	servicio	\$12,000.00	\$12,000.00
<b>7</b>	Certificación EMA	1	servicio	\$15,000.00	\$15,000.00
<b>TOTAL</b>					<b>\$56,700.00</b>

Considerando que el equipo de pruebas tiene como finalidad la elaboración de prácticas escolares, la construcción del prototipo con materiales de bajo costo, resulta ser la mejor alternativa de inversión. Los materiales, al ser de bajo costo, no representan un problema en el cambio, reemplazo o sustitución por daños o fracturas y el equipo puede usarse en varias ocasiones antes de que agote su vida útil o sea necesario brindarle mantenimiento.

## CONCLUSIONES

El objetivo del diseño y construcción del prototipo de pruebas, era el de proveer a los estudiantes un conjunto de elementos de bajo costo que les fuera de utilidad para hacer prácticas referentes a temas como son mecánica de fluidos, calibración de instrumentos para medición de presión, temperatura y flujo, entre otros, éste fue cumplido de forma satisfactoria, pudiendo aplicarse mejoras en los materiales del equipo e instrumentos de medición mediante normas o estándares actualizados y normas de calidad, además de que son aplicables mejoras en el sistema de control del prototipo. Los resultados de las pruebas fueron satisfactorias y de gran utilidad para comprobar el correcto funcionamiento del prototipo, que podría describirse funcional en un 100%.



## RECOMENDACIONES

La escala de los manómetros tiene gran influencia en la confiabilidad y precisión en la lectura de los resultados obtenidos. Es de suma importancia observar las tablas de resultados para no exceder el rango de trabajo al que el sistema funciona en óptimas condiciones, si las condiciones de trabajo se sobrepasan, es probable dañar los instrumentos de medición y el mismo prototipo de pruebas. El rango de trabajo óptimo, es entre 25% y 85% de la velocidad de la bomba, mientras que el tiempo de trabajo puede variar de pequeños periodos de tiempo a largos intervalos.

Es recomendable dejar que el sistema se estabilice, es decir, dejar circular el fluido al menos cinco minutos antes de comenzar a realizar las mediciones, esto por las burbujas de aire que puede contener la manguera y los disparos de presión ocurridos al encender la bomba. Si se realizan mediciones con fluidos con viscosidades diferentes a la del agua, los parámetros y rangos de trabajo pueden variar en función a la misma. El prototipo puede ser utilizado para la elaboración de prácticas relacionadas con la medición de variables, calibración de instrumentos de medición y control de procesos, siendo de gran ayuda en la visualización de los parámetros que interfieren en el manejo de fluidos incompresibles y las propiedades de los mismos.

# ANEXOS



Anexo Tabla i Propiedades del agua a diferentes temperaturas (Mott, 1996)

Temperatura °C	Peso específico $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	Densidad $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidad dinámica $\mu$ (Pa*s) o (N*s/m <sup>2</sup> )	Viscosidad cinemática $\nu$ (m <sup>2</sup> /s)
0	9.81	1000	1.75x10 <sup>-3</sup>	1.75 x10 <sup>-6</sup>
5	9.81	1000	1.52 x10 <sup>-3</sup>	1.52 x10 <sup>-6</sup>
10	9.81	1000	1.30 x10 <sup>-3</sup>	1.30 x10 <sup>-6</sup>
15	9.81	1000	1.15 x10 <sup>-3</sup>	1.15 x10 <sup>-6</sup>
20	9.79	998	1.02 x10 <sup>-3</sup>	1.02 x10 <sup>-6</sup>
25	9.78	997	8.91 x10 <sup>-3</sup>	8.94 x10 <sup>-7</sup>
30	9.77	996	8.00 x10 <sup>-3</sup>	8.03 x10 <sup>-7</sup>
35	9.75	994	7.18 x10 <sup>-3</sup>	7.22 x10 <sup>-7</sup>
40	9.73	992	6.51 x10 <sup>-3</sup>	6.56 x10 <sup>-7</sup>
45	9.71	990	5.94 x10 <sup>-3</sup>	6.00 x10 <sup>-7</sup>
50	9.69	988	5.41 x10 <sup>-3</sup>	5.48 x10 <sup>-7</sup>
55	9.67	986	4.98 x10 <sup>-3</sup>	5.05 x10 <sup>-7</sup>
60	9.65	984	4.60 x10 <sup>-3</sup>	4.67 x10 <sup>-7</sup>
65	9.62	981	4.31 x10 <sup>-3</sup>	4.39 x10 <sup>-7</sup>
70	9.59	978	4.02 x10 <sup>-3</sup>	4.11 x10 <sup>-7</sup>
75	9.56	975	3.73 x10 <sup>-3</sup>	3.83 x10 <sup>-7</sup>
80	9.53	971	3.50 x10 <sup>-3</sup>	3.60 x10 <sup>-7</sup>
85	9.50	968	3.30 x10 <sup>-3</sup>	3.41 x10 <sup>-7</sup>
90	9.47	965	3.11 x10 <sup>-3</sup>	3.22 x10 <sup>-7</sup>
95	9.44	962	2.92 x10 <sup>-3</sup>	3.04 x10 <sup>-7</sup>
100	9.40	958	2.82 x10 <sup>-3</sup>	2.94 x10 <sup>-7</sup>

*Anexo Tabla ii Viscosidad dinámica del agua a diferentes temperaturas.*

Temperatura °C	Viscosidad dinámica kg / (m·s)	Temperatura °C	Viscosidad dinámica kg / (m·s)	Temperatura °C	Viscosidad dinámica kg / (m·s)
0	0,001792	34	0,000734	68	0,000416
1	0,001731	35	0,000720	69	0,000410
2	0,001674	36	0,000705	70	0,000404
3	0,001620	37	0,000692	71	0,000399
4	0,001569	38	0,000678	72	0,000394
5	0,001520	39	0,000666	73	0,000388
6	0,001473	40	0,000653	74	0,000383
7	0,001429	41	0,000641	75	0,000378
8	0,001386	42	0,000629	76	0,000373
9	0,001346	43	0,000618	77	0,000369
10	0,001308	44	0,000607	78	0,000364
11	0,001271	45	0,000596	79	0,000359
12	0,001236	46	0,000586	80	0,000355
13	0,001202	47	0,000576	81	0,000351
14	0,001170	48	0,000566	82	0,000346
15	0,001139	49	0,000556	83	0,000342
16	0,001109	50	0,000547	84	0,000338
17	0,001081	51	0,000538	85	0,000334
18	0,001054	52	0,000529	86	0,000330
19	0,001028	53	0,000521	87	0,000326
20	0,001003	54	0,000512	88	0,000322
21	0,000979	55	0,000504	89	0,000319
22	0,000955	56	0,000496	90	0,000315
23	0,000933	57	0,000489	91	0,000311
24	0,000911	58	0,000481	92	0,000308
25	0,000891	59	0,000474	93	0,000304
26	0,000871	60	0,000467	94	0,000301
27	0,000852	61	0,000460	95	0,000298
28	0,000833	62	0,000453	96	0,000295
29	0,000815	63	0,000447	97	0,000291
30	0,000798	64	0,000440	98	0,000288
31	0,000781	65	0,000434	99	0,000285
32	0,000765	66	0,000428	100	0,000282
33	0,000749	67	0,000422		



Anexo Tabla iii Tabla de conversiones

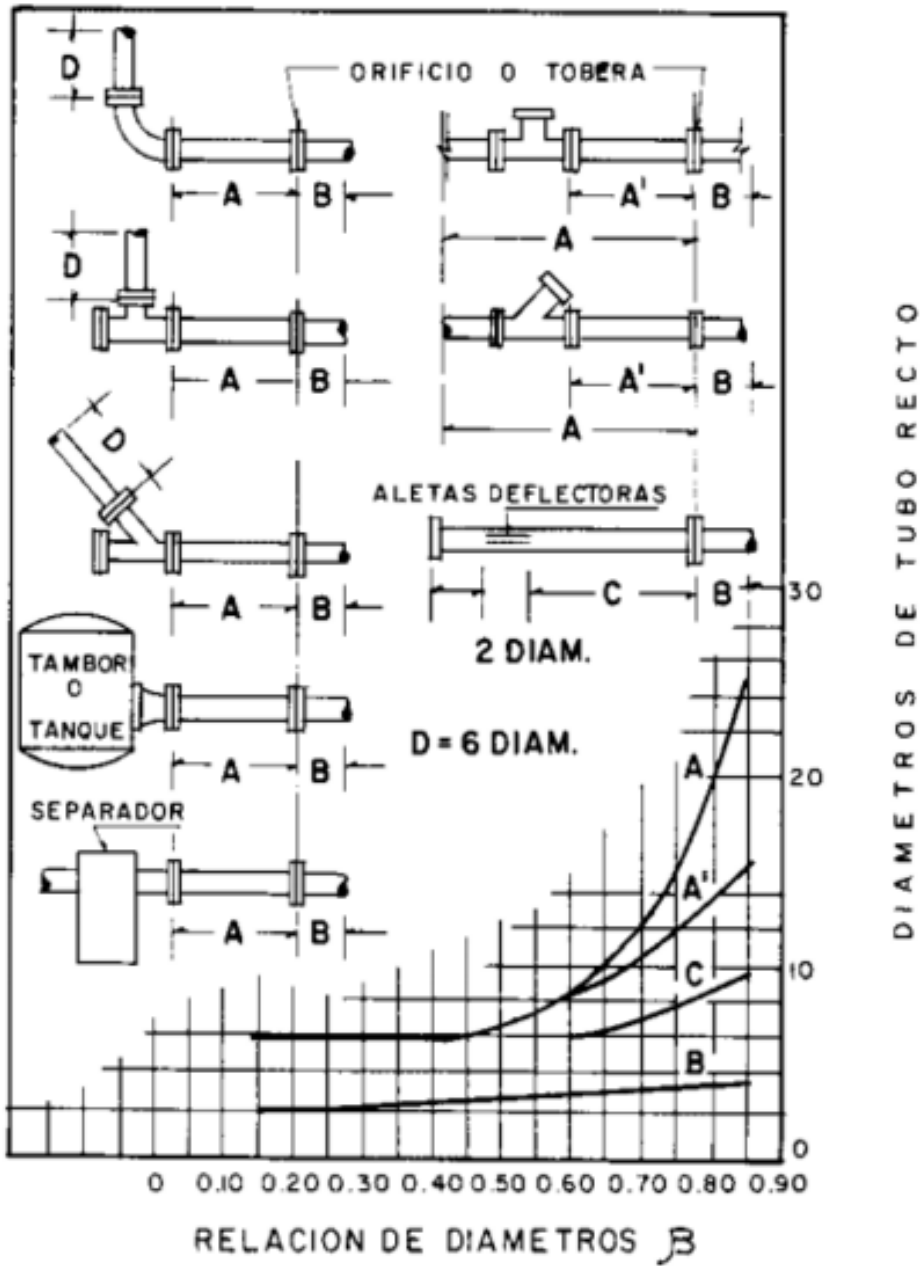
<b>Longitud</b>	<b>Área</b>	<b>Volumen</b>
1 pie = 0.3048	1 pie <sup>2</sup> = 0.0929 m <sup>2</sup>	1 pie <sup>3</sup> = 7.48 gal
1 pulg = 25.4 mm	1 pulg <sup>2</sup> = 645.2 mm <sup>2</sup>	1 pie <sup>3</sup> = 1728 in <sup>3</sup>
1 mi = 5280	1 m <sup>2</sup> = 10.76 ft <sup>2</sup>	1 pie <sup>3</sup> = 0.0283 m <sup>3</sup>
1 mi = 1.609 km	1 m <sup>2</sup> = 10 <sup>6</sup> mm <sup>2</sup>	1 gal = 0.00379 m <sup>3</sup>
1 km = 1000 m		1 gal = 3.785 L
		1 m <sup>3</sup> = 1000 L
<b>Velocidad de fluido de volumen</b>	<b>Presión</b>	<b>Presión</b>
1 pie <sup>3</sup> /s = 449 gal/min	1 bar = 100 kPa	1 cm.c.a = 0.0142233 psi
1 pie <sup>3</sup> /s = 0.0283 m <sup>3</sup> /s	1 bar = 14.50 psi	
1 gal/min = 6.309 x 10 <sup>-5</sup>	1 m.c.a = 9806,65 Pa	
1 gal/min = 3.785 L/min	1 atm = 10,33 mca	
1 L/min = 16.67 x 10 <sup>-6</sup> m <sup>3</sup> /s	10,33 <u>mca</u> = 760 <u>mm</u> Hg	
1 m <sup>3</sup> /s = 60 000 L/min	1 Bar = 1 019.744 cm.c.a	
	1 Pa = 0.010 2 cm.c.a	<b>Peso específico</b>
	1 cm.c.a = 98.063 8 Pa	1 lb/ pie <sup>3</sup> = 157.1 N/m <sup>3</sup>



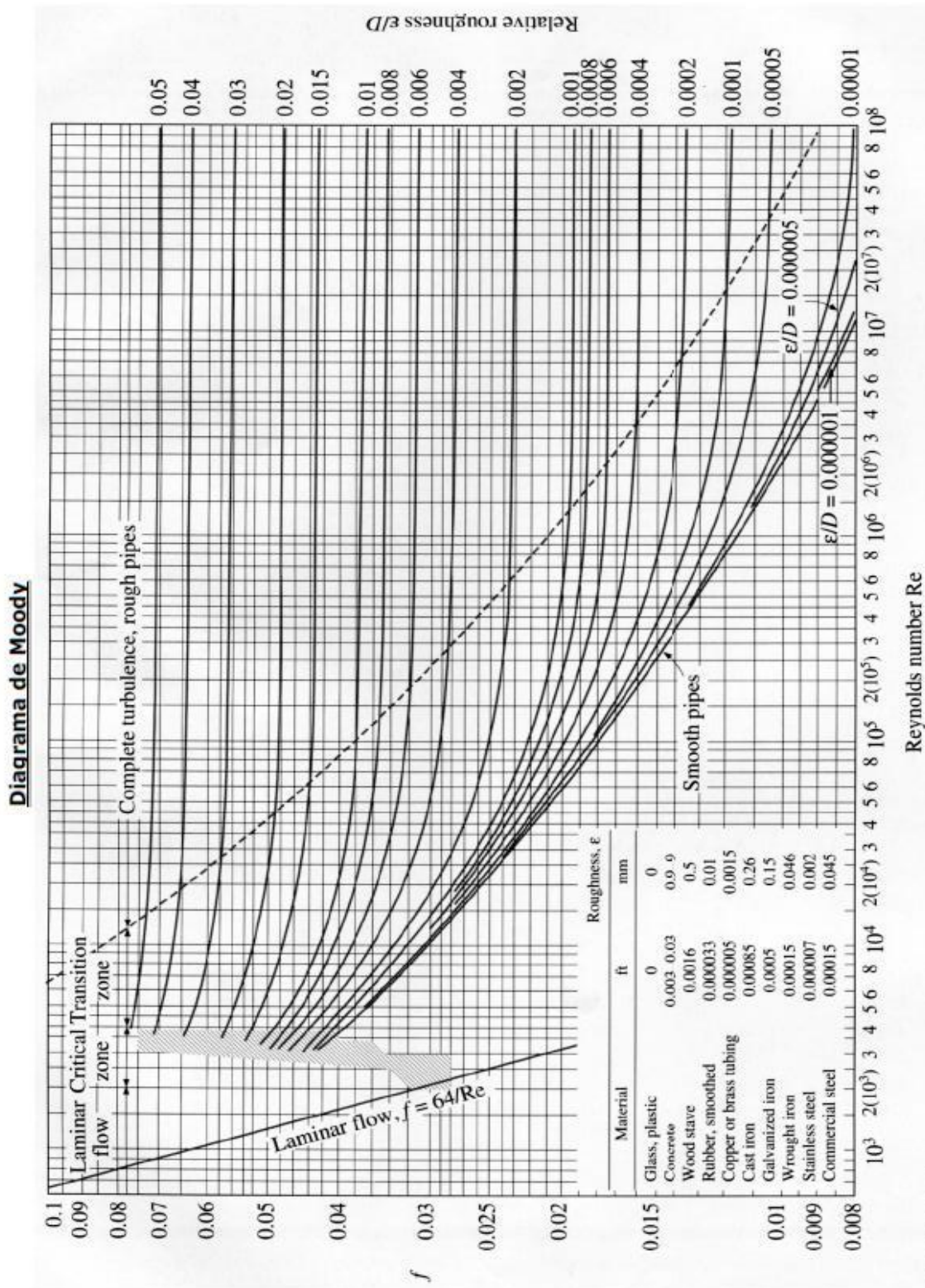
Anexo Tabla iv Densidad, peso específico y gravedad específica de los líquidos de uso más común (Mott, 1996).

<b>LÍQUIDO</b>	<b>DENSIDAD</b> $\frac{g}{cm^3}$	<b>PESO ESPECÍFICO</b> $\frac{N}{m^3}$	<b>GRAVEDAD ESPECÍFICA</b>
Aceite de cocina	0.92	9.015	
Acetona	0.787	7.740	0.787
Agua	1	9.800	
Agua de mar	1.027	10.065	10.30
Alcohol Eílico	0.787	7.640	0.787
Cerveza	1.010	9.900	
Cloroformo	1.475	14.485	
Etanol	0.81	7.940	
Gasolina	0.68	6.660	0.68
Glicerina	1.26	12.350	1.258
Leche	1.03	10.100	
Mercurio	13.54	132.8	13.54
Petróleo	0.8	7.840	
Etinlglicol	1.1	10.79	1.100

Anexo Tabla v Tabla de diámetros rectos de tubo necesario en según a la relación de diámetros para las placas de orificio.



Anexo Tabla vi Diagrama de Moody





## REFERENCIAS

- AFRISO EUROINDEX. (2007). *Manual de instrucciones para manómetros*.
- Arturo, A. C. (2008). *TESIS Medidor de flujo de placa de orificio con sensores de presión de fibra óptica*. México, DF: IPN.
- British Standard. (1998). Pressure gauges: Part 2 selection and installation recommendations for pressure gauges. *BS EN837-2:1998*, (pág. 10). United Kingdom.
- CONAGUA. (1994). *III.3.1 Selección e instalación de equipos de macromedición*. México, D.F.
- Crane. (2006). *Fluidos en válvulas, accesorios y tuberías*. McGraw Hill.
- Felices, A. R. (s.f.). *Hidráulica de tuberías y canales*.
- Giles, R. V. (2010). *Mecánica de los fluidos e hidráulica*. McGraw Hill.
- Herrera, F., & Velazco, C. (1994). *Fundamentos del análisis económico*. Costa Rica: CATIE.
- I. Martín, R. S. (2011). *Mecánica de fluidos Tema 1 flujo interno de fluidos compresibles e incompresibles*. California, EUA.
- ISO 5167-1. (2003). *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full, part 1*. Geneva: ISO.
- ISO 5167-2. (2003). *Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits running full, part 2*. .
- Metas S.A. de C.V. Metrólogos asociados. (2002). *Termopares*.
- Mott, R. L. (1996). *Mecánica de fluidos aplicada*. México: Pearson.

- OMEGA. (11 de 04 de 2016). *OMEGA su única fuente para la medición y control de procesos*. Obtenido de <http://es.omega.com/>
- Roca, C. M. (2004). *Presupuestos para empresas de manufactura* . Barranquilla, Colombia: Uninorte.
- Rocío M. Marban, J. P. (2002). *Metrología para no metrólogos*. Guatemala, Centro América.
- Romero, R. A. (2001). *CENAM: Incertidumbre en la medición de flujo másico mediante una placa de orificio*. México, Queretáro.
- Romero, R. A. (2001). *Incertidumbre en la medición de flujo másico mediante una placa de orificio*. México, Qro.: CENAM.
- Santana, J. D. (2010). *Costos Industriales Sin contabilidad*. México: Prentice Hall.
- Sergio Augusto Caporali, D. L. (1995). *Pirometría: un nuevo estilo de enseñanza*. Lima: CEPIS 038376 BVSDE.
- Villalobos. (1999). *Medición de flujo, placas de orificio, toberas de flujo y tubos venturi*. Mexico, D.F.: LIMUSA.
- Wiggert, M. C. (2009). *Mecánica de fluidos*. Michigan: Thomson.
- ZAES. (2015). *Gauges Instrumentation: siphon tubes*.