



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica

**DISEÑO Y DESARROLLO DE LAS PRÁCTICAS DE LABORATORIO DEL
EQUIPO DE SIMULACIÓN DE TURBINA FRANCIS Y PELTON PARA EL
CURSO DE SISTEMAS DE GENERACIÓN**

Felipe Salvador Castillo González

Asesorado por el Ing. Gustavo Benigno Orozco Godínez

Guatemala, septiembre de 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**DISEÑO Y DESARROLLO DE LAS PRÁCTICAS DE LABORATORIO DEL
EQUIPO DE SIMULACIÓN DE TURBINA FRANCIS Y PELTON PARA EL
CURSO DE SISTEMAS DE GENERACIÓN**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA

POR

FELIPE SALVADOR CASTILLO GONZÁLEZ

ASESORADO POR EL ING. GUSTAVO BENIGNO OROZCO GODÍNEZ

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2015

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
VOCAL I	Ing. Angel Roberto Sic García
VOCAL II	Ing. Pablo Christian de León Rodríguez
VOCAL III	Inga. Elvia Miriam Ruballos Samayoa
VOCAL IV	Br. Narda Lucía Pacay Barrientos
VOCAL V	Br. Walter Rafael Véliz Muñoz
SECRETARIA	Inga. Lesbia Magalí Herrera López

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANO	Ing. Murphy Olympto Paiz Recinos
EXAMINADOR	Ing. Jorge Luis Pérez Rivera
EXAMINADOR	Ing. Carlos Aníbal Chicojay Coloma
EXAMINADOR	Ing. Armando Alonso Rivera Carrillo
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

DISEÑO Y DESARROLLO DE LAS PRÁCTICAS DE LABORATORIO DEL EQUIPO DE SIMULACIÓN DE TURBINA FRANCIS Y PELTON PARA EL CURSO DE SISTEMAS DE GENERACIÓN

Tema que me fuera asignado por la Dirección de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, con fecha 10 de noviembre de 2008.


Felipe Salvador Castillo González

Facultad de Ingeniería
Universidad de San Carlos de Guatemala

Guatemala 21 de julio de 2015

Francisco Javier González López
Coordinador Área de Potencia

Estimado Ingeniero González:

De acuerdo con la designación hecho por la Dirección de la Escuela, me permito informarle que he tenido a bien asesorar el trabajo de graduación titulado " **DISEÑO Y DESARROLLO DE LAS PRACTICAS DE LABORATORIO DEL EQUIPO DE SIMULACION DE TURBINA FRANCIS Y PELTON PARA EL CURSO DE SISTEMAS DE GENERACION** " siendo el tema desarrollado por el estudiante **Felipe Salvador Castillo González**, encontrándolo satisfactorio, por lo que resuelvo dar mi aprobación al mismo, remitiéndole a la coordinación para el tramite pertinente.

Por tanto, el autor de este trabajo de graduación y yo como su asesor, nos hacemos responsables por el contenido y conclusiones del mismo.

Sin otro particular, me es grato saludarle.

Atentamente,



Ing. Gustavo Benigno Orozco

ING. GUSTAVO B. OROZCO
COLEGIADO 1879



Señor Director
Ing. Guillermo Antonio Puente Romero
Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica
Facultad de Ingeniería, USAC.

Señor Director:

Me permito dar aprobación al trabajo de Graduación titulado:
DISEÑO Y DESARROLLO DE LAS PRÁCTICAS DE
LABORATORIO DEL EQUIPO DE SIMULACIÓN DE TURBINA
FRANCIS Y PELTON PARA EL CURSO DE SISTEMAS DE
GENERACIÓN, del estudiante Felipe Salvador Castillo González,
que cumple con los requisitos establecidos para tal fin.

Sin otro particular, aprovecho la oportunidad para saludarle.

Atentamente,
DIRECCIÓN Y ENSEÑANZA A TODOS

Ing. Francisco Javier González López
Coordinador Área Potencia





REF. EIME 55 2015.

El Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, después de conocer el dictamen del Asesor, con el Visto Bueno del Coordinador de Área, al trabajo de Graduación del estudiante; FELIPE SALVADOR CASTILLO GONZÁLEZ titulado: DISEÑO Y DESARROLLO DE LAS PRÁCTICAS DE LABORATORIO DEL EQUIPO DE SIMULACIÓN DE TURBINA FRANCIS Y PELTON PARA EL CURSO DE SISTEMAS DE GENERACIÓN, procede a la autorización del mismo.

Ing. Guillermo Antonio Puente Romero



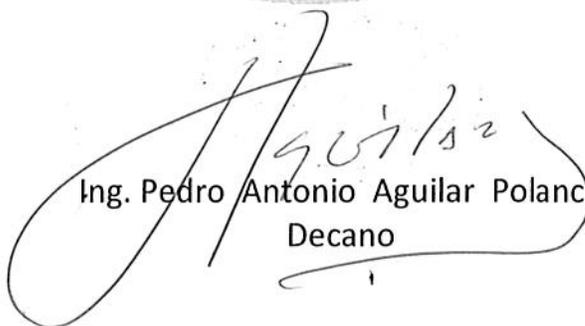
GUATEMALA, 31 DE JULIO 2015.



DTG. 473.2015

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, al Trabajo de Graduación titulado: **DISEÑO Y DESARROLLO DE LAS PRÁCTICAS DE LABORATORIO DEL EQUIPO DE SIMULACIÓN DE TURBINA FRANCIS Y PELTON PARA EL CURSO DE SISTEMAS DE GENERACIÓN**, presentado por el estudiante universitario: **Felipe Salvador Castillo González**, y después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. Pedro Antonio Aguilar Polanco
Decano

Guatemala, septiembre de 2015

/gdech



ACTO QUE DEDICO A:

- Dios** Por ser nuestro guía, a Jesús por ser nuestra inspiración, modelo y el ejemplo más grande de amor en este mundo.
- Mis padres** Edgar Rafael Castillo Recinos y Ruth Antonieta Gonzalez Padilla, porque su amor será siempre mi inspiración.
- Mis abuelos** Marcelino Antonio Gonzáles Salguero, Rafael Arcangel Castillo, Guadalupe Recinos Linares y Vicenta Padilla, por brindarme a padres maravillosos.
- Mis hermanos** Julio Rafael, Ruth Guadalupe y Maria de las Rosas Castillo González.

AGRADECIMIENTOS A:

Universidad de San Carlos de Guatemala Por ser la herramienta que me ayudó a cumplir mis sueños.

Facultad de Ingeniería Por brindarme la oportunidad de adquirir conocimientos y amigos durante el desarrollo de mi carrera.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	VII
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO	XIII
RESUMEN.....	XVII
OBJETIVOS.....	XIX
Hipótesis.....	XX
INTRODUCCIÓN	XXI
1. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA DE MEDICIÓN DE CAUDAL CON VERTEDEROS TRIANGULARES DE ÁNGULO RECTO	1
1.1. Propiedades de los fluidos.....	1
1.2. Densidad y peso específico.....	2
1.3. Vertederos.....	3
1.4. Práctica para medir caudal con vertederos triangulares de ángulo recto.....	7
1.4.1. Objetivos de la práctica	7
1.4.2. Dispositivo a utilizar	7
1.4.3. Pasos para la elaboración de la práctica	10
1.4.3.1. Paso 1. Preparación	10
1.4.3.2. Paso 2. Medición	10
1.4.3.3. Paso 3. Finalización.....	10
1.4.4. Experimento a realizar	11
1.4.4.1. Paso 1. Medición	11
1.4.4.2. Paso 2. Cálculo.....	11
1.4.5. Ecuaciones a utilizar.....	11

1.4.6.	Arreglo de resultados	13
2.	DESARROLLO DE LA PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO PARA TURBINA PELTON.....	15
2.1.	Energía hidráulica	15
2.2.	Turbinas hidráulicas	16
2.3.	Turbinas Pelton	17
2.4.	Desarrollo de la práctica de prueba de funcionamiento de turbina Pelton	20
2.4.1.	Objetivos	20
2.4.2.	Aparato experimental	20
2.4.3.	Desarrollo de la práctica.....	22
2.4.3.1.	Preparación	23
2.4.3.2.	Medición	23
2.4.3.3.	Procedimiento de finalización	23
2.4.4.	Rango del experimento	24
2.4.4.1.	Medición	24
2.4.4.2.	Calcular	24
2.4.5.	Ecuaciones a utilizar	24
2.5.	Interpretación de resultados.....	26
3.	DESARROLLO DE LA PRÁCTICA DE MEDICIÓN POR PÉRDIDAS POR FRICCIÓN EN TUBERÍAS Y ACCESORIOS.....	29
3.1.	Cálculo de pérdidas de fricciones en tuberías.....	30
3.2.	Cálculo de pérdidas de carga en accesorios.....	32
3.2.1.	Ensanchamiento brusco de sección.....	32
3.2.2.	Salida de tubería o entrada en depósito.....	33
3.2.3.	Ensanchamiento gradual de sección.....	33
3.2.4.	Estrechamiento brusco y gradual	34

3.2.5.	Entrada en tubería o salida de depósito	35
3.2.6.	Otros accesorios.....	35
3.3.	Práctica para la medición de pérdidas de fricción en accesorios y tubería	36
3.3.1.	Objetivos.....	36
3.3.2.	Aparato experimental.....	36
3.3.3.	Procedimiento del experimento	37
3.3.3.1.	Preparación	37
3.3.3.2.	Medición	37
3.3.4.	Rango del experimento.....	38
3.3.4.1.	Medición	38
3.3.4.2.	Calcular	39
3.3.4.3.	Ecuaciones a utilizar.....	39
3.3.5.	Interpretación de resultados	44
4.	DESARROLLO DE LAS PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE LAS BOMBAS MULTIETAPAS	49
4.1.	Propiedades de una bomba centrífuga.....	49
4.2.	Funcionamiento de las bombas centrífugas	50
4.3.	Clasificación de las bombas centrífugas.....	53
4.4.	Factores de selección de las bombas	53
4.5.	Prueba de funcionamiento de bomba multietapa	55
4.5.1.	Objetivos.....	55
4.5.2.	Aparato experimental.....	55
4.5.3.	Procedimiento del experimento	56
4.5.3.1.	Preparación	56
4.5.3.2.	Medición	56
4.5.3.3.	Proceso de finalización de práctica	56
4.5.4.	Rango del experimento.....	57

	4.5.4.1.	Medición	57
	4.5.4.2.	Cálculo	57
	4.5.4.3.	Ecuaciones a utilizar	58
	4.5.5.	Arreglo de los resultados.....	60
5.	DESARROLLO DE LA PRUEBA DE EFECTO VENTURI		63
5.1.	Experimento de medición por medio de tubo de Venturi.....		64
	5.1.1.	Objetivos	64
	5.1.2.	Aparato experimental	64
	5.1.3.	Procedimiento del experimento	66
	5.1.3.1.	Preparación	66
	5.1.3.2.	Medición	66
	5.1.3.3.	Finalización de práctica	66
	5.1.4.	Rango del experimento	67
	5.1.4.1.	Medición	67
	5.1.4.2.	Cálculo	67
	5.1.5.	Ecuaciones a utilizar	68
	5.1.6.	Arreglo de los resultados.....	70
	5.1.6.1.	Registro de los resultados	70
6.	DESARROLLO DE LA PRÁCTICA DE TURBINA FRANCIS.....		73
6.1.	Ventajas de la turbina Francis		74
6.2.	Desventajas		75
6.3.	Componentes principales.....		75
6.4.	Prueba de funcionamiento de turbina Francis.....		76
	6.4.1.	Objetivos	76
6.5.	Aparato experimental		76
6.6.	Procedimiento de la práctica		78
	6.6.1.	Preparación	78

6.6.2.	Medición	79
6.6.3.	Procedimiento de finalización	79
6.7.	Rango del experimento.....	79
6.7.1.	Medición	80
6.7.2.	Calcular	80
6.7.3.	Ecuaciones a utilizar.....	80
6.8.	Interpretación de resultados	82
6.8.1.	Registro de resultados.....	82
CONCLUSIONES		85
RECOMENDACIONES.....		87
BIBLIOGRAFÍA.....		89
ANEXOS.....		91

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

1.	Flujo ideal sobre un vertedero de pared delgada	5
2.	Dimensiones en milímetro del vertedero triangular vista transversal	8
3.	Dimensiones en milímetro de vertedero triangular vista longitudinal	8
4.	Ejemplificación de alturas a utilizar para el desarrollo de la práctica	9
5.	Proceso energético hidroeléctrico	15
6.	Inyector de turbina Pelton e incidencia de chorro de agua sobre el rodete	18
7.	Detalle y dimensiones de turbina Pelton vista lateral	21
8.	Detalle y dimensiones de turbina Pelton vista de frente	22
9.	Bomba centrífuga, disposición, esquema y perspectiva.....	52
10.	Detalle y dimensiones de tubo Venturi vista lateral	65
11.	Detalle y dimensiones de tubo Venturi vista planta	65
12.	Detalle de turbina Francis, vista lateral	77
13.	Detalle de turbina Francis, vista de planta	78

TABLAS

I.	Datos obtenidos durante la práctica de vertederos triangulares de ángulo recto	13
II.	Datos calculados de vertederos triangulares de ángulo recto	14
III.	Datos obtenidos durante la práctica de turbina Pelton	26
IV.	Datos calculados de práctica de turbina Pelton	27

V.	Valores del coeficiente m en un ensanchamiento gradual.....	34
VI.	Coeficiente de rugosidad K.....	36
VII.	Datos obtenidos durante la práctica de medición de pérdidas de fricción en accesorios y tubería.....	44
VIII.	Datos obtenidos durante la práctica de medición de pérdidas de fricción en accesorios y tubería.....	45
IX.	Datos calculados en la práctica de medición de pérdidas de fricción en accesorios y tubería.....	45
X.	Coeficiente de presión o coeficiente de pérdidas	46
XI.	Datos calculados en coeficiente de presión y pérdidas	46
XII.	Datos obtenidos durante la práctica de prueba de funcionamiento de bomba multietapa	60
XIII.	Datos obtenidos en mediciones de presión, velocidad, voltaje, corriente y factor de potencia.....	61
XIV.	Datos calculados en la bomba.....	61
XV.	Datos calculados en el motor.....	62
XVI.	Datos obtenidos durante práctica de medición por medio de tubo Venturi	70
XVII.	Datos calculados en práctica de medición con tubo Venturi 1	71
XVIII.	Datos calculados en práctica de medición con tubo Venturi 2.....	71
XIX.	Datos obtenidos durante la práctica de turbina Francis	82
XX.	Datos calculados durante la práctica de turbina Francis.....	83

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
G	Aceleración debido a la gravedad.
Ht	Altura de agua.
Hd	Altura de entrega relacionada al nivel del tanque.
H	Altura de nivel de agua.
Hs	Altura de succión relacionada al nivel del tanque.
θ	Ángulo teta.
A	Área.
H	Bomba.
G	Carga aplicada al dinamómetro.
Q	Caudal.
C	Constante numérica.
C_Q	Coefficiente de capacidad.
f	Coefficiente de fricción.
ξ	Coefficiente de fricción dentro de accesorios de tubería.
ρ	Densidad.
D	Diámetro.
η	Eficiencia de turbina Pelton, Francis o de la bomba.
Pf	Factor de potencia.
Q_2	Flujo promedio.
Tan	Función trigonométrica llamada tangente.
Q_1	Índice del flujo real.
P	La salida real de la turbina Pelton.

Hp	Localizador del medidor de gancho a ese nivel de agua.
L	Longitud de la conducción.
M	Masa.
W	Masa de agua medida por la pesa.
Hv	Nivel de agua en el tanque.
R_{ED}	Número de Reynols.
H_r	Pérdida de carga.
h₁₂	Pérdida de fricción en porción de tuberías.
Ph	Pérdidas de potencia hidráulicas.
Pv	Pérdidas de potencia volumétrica.
Pm	Pérdidas de potencia mecánicas.
H_{int}	Pérdidas de altura total hidráulica.
W	Peso.
Y	Peso específico.
H	Presión en el inyector.
P_s	Presión de salida de la bomba.
P_r	Presión entregada en el regulador de presión.
P_d	Presión entregada por la bomba.
π	Pi, constante numérica equivalente a 3,1416.
PI	Potencia de salida.
√	Raíz cuadrada.
P_{th}	Salida teórica de potencia en la turbina Pelton.
S	Sección de la tubería.
T	Temperatura.
T	Tiempo requerido.
v	Volumen.
V₀	Velocidad teórica del flujo.
N	Velocidad rotacional de la turbina Pelton.

N

Viscosidad cinemática.

GLOSARIO

Caudal	Es la cantidad de fluido que avanza en una unidad de tiempo. Se denomina también caudal volumétrico o índice de flujo fluido, y que puede ser expresado en masa o en volumen.
Coeficiente	Es una expresión numérica que mediante alguna fórmula determina las características o propiedades de un cuerpo.
Coeficiente de fricción	Expresa la oposición al desplazamiento que ofrecen las superficies de dos cuerpos en contacto.
Dinamómetro	Es un instrumento utilizado para medir fuerzas o para pesar objetos.
Eficiencia	La eficiencia o rendimiento de un proceso o de un dispositivo es la relación entre la energía útil y la energía invertida.

Energía potencia	Es la energía que mide la capacidad que tiene dicho sistema para realizar un trabajo en función exclusivamente de su posición o configuración.
Flujo	Caudal de un fluido continuo.
Líquido incomprensible	Es cualquier fluido cuya densidad siempre permanece constante con el tiempo, y tiene la capacidad de oponerse a la compresión del mismo bajo cualquier condición. Esto quiere decir que ni la masa ni el volumen del fluido pueden cambiar.
Pérdida de carga	Es la pérdida de energía dinámica del fluido debido a la fricción de las partículas del fluido entre si y contra las paredes de la tubería que las contiene.
Plotear	Imprimir diagramas o gráficos con el ploter.
Ploter	Periférico de una computadora que dibuja o representa diagramas y gráficos.
Potencia	Es la cantidad de energía producida o consumida por unidad de tiempo.
Tacómetro	Es un dispositivo que mide la velocidad de giro de un eje, normalmente la velocidad de giro de un motor.

Turbina

Estas son máquinas de fluido, a través de las cuales pasa un fluido en forma continua y este le entrega su energía a través de un rodete con paletas o alabes.

Vertedero

Es una estructura hidráulica destinada a permitir el pase, libre o controlado, del agua en los escurrimientos superficiales, siendo el aliviadero en exclusiva para el desagüe y no para la medición.

Voluta

Cámara o carcasa en forma de espiral de una bomba centrífuga.

RESUMEN

El presente trabajo de graduación consiste en la implementación de los manuales de operación, uso y capacitación para el módulo experimental de turbina Pelton y Francis, donado por el Gobierno de la República de Japón, a través de la Agencia de Cooperación Internacional de Japón (JICA) al Instituto nacional de electrificación (Inde).

En el primer capítulo, se desarrolla la práctica de medición de caudal con vertederos triangulares de ángulo recto, con el cual se adquieren conocimientos de propiedades de los fluidos, vertederos y la determinación de caudales para determinar el flujo de agua que produce el módulo experimental.

En el segundo capítulo se desarrolla la prueba de funcionamiento de la turbina Pelton, con el cual se inicia el proceso de análisis de transformación de la energía, simulando los aspectos que se pueden encontrar en una central hidroeléctrica y las características principales de funcionamiento de este tipo de turbinas.

En el desarrollo de la práctica del capítulo tres, se determinan las pérdidas en los accesorios de un sistema de tuberías, las cuales se determinan en función al tipo de accesorio, características de construcción del mismo, así como de las propiedades del agua.

En el capítulo cuatro se desarrolla la prueba de funcionamiento de las bombas multietapa, estas bombas otorgan la fuerza impulsora en cada uno de los elementos del dispositivo de práctica, por ello en este desarrollo de prueba,

se aprenderá de las propiedades de las bombas y el funcionamiento de las mismas.

El capítulo cinco consiste en una prueba por medio de un tubo Venturi, el cual es un elemento utilizado para determinar el caudal que pasa por una tubería a través de dicho elemento.

En el capítulo seis se desarrolla la práctica de funcionamiento de la turbina Francis. La turbina tipo Francis cuenta con una válvula para calibrar la apertura de los alabes (ángulo de inclinación) con lo cual se modifica la cantidad de agua que sale de la turbina, esto ocasiona el movimiento circular de los alabes de la turbina y por lo tanto al eje que esta acoplado rígidamente a esta. La práctica se desarrolla para distintos caudales con el objetivo de simular las condiciones de funcionamiento de la turbina Francis y realizar una comparación entre los cálculos teóricos y los experimentales.

OBJETIVOS

General

Realizar el diseño, desarrollo e implementación de las prácticas del equipo de simulación de turbina Francis y Pelton referente al curso de Sistemas de Generación.

Específicos

1. Presentar el desarrollo de la práctica de medición de caudal con vertederos de ángulo recto.
2. Presentar el desarrollo de la prueba de funcionamiento para turbina Pelton.
3. Presentar el desarrollo de la práctica de medición por pérdidas por fricción en tuberías y accesorios.
4. Presentar el desarrollo de las pruebas de funcionamiento de las bombas multietapas.
5. Presentar el desarrollo de la prueba de efecto Venturi.
6. Presentar el desarrollo de la práctica de turbina Francis.

Hipótesis

La implementación y desarrollo de las prácticas de laboratorio del equipo de simulación de turbina Pelton y Francis referente al curso de Sistemas de Generación, ayudaran al estudiante de la Facultad de Ingeniería a comprender de una mejor manera los conceptos físicos aplicados en las prácticas de laboratorio relacionados al contenido temático de los cursos.

INTRODUCCIÓN

Las características geográficas del territorio de la República de Guatemala, con recurso hidráulico y la búsqueda de un costo competitivo de la energía eléctrica, en conjunto con los beneficios fiscales que brinda el Gobierno de Guatemala para este tipo de proyectos, otorgan las condiciones para implementar estudios hidroeléctricos con embalse de regulación diaria, semanal o anual. Así también proyectos de generación distribuida. El principal elemento para la conversión de la energía de las turbinas hidráulicas es distinguir cual es el tipo de turbina para cada proyecto de generación. Se deben considerar las características de almacenaje, conducción y las pérdidas en accesorios ocasionados por el agua, porque pueden repercutir en la evaluación de una tasa de retorno de la inversión.

El presente trabajo de graduación se realiza con el objetivo de aprovechar el módulo de capacitación y simulación de turbinas tipo Pelton y Francis, con los que cuenta el Instituto Nacional de Electrificación (Inde). Se debe reconocer las características de funcionamiento de las pérdidas en accesorios y determinar los caudales a las que operan las turbinas, a efecto de que puedan ser simulados con máxima eficiencia por los estudiantes de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala y de otras universidades, por los trabajadores del Inde y público en general que desee ampliar sus conocimientos sobre estas turbinas, con el fin de consolidar sus conocimientos en las turbinas hidráulicas.

1. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA DE MEDICIÓN DE CAUDAL CON VERTEDEROS TRIANGULARES DE ÁNGULO RECTO

1.1. Propiedades de los fluidos

Con la finalidad de comprender el comportamiento de los fluidos, se darán a conocer las características de estos, con especial atención a las propiedades del agua, que es el fluido con el cual se trabajará en el desarrollo de las distintas prácticas de laboratorio.

Se inicia con la característica de que un fluido puede ser líquido o gaseoso. Un líquido, por ejemplo, cuando se encuentra en un recipiente, tiende a tomar la forma del contenedor, cubriendo el fondo y los lados, la superficie superior se encuentra en contacto con la atmósfera por encima de ella, manteniendo un nivel uniforme. Por el contrario un gas en un contenedor cerrado, tiende a expandirse y llenar completamente el recipiente que le contiene, si este recipiente se abre, el gas tiende a seguir expandiéndose y escapar del contenedor.

Una diferencia importante de señalar de los fluidos es:

- Los líquidos son solo ligeramente comprensibles
- Los gases son fácilmente comprensibles

La comprensibilidad se refiere al cambio de volumen de una sustancia cuando experimenta un cambio de presión.

Como se mencionó anteriormente los líquidos son muy poco comprensibles, lo cual indica que se necesitan grandes cambios de presión para producirse un pequeño cambio en el volumen, por esta razón los líquidos son considerados como incomprensibles en el desarrollo de las prácticas de este manual.

1.2. Densidad y peso específico

Debido a que un fluido se encuentra en flujo continuo (movimiento constante, como lo es en el canal del módulo), o una pequeña cantidad en reposo (estáticos, como en el tanque del módulo), es más conveniente relacionar la masa y el peso del fluido con un volumen dado de fluido, por lo cual se definirán dos características de los fluidos de la siguiente manera:

La densidad es la cantidad de masa por unidad de volumen de una sustancia.

$$\rho = \frac{m}{v} \text{ kg/m}^3$$

Donde:

ρ = densidad kg/m^3

m = masa kg

v = volumen m^3

El peso específico es la cantidad de peso por unidad de volumen de una sustancia.

$$\gamma = \frac{w}{v} \text{ N/m}^3$$

Donde

γ = peso específico N/m^3

w = peso N

v = volumen m^3

Una ecuación que relaciona peso específico con densidad es la siguiente:

$$\gamma = \rho g$$

Donde:

γ = peso específico N/m^3

ρ = densidad kg/m^3

g = aceleración debido a la gravedad

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$

1.3. Vertederos

El caudal en un canal abierto puede ser medido mediante un vertedor, que es una obstrucción hecha en el canal para que el líquido retroceda un poco atrás y fluya sobre o a través de ella. Si se mide la altura de la superficie líquida de la corriente arriba es posible determinar el caudal. Los vertederos,

construidos con una hoja de metal u otro material, que permitan que el chorro o manto salgan libremente reciben el nombre de vertederos de pared delgada.

Debe haber una posa de amortiguación o un canal acceso aguas arriba para calmar cualquier turbulencia y lograr que el agua se acerque al vertedero lenta y suavemente. Dentro del módulo de simulación esto se logra con la incorporación de las placas perforadas.

La utilización de vertederos de pared delgada está limitada generalmente a laboratorios, canales pequeños y corrientes que no lleven escombros y sedimentos. Los tipos más comunes son el vertedero rectangular y el triangular. El canal de aguas arriba debe ser instalado verticalmente y el borde de la placa debe estar cuidadosamente conformado. La estructura delgada está propensa a deteriorarse y con el tiempo la calibración puede ser afectada por la erosión de la cresta.

El vertedero triangular es preferido cuando las descargas son pequeñas, porque la sección transversal de la lámina vertiente muestra de manera notoria la variación en altura.

La relación entre la descarga y la altura sobre la cresta del vertedero, puede obtenerse matemáticamente haciendo las siguientes suposiciones del comportamiento del flujo:

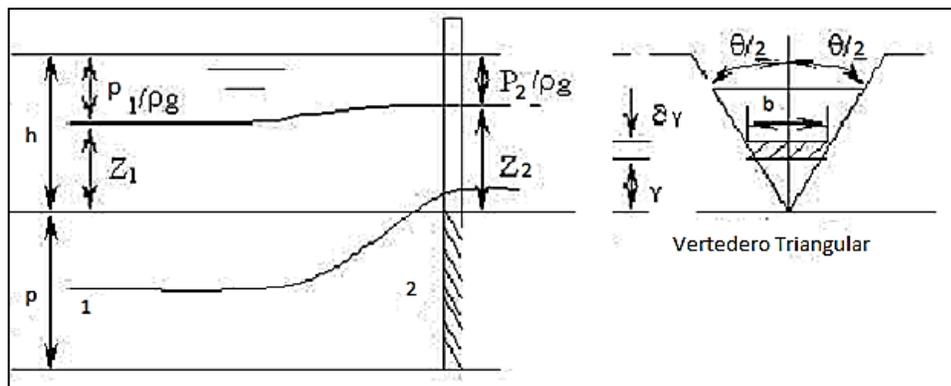
- Aguas arriba del vertedero el flujo es uniforme y la presión varía con la profundidad de acuerdo con la hidrostática ($p = \rho gh$).
- La superficie libre permanece horizontal hasta el plano del vertedero y todas las partículas que pasan sobre el vertedero se mueven

horizontalmente (en realidad la superficie libre cae cuando se aproxima al vertedero).

- La presión a través de la lámina de líquido o napa que pasa sobre la cresta del vertedero es la atmosférica.
- Los efectos de la viscosidad y de la tensión superficial son despreciables.

Para medir pequeños gastos, el vertedero triangular es más preciso que el rectangular, puesto que para un mismo caudal, los valores de h son mayores.

Figura 1. **Flujo Ideal sobre un vertedero de pared delgada**



Fuente: *Dispositivos de velocidad*. <http://velodiadfluidos.blogspot.com/210/10/dispositivos-para-medir-velocidad.html>. Consulta: 23 de marzo de 2008.

Despreciando la velocidad de aproximación, V_0 , la velocidad teórica del flujo sobre la cresta, es:

$$V_1 = \sqrt{2gy} \, dA$$

La descarga elemental, a través del diferencial de área, es:

$$dQ = V_1 dA = \sqrt{2gy} dA$$

De la figura 1, $dA = 2b dy$

Además,

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \frac{b}{(h-y)}$$

$$b = (h-y) \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)$$

Luego,

$$dA = 2(h-y) \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) dy$$

Sustituyendo este último resultado, se tiene:

$$dQ = 2\sqrt{2gy} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) (h-y) dy$$

$$dQ = 2\sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) (h-y) y^{1/2} dy$$

$$Q = \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) y^{5/2}$$

Integrando y simplificando la ecuación

$$Q = \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) y^{5/2}$$

El caudal total, teórico, será:

$$Q = \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) y^{5/2}$$

1.4. Práctica para medir caudal con vertederos triangulares de ángulo recto

A continuación se muestra el objetivo principal de la práctica para medir caudal con vertederos triangulares de ángulo recto.

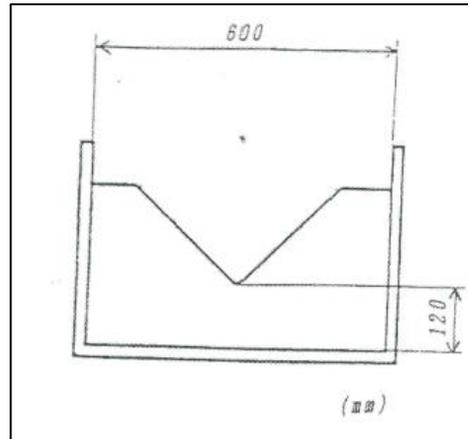
1.4.1. Objetivos de la práctica

Determinar el coeficiente de un vertedero de ángulo recto y la relación entre la descarga y el nivel de agua.

1.4.2. Dispositivo a utilizar

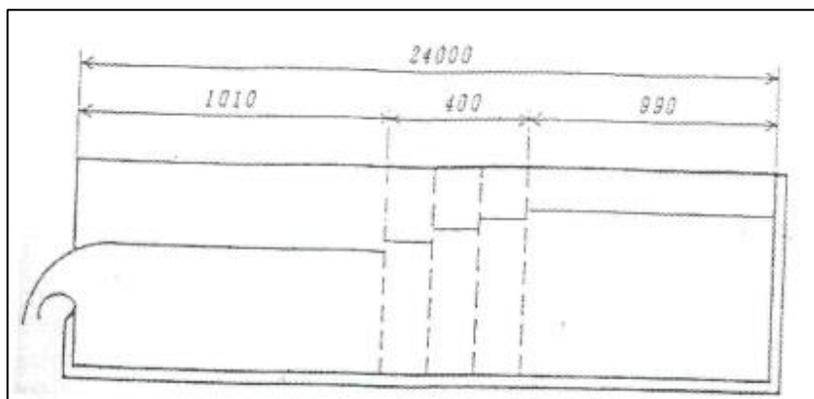
Los detalles de las partes del dispositivo experimental a utilizar se muestran en las figuras siguientes:

Figura 2. **Dimensiones en milímetro del vertedero triangular vista transversal**



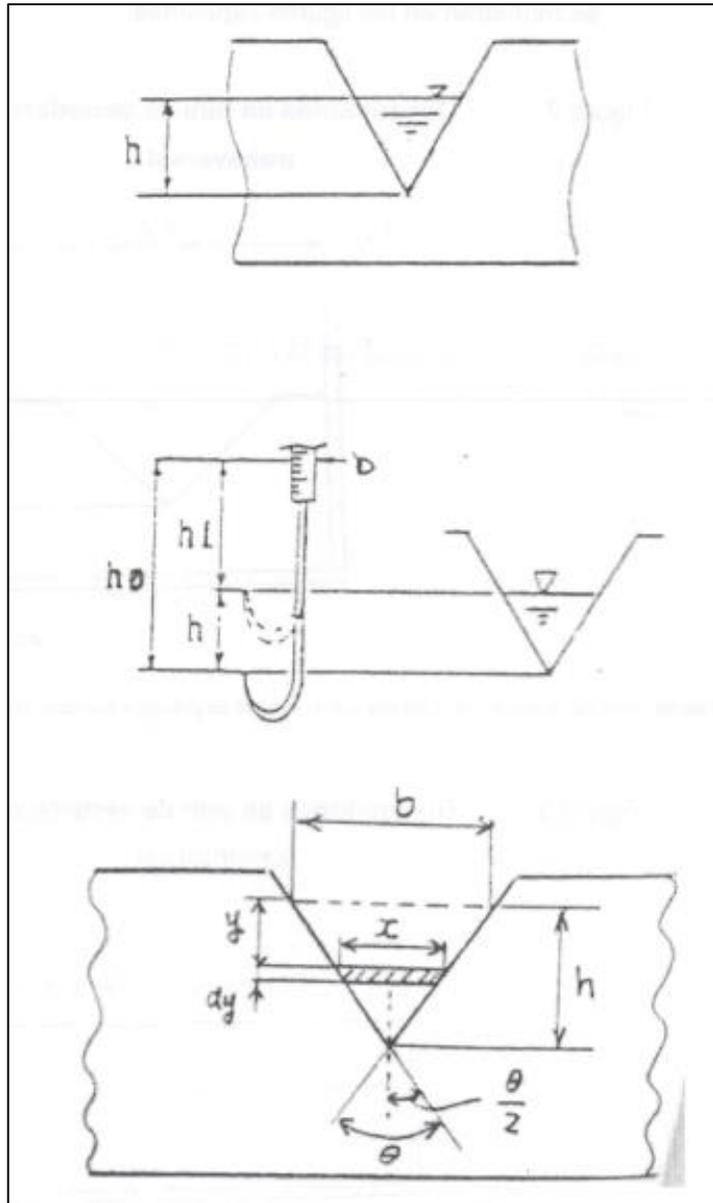
Fuente: ULLOA RAMÍREZ, Carlos. *Manual de equipo de simulación de central de potencia hidroeléctrica para entrenamiento técnico.* p. 45.

Figura 3. **Dimensiones en milímetro de vertedero triangular vista longitudinal**



Fuente: ULLOA RAMÍREZ, Carlos. *Manual de equipo de simulación de central de potencia hidroeléctrica para entrenamiento técnico.* p. 46.

Figura 4. Ejemplificación de alturas a utilizar para el desarrollo de la práctica



Fuente: ULLOA RAMÍREZ, Carlos. *Manual de equipo de simulación de central de potencia hidroeléctrica para entrenamiento técnico*. p. 47.

1.4.3. Pasos para la elaboración de la práctica

A continuación se encuentran los pasos a seguir para la elaboración de la práctica.

1.4.3.1. Paso 1. Preparación

- Calibrar en el punto cero
- Verificar en el calibrador de gancho (ver figura 4)
- Tomar la medida como altura inicial

1.4.3.2. Paso 2. Medición

- Abrir la válvula V5 lentamente (ver figura 17).
- El flujo de descarga debe de pasar por el vertedero y debe ser medido con la báscula (21), el contenedor de agua (22) y el cronómetro (24). El contenedor (22) tiene la capacidad para tener una diferencia de medida de 500 mm o más del nivel del líquido que cae sobre este a través del vertedero.

1.4.3.3. Paso 3. Finalización

- Cerrar la válvula V5 (ver figura 17).
- Apagar la bomba.
- El agua en el canal abierto (2) y el agua en el depósito (5) pueden ser drenadas por la válvula de desagüe del canal.

1.4.4. Experimento a realizar

A continuación se encuentran los pasos a seguir para realizar el experimento.

1.4.4.1. Paso 1. Medición

- Calibrador de gancho en cero para medición altura inicial.
- Diferencia del nivel de agua entre la altura de agua en vertedero a referencia de cero del calibrado de gancho h_1 (ver figura 4).
- Diferencia de pesos tomados G (kilogramos).
- Tiempo requerido para tomar la medida del peso deseado t (minutos).

1.4.4.2. Paso 2. Cálculo

- Altura de nivel de agua para el cálculo del flujo descargado (ver figura 4).
- Índice del flujo real Q_1 (metros cúbicos sobre segundo).
- Coeficiente de Capacidad de flujo.
- Cálculo del flujo promedio Q_2 (metros cúbicos sobre segundo).

1.4.5. Ecuaciones a utilizar

- Caudal promedio Q_1 (metros cúbicos sobre segundo)

$$Q_1 = \frac{W}{60\gamma t}$$

Donde:

G: diferencia del peso medido durante t minutos

t: tiempo requerido para medir el peso

γ : peso específico del agua 1 000 Kg/m

- Caudal promedio experimental

$$Q_2 = \frac{8}{15} \sqrt{2g} \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) h^{5/2}$$

Donde:

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2 \quad \theta = 90^\circ$$

h = altura de agua calculado en la descarga vertedero con el calibrador de gancho.

Si se reduce la ecuación queda de la siguiente manera

$$Q_2 = 2,36h^{5/2}$$

- Coeficiente de capacidad (coeficiente de flujo)

$$C_Q = \frac{Q_1}{Q_2}$$

- Altura de agua h(m)

$$h = h_0 - h_1 \text{ Ecuación 5-1-5}$$

Donde:

h_0 = punto cero medido con el calibrador de gancho (ver figura 4).

h_1 = diferencia de nivel de agua con respecto al punto cero (ver figura 4).

1.4.6. Arreglo de resultados

Estos deben realizarse de la siguiente manera:

- Registro de los resultados, los datos deben ser obtenidos de la práctica realizada y tabularse.

Tabla I. **Datos obtenidos durante la práctica de vertederos triangulares de ángulo recto**

Datos obtenidos durante práctica						
	Temperatura	Densidad	Tiempo	Peso	Referencia	Diferencia
Símbolo	T	Y	T	W	H_0	
Dimensional	T	Kg/m ³	S	Kg	M	
Referencia	Módulo	Tabla 1-1	Cronometro	Balanza	Medidor de Gancho	
Dato 1						
Dato 2						
Dato 3						
Dato 4						
Dato 5						
Dato 6						
Dato 7						
Dato 8						
Dato 9						
Dato 10						

Fuente: elaboración propia.

Tabla II. **Datos calculados de vertederos triangulares de ángulo recto**

Datos calculados						
	Temperatura	Densidad	Tiempo	Peso	Referencia	Diferencia
Símbolo	T	Y	T	W	H ₀	
Dimensional	T	Kg/m ³	S	Kg	M	
Referencia	Módulo	Tabla 1-1	Cronometro	Balanza	Medidor de Gancho	
Dato 1						
Dato 2						
Dato 3						
Dato 4						
Dato 5						
Dato 6						
Dato 7						
Dato 8						
Dato 9						
Dato 10						

Fuente: elaboración propia.

- Graficar. Graficar las curvas, estas deben ser ploteadas con base en el flujo actual promedio y el coeficiente de capacidad (C_Q vs Q_1).

2. DESARROLLO DE LA PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO PARA TURBINA PELTON

2.1. Energía hidráulica

La energía del agua es un aprovechamiento indirecto de la energía solar, ya que tiene su origen en el sol; esto es, el calor del sol hace mover el “motor” del ciclo del agua o ciclo hidrológico: la energía solar evapora el agua de los mares para formar nubes que serán transportadas por el viento hasta los continentes y allí se transformarán en precipitaciones de agua líquida (lluvia) y de nieve. El agua que llega de esta forma a la superficie terrestre aprovecha el desnivel existente hasta el mar y vuelve a este formando corrientes superficiales (ríos) o subterráneas. Convirtiendo la energía cinética ($E_c = \frac{1}{2} m v^2$) y potencial ($E_p = m g \Delta h$) de una masa de agua al pasar por un salto, en energía eléctrica. Es decir, la energía hidráulica se basa en aprovechar la caída del agua desde cierta altura. La energía potencial, durante la caída, se convierte en cinética. El hombre aprovecha la energía cinética del agua instalando máquinas hidráulicas, que son capaces de moverse empujadas por el agua.

Figura 5. **Proceso energético hidroeléctrico**



Fuente: elaboración propia.

2.2. Turbinas hidráulicas

Por turbina, se entiende como dispositivo mecánico capaz de convertir en trabajo, en la forma de movimiento de rotación, la energía cinética presente en masas de agua, al encontrarse estas dotadas de una determinada velocidad de desplazamiento. (En el módulo esto se logra por medio de las bombas de agua instaladas).

La aplicación inmediata del trabajo mecánico desarrollado en la turbina, es la de hacer girar al rotor del generador de energía eléctrica, en el cual se realiza la transformación de la energía mecánica en energía eléctrica. Todo ello, como consecuencia de estar rígidamente unidos, generalmente, los ejes de ambas máquinas, turbina-generador, formando un eje único con el que se obtiene sincronismo de giro entre las mismas, es decir, idéntico número de revoluciones durante espacios de tiempo iguales.

Para efectos del módulo se utiliza un dinamómetro de freno tipo Prony, este consiste en un mecanismo de carácter mecánico, que utiliza la fricción seca para convertir la energía mecánica absorbida en calor, se establece una presión sobre el eje de salida de la turbina Pelton del módulo, esta presión se ejerce por medio de un cincho de cuerdo, en cuyos extremos hay colocados unos dinamómetros para realizar la medición.

Una de las principales ventajas de este tipo de freno tipo Prony, es su costo de inversión, en contra parte son difíciles de ajustar y resulta complicado el mantener una carga específica.

Las turbinas hidráulicas son accionadas por el agua en movimiento, una vez que esta es debidamente encauzada hacia el elemento de turbina

denominado distribuidor, el cual, circularmente, distribuye, regula y dirige un caudal de agua que tiende a incidir, con mayor o menor amplitud, hacia el centro del círculo descrito, sobre un rotor o rueda móvil conocida con el nombre de rodete, que, conjuntamente con el eje en el que está montado, ha de estar perfectamente equilibrado dinámico y estáticamente

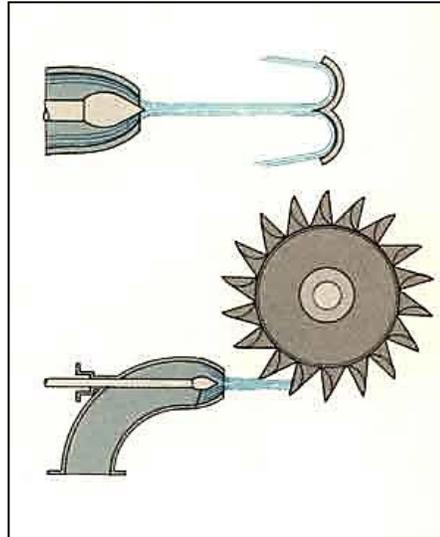
El rendimiento de las instalaciones con turbinas hidráulicas, siempre es elevado, pudiendo llegar desahogadamente al 90 % o más, después de tener en cuenta todas las pérdidas hidráulicas por choque, de caudal, de fricción en el generador, mecánicas, entre otras.

Los problemas de regulación de velocidad son importantes, principalmente a causa de las grandes masas de agua que entran en juego, con sus aceleraciones positivas y negativas, que se transforman en ondas de presión. La continuidad de las columnas de agua transmite a las ondas, produciéndose fuertes choques o golpe de ariete que es necesario evitar o por lo menos controlar.

2.3. Turbinas Pelton

Las turbinas Pelton, se conocen como turbinas de presión por ser esta constante en la zona del rodete, de chorro libre, de impulsión, o de admisión parcial por ser atacada por el agua solo una parte de la periferia del rodete, tal como se aprecia en la figura 6.

Figura 6. **Inyector de turbina Pelton e incidencia de chorro de agua sobre el rodete**



Fuente: *Turbina Pelton*. [http://www.bymsa.com/content/index.php?option=com_content & task=view&id=13&Itemid=34](http://www.bymsa.com/content/index.php?option=com_content&task=view&id=13&Itemid=34). Consulta: 28 de marzo de 2008.

Asimismo, entran en la clasificación de turbinas tangenciales y turbinas de acción, conceptos que se analizarán posteriormente dentro del contenido.

Su utilización es idónea en saltos de gran altura (alrededor de 200 m y mayores), y caudales relativamente pequeños (hasta 10 m³/s aproximadamente).

Por razones hidroneumáticas, y por sencillez de construcción, son de buen rendimiento para amplios márgenes de caudal (entre 30 y 100 % del caudal máximo). Por ello se colocan pocas unidades en cada central que requiere turbinas de estas características.

Pueden ser instaladas con el eje en posición vertical u horizontal, siendo esta última disposición la más adecuada, la cual servirá de referencia para hacer las descripciones necesarias.

Una vez identificados los elementos componentes de las turbinas Pelton, y conocidas las funciones respectivas, se comprende fácilmente el funcionamiento de las mismas.

La sucesiva transformación de la energía se efectúa del modo siguiente. La energía potencial gravitatoria del agua embalsada, o energía de presión hasta los orificios de las toberas, se convierte, prácticamente sin pérdidas, en energía cinética, al salir el agua a través de dichos orificios en forma de chorros libres, a una velocidad que corresponde a toda la altura del salto útil, estando referida esta, para el caso concreto de las turbinas Pelton, al centro de los chorros considerados.

Se dispone de la máxima energía cinética en el momento en que el agua incide tangencialmente sobre el rodete, empujando a los cangilones que lo forman, obteniéndose el trabajo mecánico deseado.

Las formas cóncavas de los cangilones hacen cambiar la dirección del chorro de agua, saliendo este, ya sin energía apreciable, por los bordes laterales, sin ninguna incidencia posterior sobre los cangilones sucesivos. De este modo, el chorro de agua transmite su energía cinética al rodete, donde queda transformada instantáneamente en energía mecánica.

La válvula de aguja, gobernada por el regulador de velocidad, cierra más o menos el orificio de salida de la tobera, consiguiendo modificar el caudal de agua que fluye por esta, con el objetivo de mantener constante la velocidad del

rodete, evitándose embalamiento o reducción del número de revoluciones del mismo, por disminución o aumento respectivamente de la carga solicitada al generador.

La arista que divide a cada cangilón en dos partes simétricas, corta al chorro de agua, seccionándolo en dos láminas de fluido, teóricamente del mismo caudal, precipitándose cada una hacia la concavidad correspondiente. Tal disposición permite contrarrestar mutuamente los empujes axiales que se originan en el rodete, equilibrando presiones sobre el mismo, al conseguir cambiar, simétrica y opuestamente, los sentidos de ambas láminas de agua.

2.4. Desarrollo de la práctica de prueba de funcionamiento de turbina Pelton

A continuación se muestran los objetivos del desarrollo de la práctica de prueba de funcionamiento de turbina Pelton.

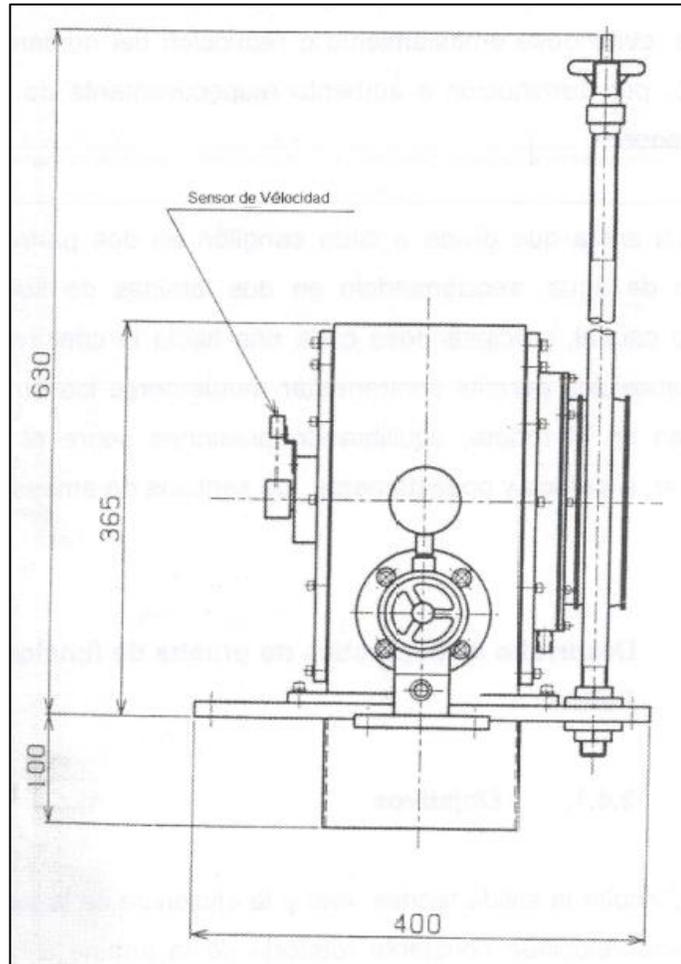
2.4.1. Objetivos

Cálculo de la salida teórica y real, la eficiencia de la turbina Pelton medidos bajo una velocidad constante rotatoria de la turbina a una columna de agua constante.

2.4.2. Aparato experimental

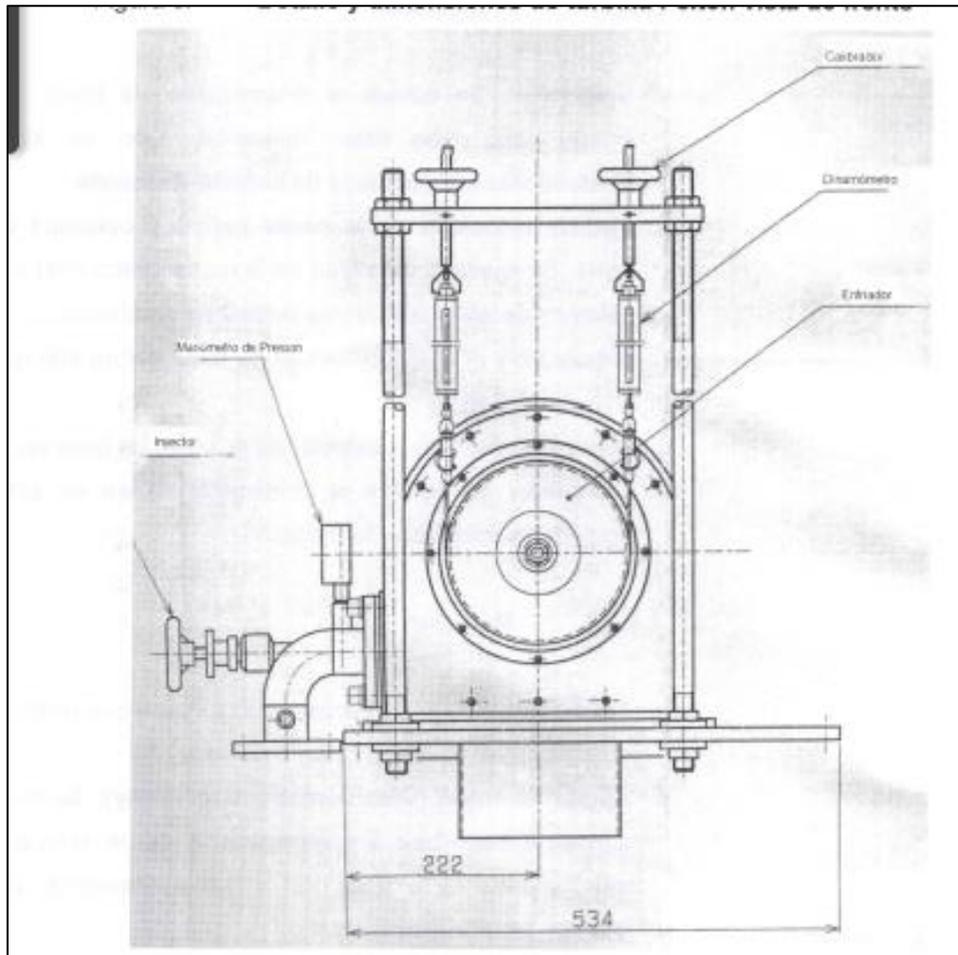
Los detalles se muestran en las figuras siguientes:

Figura 7. **Detalle y dimensiones de turbina Pelton vista lateral**



Fuente: ULLOA RAMÍREZ, Carlos. *Manual de equipo de simulación de central de potencia hidroeléctrica para entrenamiento técnico*. p. 50.

Figura 8. **Detalle y dimensiones de turbina Pelton vista de frente**



Fuente: ULLOA RAMÍREZ, Carlos. *Manual de equipo de simulación de central de potencia hidroeléctrica para entrenamiento técnico*. p. 51.

2.4.3. Desarrollo de la práctica

A continuación se muestra la preparación del desarrollo de la práctica.

2.4.3.1. Preparación

- Calibración. Se calibra el dinamómetro de freno tipo Prony: este debe estar horizontal y esto se logra ajustando los sostenedores de balance de resorte.
- Ajustar la velocidad de la rueda y columna de agua. Se ajusta la velocidad de la rueda pelton (N_s) y la columna de agua (H_s) deben ser ajustadas con la válvula V6 y el inyector 10-1, N_s debe ser de 800 rpm y H_s de 16,5 m.
- Medir el flujo. Con el selector de dos vías, la balanza, el contenedor de agua y el cronometro deben estar preparados para hacer la medición

2.4.3.2. Medición

- Ajustar la válvula V6. Probar turbina Pelton, debe ser probada con varios r turbina Pelton en distintos caudales (ver figura 17).
- Ajustar de freno (dinamómetro tipo Prony). Se debe ajustar el freno bajo las especificaciones de velocidad rotacional de la turbina (N_s) y altura requerida (H_s) (presión en el inyector).
- Medir. La velocidad de la turbina, presión del inyector, medida que da el dinamómetro (carga), tiempo requerido y peso del agua.
- Enfriar la zapata. La zapata del dinamómetro debe ser enfriada por medio de agua.

2.4.3.3. Procedimiento de finalización

- Cerrar la válvula el inyector y la válvula V6.

- Apagar la bomba.
- Drenar el agua dentro del canal abierto por medio de la válvula de desagüe del canal.

2.4.4. Rango del experimento

A continuación se muestra el rango del experimento.

2.4.4.1. Medición

- Velocidad rotacional de la turbina Pelton (N) en revoluciones por minuto
- La presión en el inyector (H) en kilogramo sobre centímetro cuadrado
- La carga aplicada por el dinamómetro tipo Prony en kilogramo
- Masa de agua medida por la pesa (W) en G
- Tiempo requerido para la medida de la masa de agua en minuto

2.4.4.2. Calcular

- El flujo promedio (Q_1) en metro cúbico sobre segundos
- La salida teórica de potencia en la turbina pelton (P_{th}) en kilowatt
- La salida real de la turbina Pelton (P) en kilowatt
- La eficiencia de la turbina Pelton (η) en porcentaje

2.4.5. Ecuaciones a utilizar

- Potencia teórica en la turbina Pelton P_{th} en KW

$$P_{th} = \frac{\gamma QH}{102}$$

Donde $\gamma = 1\,000\text{ Kg/m}^3$

Entonces

$$P_{th} = 9,8 QH$$

- Potencia real de la turbina Pelton P en KW

$$P = \frac{2\pi NLG}{60 \times 10^2}$$

Donde

N: velocidad de rotación de la turbina Pelton en revoluciones por minuto

L: brazo del dinamómetro tipo Prony = 0.20 en m

G: carga medida por el dinamómetro en kilogramos

Entonces

$$P = \frac{NW}{4\,870}$$

- Eficiencia de la turbina Pelton η_p

$$\eta_p = \frac{P}{P_{th} \times 100}$$

- Caudal promedio

$$Q_1 = \frac{G}{60\gamma t}$$

Donde

G: masa de agua pesada en la báscula

t: tiempo requerido

γ : 1 000 Kg

2.5. Interpretación de resultados

- Registro de resultados

Los datos de cada prueba que se realiza deben ser registrados y tabulados.

Tabla III. **Datos obtenidos durante la práctica de turbina Pelton**

Datos obtenidos durante práctica						
	Temperatura	Densidad	Tiempo	Peso	Referencia	Diferencia
Símbolo	T	Y	T	W	H ₀	V
Dimensional	T	Kg/m ³	S	Kg	M	RPM
Referencia	Modulo	Tabla 1-1	Cronómetro	Balanza	tacómetro	
Dato 1						
Dato 2						
Dato 3						
Dato 4						
Dato 5						
Dato 6						
Dato 7						
Dato 8						
Dato 9						
Dato 10						

Fuente: elaboración propia.

Tabla IV. **Datos calculados de práctica de turbina Pelton**

Datos obtenidos durante práctica						
	Caudal	Carga	Potencia Teórica	Potencia Real	Eficiencia	
Símbolo	Q_1	G	P_{th}	P	η_0	
Dimensional	M^3/s	Kg	kw	kw	%	
Referencia		Dinamómetro				
Dato 1						
Dato 2						
Dato 3						
Dato 4						
Dato 5						
Dato 6						
Dato 7						
Dato 8						
Dato 9						
Dato 10						

Fuente: elaboración propia.

- Gráficas

Las curvas deben de ser ploteadas en base del flujo promedio (Q_1)

- Potencia teórica de turbina Pelton P_{th} vs Q_1
- Potencia real P vs Q_1
- Eficiencia de la turbina Pelton η_p vs Q_1

3. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA DE MEDICIÓN POR PÉRDIDAS POR FRICCIÓN EN TUBERÍAS Y ACCESORIOS

Las pérdidas de carga son las pérdidas de energía potencial que se produce en un fluido al circular a través de una tubería. Se podría decir que son las pérdidas de energía por “rozamiento” o por fricción, se manifiestan en una disminución de presión. Son directamente proporcionales a la velocidad del fluido, de la rugosidad de la tubería y de la longitud de la misma e inversamente proporcionales a la sección de la tubería. Estas pérdidas de presión se expresan en kilogramos sobre centímetro cuadrado, pero lo más común es expresarlas en mca (metros columna de agua).

$$1 \frac{Kg}{cm^2} = 10 \text{ m. c. a.}$$

Donde

mca= metros de columna de agua

En primer lugar se relacionará el caudal y diámetro interior de la tubería con la velocidad del fluido:

$$V = \frac{Q}{S} = \frac{4Q}{\pi D^2}$$

Donde:

Q= caudal de agua

S= sección de la tubería

D= diámetro

3.1. Cálculo de pérdidas de fricciones en tuberías

Las pérdidas de fricción en tuberías se calculan con la expresión:

$$H_r = f \frac{Lv^2}{D2g} = \frac{8fLQ^2}{\pi^2 D^5 g}$$

Donde:

H_r= pérdida de carga

D = diámetro en m

Q= caudal en m³/s

L= longitud conducción

f= coeficiente de fricción

g=aceleración de la gravedad

En esta expresión se tienen datos conocidos como longitud, diámetro y caudal. Pero se desconoce el coeficiente de fricción, que dependerá de la rugosidad de la tubería, su diámetro, la viscosidad cinemática del agua. La tubería se comporta como rugosa, las protuberancias que sobresalen de la subcapa laminar quedan afectadas de la viscosidad de turbulencia, en mayor o menor grado dependiendo del coeficiente de rugosidad k; en tal caso, el coeficiente *f* (coeficiente de fricción), depende también de k, o adimensionalmente de k/D (rugosidad relativa). Se encuentra una influencia de la rugosidad y del número de Reynolds:

$$\frac{1}{\sqrt{f_1}} = -2 \log \left(\frac{k/D}{3,7} \right) + \frac{2,51}{R_{ED} \sqrt{f_0}}$$

D = diámetro

K = valor de rugosidad

f = coeficiente de fricción

R_{ED} = número de Reynolds

Se ve de nuevo, que se necesita previamente calcular otro término, en este caso, el número de Reynolds:

$$R_{ED} = \frac{vD}{\nu} = \frac{4Q}{\pi D\nu}$$

Donde:

D = diámetro

Q = caudal en metro cúbico sobre segundo

ν = viscosidad cinemática del agua a 20 °C

Una vez conocido el número de Reynolds, para calcular el valor de f a través de la ecuación se fija en el segundo miembro un valor estimado de f , ya sea por el diagrama de Moody o por un valor de f predeterminado para las características del módulo de simulación el cual será calculado de forma experimental en el desarrollo de esta práctica.

Una vez se tenga este valor, y como se ha indicado en el principio del desarrollo del cálculo de la pérdida de carga, se sustituye en la expresión:

$$H_r = f \frac{Lv^2}{D2g} = \frac{8fLQ^2}{\pi^2 D^5 g}$$

H_r = pérdida de carga

D = diámetro en m

Q = caudal en metros cúbicos sobre segundo

L = longitud conducción

f = coeficiente de fricción

g = aceleración de la gravedad

3.2. Cálculo de pérdidas de carga en accesorios

La ecuación general para el cálculo de las pérdidas de carga en los accesorios es:

$$H_{ra} = k \frac{v^2}{2g}$$

Los accesorios a estudiar:

Ensanchamiento brusco de sección

Salida de tubería, o entrada en depósito

Ensanchamiento gradual de sección

Estrechamiento brusco y gradual

Entrada en tubería o salida de depósito

Otros accesorios

3.2.1. Ensanchamiento brusco de sección

Se aplica la expresión general, en la que:

$$k = \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2$$

Por lo tanto la expresión queda:

$$H_{ra} = \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2 \frac{v_1^2}{2g}$$

Donde V_1 es la velocidad de entrada (en la sección estrecha)

3.2.2. Salida de tubería o entrada en depósito

En este caso se puede asimilar $k=1$, ya que D es muy grande con respecto a d , de forma que queda la expresión general. La velocidad es la de la sección de la tubería en la parte estrecha al igual que el caso anterior.

$$H_{ra} = \frac{v_1^2}{2g}$$

3.2.3. Ensanchamiento gradual de sección

Para el ensanchamiento gradual, la expresión es igual a las anteriores, ya que sigue siendo un caso particular del ensanchamiento, pero se le aplica un coeficiente de reducción. El ensanchamiento brusco correspondería a un ángulo de 180° y por tanto $m=1$.

$$H_{ra} = m \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2 \frac{v_1^2}{2g}$$

Para el cálculo del ángulo se utilizará el concepto de arco tangente con la longitud del accesorio y la diferencia de diámetros.

Valores del coeficiente m en un ensanchamiento gradual.

Tabla V. **Valores del coeficiente m en un ensanchamiento gradual**

α	44°	66°	88°	110°	115°	220°	330°	440°	550°	660°	6180°
m	,15	,13	,14	,17	,30	,40	,70	,95	11,1	11,2	11

Fuente: elaboración propia.

3.2.4. Estrechamiento brusco y gradual

Tanto para los ensanchamientos como para los estrechamientos, la energía cinética se mide en la sección de menor diámetro, por lo tanto, en este caso la velocidad corresponde a la tubería de salida.

Cuando la relación d/D es menor a 0,76 se tiene:

$$H_{ra} = 0.42 \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2 \frac{v_1^2}{2g}$$

En el caso de que d/D sea mayor a 0,76, se aplica:

$$H_{ra} = \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2 \frac{v_1^2}{2g}$$

3.2.5. Entrada en tubería o salida de depósito

Es un caso particular, en el cual el cociente entre diámetros tiende a cero, por lo que se aplica:

$$H_{ra} = 0.42 \frac{v_2^2}{2g}$$

En el caso de que la tubería penetre en el depósito, la constante k toma el valor de 1

$$H_{ra} = \frac{v_1^2}{2g}$$

3.2.6. Otros accesorios

A continuación se muestran los accesorios en la tabla V.

Tabla VI. **Coeficiente de rugosidad K**

ELEMENTO	K
Válvula de esfera abierta	10
Válvula de mariposa abierta	5
Válvula anti-retorno claveta abierta	2,5
Válvula compuerta abierta	0,19
T	1,8
Codo 90°	0,9
Codo 45°	0,42

Fuente: elaboración propia.

3.3. Práctica para la medición de pérdidas de fricción en accesorios y tubería

A continuación se encuentra el objetivo principal de la práctica para la medición de pérdidas de fricción en accesorios y tubería.

3.3.1. Objetivos

Determinar el comportamiento de un líquido incomprensible en un sistema de tuberías con diferentes accesorios, como lo son: válvula tipo globo, válvula de exclusiva, codos, tubería, y determinar de forma experimental el coeficiente de fricción.

3.3.2. Aparato experimental

Los detalles se muestran en el siguiente procedimiento.

3.3.3. Procedimiento del experimento

A continuación se muestra el procedimiento del experimento en la siguiente preparación.

3.3.3.1. Preparación

- Abrir válvulas V7, V8 (las válvulas restantes deben de permanecer cerradas) (ver figura 17).
- Válvula de martillo, válvula de compuerta y válvula de exclusiva en el sistema de tubería deben permanecer abiertas.
- Poner en funcionamiento la bomba de agua.
- Las llaves de paso para el cálculo de la pérdida de fricción se accionan moviéndolas hacia la izquierda o derecha, la posición de cerrado es en el centro.

3.3.3.2. Medición

Se recomienda que la toma de los datos en el manómetro en forma de U sea tomadas después de alterar el flujo.

Alterar el flujo

- Una vez alterado el flujo, se debe tener cuidado de la medición tomada para determinar el flujo dentro de la tubería.

- Medir las pérdidas por fricción en la tubería y accesorios deben ser medidas después de alterar el flujo.

3.3.4. Rango del experimento

A continuación se muestra la medición del rango del experimento.

3.3.4.1. Medición

- La cantidad de agua dentro de la tubería, peso en kilogramos.
- Tiempo requerido para la medición de la cantidad de agua (t) en minutos.
- Temperatura del agua (T) en grados centígrados.
- La presión entregada en el regulador de presión (P_R) en kilogramos sobre centímetros cuadrados.
- Diferencia de presión relacionado a las pérdidas por fricción en la tubería en (h'_{12}) en milímetros de mercurio.
- Diferencia de presión relacionada a las pérdidas por fricción en el codo (32A), accesorio de contracción (50A/32A) o expansión (32A/50^a) (h'_{13}) en milímetros de mercurio.
- Diferencia de presión relacionado a las pérdidas por fricción en la válvula de exclusiva (h'_{14}) en milímetros de mercurio.
- Diferencia de presión relacionada a las pérdidas por fricción en la válvula tipo globo (h'_{15}) en milímetros de mercurio.
- Diferencia de presión relacionada a las pérdidas por fricción en la válvula de martillo (h'_{16}) en milímetros de mercurio.

3.3.4.2. Calcular

- Flujo dentro del circuito de tubería (Q_1) en metro cúbico sobre segundos.
- Velocidad del flujo dentro del circuito de tubería (V_{12}) en metro sobre segundos.
- Factor de fricción de la tubería λ_{12} adimensional.
- Coeficiente de fricción dentro del codo (32A), accesorio de contracción (50A/32A) o expansión súbita (32A/50^a) ξ_{13} adimensional.
- Coeficiente de fricción dentro de la válvula de esclusa ξ_{14} adimensional.
- Coeficiente de fricción dentro de la válvula tipo globo ξ_{15} adimensional.
- Coeficiente de fricción dentro de válvula tipo martillo ξ_{16} adimensional.
- Número de Reinaldo en la tubería Red adimensional.

3.3.4.3. Ecuaciones a utilizar

Para determinar el flujo de agua que circula a través de la tubería de agua se utiliza la siguiente ecuación

$$Q_1 = \frac{G}{60\gamma t}$$

Donde

G: masa de agua pesada en la báscula

t: tiempo requerido

γ : 1 000 Kg

g: 9,8 m/s²

$$V_{12} = \frac{Q_1}{\pi/4 (d_{12})^2}$$

Donde

Q_1 : caudal promedio en el circuito de tubería

d_{12} : diámetro interno de la tubería este es igual a 0,357 m

Entonces

$$V_{12} = 999Q_1$$

Pérdida de fricción en porción de tubería

$$h_{12} = \frac{\lambda_{12} l_{12} v_{12}}{d_{12} 2g}$$

Donde:

λ_{12} = coeficiente de fricción

l_{12} = longitud de tubería =3 metros para este modelo

v_{12} = velocidad del agua dentro de tubería

d_{12} = diámetro de tubería = 0,0357

Donde:

$$\lambda_{12} = 0,23 \left(\frac{h_{12}}{v_{12}} \right)$$

Donde:

h_{12} = pérdidas de fricción en tubería

$$h_{12} = 12,55 h'_{12}$$

h'_{12} = diferencia de presión medida en manómetro relacionada a tubería
 Coeficiente de fricción en codo ξ_{13} adimensional

$$h_{13} = \frac{\xi_{13}(v_{12})^2}{2g}$$

Donde:

h_{13} = pérdidas de fricción en codo

ξ_{13} = coeficiente de fricción del codo

v_{12} = velocidad del agua dentro de tubería

$g = 9,8 \text{ m/s}^2$

Entonces

$$\xi_{13} = 19,6 \frac{h_{13}}{(v_{12})^2}$$

Donde:

h_{13} = pérdidas de fricción a través de codo en $mh_{13} = 12,55 h'_{13}$

h'_{13} = diferencia de presión medida en manómetro relacionada al codo

Coeficiente de fricción dentro de la válvula de esclusa ξ_{14} adimensional

Donde:

$$h_{14} = \frac{\xi_{14}(v_{12})^2}{2g}$$

h_{14} = pérdidas de fricción en válvula de esclusa
 ξ_{14} = coeficiente de fricción de válvula de esclusa
 v_{12} =velocidad del agua dentro de tubería
 $g= 9,8 \text{ m/s}^2$

Entonces

$$\xi_{14} = 19,6 \frac{h_{14}}{(v_{12})^2}$$

Donde:

h_{14} = pérdidas de fricción a través de válvula de esclusa en m.

$$h_{14} = 12,55 h'_{14}$$

h'_{14} = diferencia de presión medida en manómetro relacionada a válvula de esclusa

Coeficiente de fricción dentro de la válvula tipo globo ξ_{15} adimensional

$$h_{15} = \frac{\xi_{15}(v_{12})^2}{2g}$$

Donde:

h_{15} = pérdidas de fricción en codo

ξ_{15} = coeficiente de fricción de válvula tipo globo

v_{12} =velocidad del agua dentro de tubería

$g= 9,8 \text{ m/s}^2$

Entonces

$$\xi_{15} = 19,6 \frac{h_{15}}{(v_{12})^2}$$

Donde:

h_{15} = pérdidas de fricción a través de codo <m>

$$h_{15} = 12,55 h'_{15}$$

h'_{15} = diferencia de presión medida en manómetro relacionada a válvula tipo globo

Coefficiente de fricción dentro de válvula tipo martillo ξ_{16} adimensional

$$h_{16} = \frac{\xi_{16}(v_{12})^2}{2g}$$

Donde:

h_{16} = pérdidas de fricción en válvula tipo martillo

ξ_{16} = coeficiente de fricción de válvula tipo martillo

v_{12} = velocidad del agua dentro de tubería

$$g = 9,8 \text{ m/s}^2$$

Entonces

$$\xi_{16} = 19,6 \frac{h_{16}}{(v_{12})^2}$$

Donde:

h_{16} = pérdidas de fricción a través de válvula tipo martillo <m>

$$h_{16} = 12,55 h'_{16}$$

h'_{16} = diferencia de presión medida en manómetro relacionada a válvula tipo martillo

Número de Reynolds en la tubería red adimensional

$$R_{ED} = \frac{v_{12}d_{12}}{\nu}$$

v_{12} = velocidad del agua dentro de tubería

d_{12} = diámetro de tubería = 0,0357

ν = viscosidad cinemática

3.3.5. Interpretación de resultados

- Registro de resultados

Los datos de cada prueba que se realiza deben ser registrados y tabulados.

Tabla VII. **Datos obtenidos durante la práctica de medición de pérdidas de fricción en accesorios y tubería**

Datos obtenidos durante práctica						
	Temperatura	Densidad	Tiempo	Peso	Referencia	Diferencia
Símbolo	T	Y	T	W	H ₀	
Dimensional	T	Kg/m ³	S	Kg	M	
Referencia	Modulo	Tabla 1-1	Cronometro	Balanza	Módulo	Módulo
Dato 1						
Dato 2						
Dato 3						
Dato 4						
Dato 5						
Dato 6						
Dato 7						
Dato 8						
Dato 9						
Dato 10						

Fuente: elaboración propia.

Tabla VIII. **Datos obtenidos durante la práctica de medición de pérdidas de fricción en accesorios y tubería**

Simbolo	Presión	Presión	Presión	Viscosidad ₀	
Dimensional	T	Kg/m ³	S	M	
Referencia	Módulo	Módulo	Módulo	tabla 1-1	
Dato 1					
Dato 2					
Dato 3					
Dato 4					
Dato 5					
Dato 6					
Dato 7					
Dato 8					
Dato 9					
Dato 10					

Fuente: elaboración propia.

Tabla IX. **Datos calculados en la práctica de medición de pérdidas de fricción en accesorios y tubería**

Datos calculados					
	Flujo Actual	Velocidad	Coeficiente de presión o coeficiente de pérdidas		
Símbolo	Q_1	V_{12}		H_{12}	
Dimensional	M ³ /s	m/s		m	
Referencia					
Dato 1					
Dato 2					
Dato 3					
Dato 4					
Dato 5					
Dato 6					
Dato 7					
Dato 8					
Dato 9					
Dato 10					

Fuente: elaboración propia.

Tabla X. **Coefficiente de presión o coeficiente de pérdidas**

Datos calculados						
Coeficiente de presión o coeficiente de pérdidas						
Símbolo	h_{13}		h_{14}		h_{15}	
Dimensional	m		m		m	
Referencia						
Dato 1						
Dato 2						
Dato 3						
Dato 4						
Dato 5						
Dato 6						
Dato 7						
Dato 8						
Dato 9						
Dato 10						

Fuente: elaboración propia.

Tabla XI. **Datos calculados en coeficiente de presión y pérdidas**

Datos calculados			
Coeficiente de presión o coeficiente de pérdidas			
Símbolo		H_{16}	Reinolds
Dimensional		m	Red
Dato 1			
Dato 2			
Dato 3			
Dato 4			
Dato 5			
Dato 6			
Dato 7			
Dato 8			
Dato 9			
Dato 10			

Fuente: elaboración propia.

- Gráficas

Las curvas deben ser ploteadas con base en número de Reynolds (Q_1).

4. DESARROLLO DE LAS PRUEBAS DE FUNCIONAMIENTO DE LAS BOMBAS MULTITETAPAS

Para que un fluido fluya de un punto a otro en un ducto cerrado o en una tubería, es necesario contar con una fuerza impulsora. Algunas veces, esta fuerza es la gravedad cuando hay diferencias de nivel. Por lo general, el dispositivo mecánico como una bomba o un ventilador, suministra la energía o la fuerza impulsora que incrementa la energía mecánica del fluido. Esta energía se puede usar para aumentar la velocidad, la presión o elevación del fluido, de acuerdo a la ecuación de Bernoulli que relaciona velocidad con presión, densidad y trabajo. En general, una bomba es una máquina o dispositivo que se usa para mover un líquido incomprensible, por medio de la adición de energía al mismo.

Una bomba es una máquina capaz de transformar energía mecánica en hidráulica. Un tipo de bombas son las centrífugas que se caracterizan por llevar a cabo dicha transformación de energía por medio de un elemento móvil denominado impulsor, rodete o turbina, que gira dentro de otro elemento estático denominado cuerpo o carcasa de la bomba. Ambos disponen de un orificio anular para la entrada del líquido. Cuando el impulsor gira, comunica al líquido una velocidad y una presión que se añade a la que tenía a la entrada.

4.1. Propiedades de una bomba centrífuga

Dentro del campo normal de aplicación, las propiedades de una bomba centrífuga son:

- Caudal uniforme, sin pulsaciones.
- La presión o altura de elevación disminuye a medida que aumenta el caudal. En general, a partir del punto de funcionamiento, cuando se cierra la válvula de regulación de la tubería de impulsión aumenta la presión y se reduce la potencia. Sin embargo, las bombas de alta velocidad específica (impulsor semiaxial o hélice) no cumplen esta norma general.
- La altura, medida en metros de columna de líquido, a la que eleva una bomba es independiente de la naturaleza del líquido y, por tanto, la altura a la que impele una bomba es la misma, prescindiendo de la influencia que ejerce la viscosidad.
- La potencia absorbida por la bomba es proporcional al peso específico del líquido elevado.
- El par requerido para el arranque de una bomba centrífuga es pequeño y la potencia absorbida durante su funcionamiento de régimen es continua y libre de sobrecargas, cuando la altura no varía y no hay perturbaciones ajenas a la bomba en la aspiración.

4.2. Funcionamiento de las bombas centrífugas

Las bombas centrífugas mueven un cierto volumen de líquido entre dos niveles; son pues, máquinas hidráulicas que transforman un trabajo mecánico en otro de tipo hidráulico. Los elementos constructivos de que constan son:

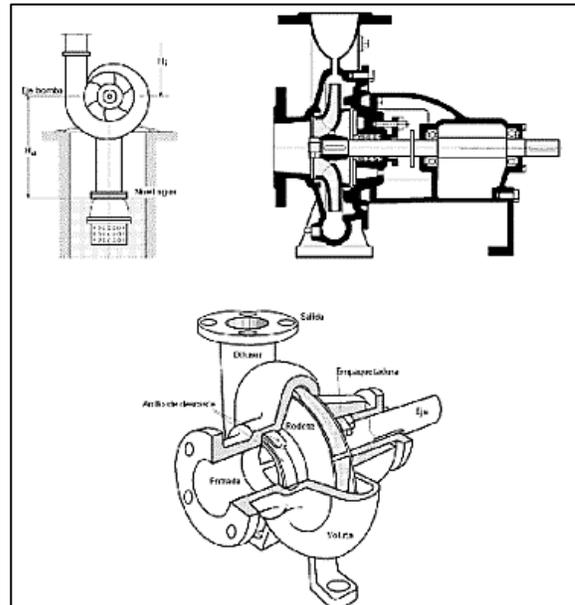
- Una tubería de aspiración, que concluye prácticamente en la brida de aspiración.
- El impulsor o rodete, formado por una serie de álabes de diversas formas que giran dentro de una carcasa circular. El rodete va unido solidariamente al eje y es la parte móvil de la bomba. El líquido penetra

axialmente por la tubería de aspiración hasta el centro del rodete, que es accionado por un motor, experimentando un cambio de dirección más o menos brusco, pasando a radial, (en las centrífugas), o permaneciendo axial, (en las axiales), adquiriendo una aceleración y absorbiendo un trabajo.

- Los álabes del rodete someten a las partículas de líquido a un movimiento de rotación muy rápido, siendo proyectadas hacia el exterior por la fuerza centrífuga, de forma que abandonan el rodete hacia la voluta a gran velocidad, aumentando su presión en el impulsor según la distancia al eje. La elevación del líquido se produce por la reacción entre este y el rodete sometido al movimiento de rotación; en la voluta se transforma parte de la energía dinámica adquirida en el rodete, en energía de presión, siendo lanzados los filetes líquidos contra las paredes del cuerpo de bomba y evacuados por la tubería de impulsión.
- La carcasa, (voluta), está dispuesta en forma de caracol, de tal manera, que la separación entre ella y el rodete es mínima en la parte superior; la separación va aumentando hasta que las partículas líquidas se encuentran frente a la abertura de impulsión; en algunas bombas existe, a la salida del rodete, una directriz de álabes que guía el líquido a la salida del impulsor antes de introducirlo en la voluta.
- Una tubería de impulsión. La finalidad de la voluta es la de recoger el líquido a gran velocidad, cambiar la dirección de su movimiento y encaminarle hacia la brida de impulsión de la bomba.

La voluta es también un transformador de energía, ya que disminuye la velocidad (transforma parte de la energía dinámica creada en el rodete en energía de presión), aumentando la presión del líquido a medida que el espacio entre el rodete y la carcasa aumenta.

Figura 9. **Bomba centrífuga, disposición, esquema y perspectiva**



Fuente: *Bombas centrífugas*. <http://dc603.4shared.com/doc/opF-qYrm/preview.html>: Consulta: 30 de marzo de 2008.

Este es, en general, el funcionamiento de una bomba centrífuga aunque existen distintos tipos y variantes.

La estructura de las bombas centrífugas es análoga a la de las turbinas hidráulicas, salvo que el proceso energético es inverso; en las turbinas se aprovecha la altura de un salto hidráulico para generar una velocidad de rotación en la rueda, mientras que en las bombas centrífugas la velocidad comunicada por el rodete al líquido se transforma, en parte, en presión, lográndose así su desplazamiento y posterior elevación.

4.3. Clasificación de las bombas centrífugas

En las bombas centrífugas la energía se comunica al líquido por medio de álabes en movimiento de rotación, a diferencia de las de desplazamiento volumétrico o positivo, rotativas (de engranajes, tornillos, lóbulos, levas, entre otros) y alternativas de pistón, de vapor de acción directa o mecánicas.

Las ventajas principales de las bombas centrífugas son:

- Caudal constante, presión uniforme, sencillez de construcción, tamaño reducido, bajo mantenimiento y flexibilidad de regulación.
- Uno de sus pocos inconvenientes es la necesidad de cebado previo al funcionamiento, ya que las bombas centrífugas, al contrario que las de desplazamiento positivo, no son autoaspirantes.

Se considerarán los siguientes tipos de bombas centrífugas:

- Radiales, axiales y diagonales
- De impulsor abierto, semiabierto y cerrado
- Horizontales y verticales

De cada uno se tratarán brevemente sus características constructivas, exigencias a las que responden, ventajas, desventajas y aplicaciones específicas.

4.4. Factores de selección de las bombas

En la selección de bombas hay que tener en cuenta los siguientes factores:

- Las propiedades físicas del líquido, como el peso específico, tensión de vapor, viscosidad, temperatura, sólidos en suspensión, entre otros.
- El NPSHd, presión de aspiración e impulsión de la máquina.
- Disponibilidades de la planta (agua limpia a temperatura ambiente, agua caliente, vapor a baja presión, inyección de fuente externa, metanol, entre otros).
- Tipo y dimensiones de la bomba, velocidad, diámetro del eje o camisa del eje, diámetro interior de la cámara del cierre, longitud de la cámara del cierre, distancia entre la cámara del cierre y el primer apoyo, cliente final, lugar de instalación de la planta, entre otros.
- Para la misma potencia de entrada y para igual eficiencia, las bombas centrífugas se caracterizan por presentar una presión relativamente alta con un caudal relativamente bajo, las bombas de flujo axial generan un caudal alto con una baja presión y las de flujo mixto tienen características que se ubican en un rango intermedio con respecto a los casos anteriores.

Para todos es claro que las máquinas que transforman la energía no son 100 % eficientes, de aquí nace el termino eficiencia, ya que para una máquina la potencia de entrada no es la misma que la potencia de salida.

Teniendo en cuenta lo anterior, se sabe que si la energía que entra no es igual a la que sale es porque en alguna parte hubo una pérdida energética.

Estas pueden ser:

- Pérdidas de potencia hidráulicas (Ph)
- Pérdidas de potencia volumétricas (Pv)
- Pérdidas de potencia mecánicas (Pm)

Pérdidas de potencia hidráulicas

Estas disminuyen la energía útil que la bomba comunica al fluido y consiguientemente, la altura útil. Se producen por el rozamiento del fluido con las paredes de la bomba o de las partículas del fluido entre sí. Además se generan pérdidas hidráulicas por cambios de dirección y por toda forma difícil al flujo. Esta se expresa de la siguiente forma:

$$P_h = YQH_{int}$$

Donde H_{int} son las pérdidas de altura total hidráulica.

4.5. Prueba de funcionamiento de bomba multietapa

A continuación se muestra el objetivo principal de la prueba de funcionamiento de bomba multietapa.

4.5.1. Objetivos

Determinar la relación existente en funcionamiento permanente de las cantidades de presión de entrega, presión de salida y eficiencia de la bomba multi etapa.

4.5.2. Aparato experimental

Los detalles se muestran a continuación.

4.5.3. Procedimiento del experimento

A continuación se muestra la preparación del procedimiento del experimento.

4.5.3.1. Preparación

Todas las válvulas deben permanecer cerradas al momento de accionar la bomba de 3,7 KW.

Abrir la válvula V2 lentamente hasta lograr los valores deseados para realizar la práctica (ver figura 17).

Medida del flujo, con el selector de dos vías, la balanza, el contenedor de agua y el cronometro deben estar preparados para hacer la medición

4.5.3.2. Medición

La presión de entrega máxima se obtiene antes de abrir la válvula V2.

Se recomienda tomar varias presiones de entrega conforme se abra la válvula V2 lentamente para así obtener varios datos de muestra.

4.5.3.3. Proceso de finalización de práctica

Cerrar la válvula V2

Apagar la bomba

El agua en el canal abierto (2) y el agua en el depósito (5) pueden ser drenadas por la válvula de desagüe del canal.

4.5.4. Rango del experimento

A continuación se muestra el rango del experimento en las siguientes mediciones.

4.5.4.1. Medición

Velocidad de rotación de la bomba (N_m) en revolución por minuto

Masa de agua entregada por la bomba (W) en kilogramo

Tiempo requerido para la entrega de la masa de agua (t) en minuto

La presión de entrega de la bomba (P_d) en kilogramo sobre centímetro cuadrado

La presión de salida de la bomba (P_s) en kilogramo sobre centímetro cuadrado

Nivel de agua en el tanque (H_v) en metro

Localización del medidor de gancho a ese nivel de agua (H_p) en metro

4.5.4.2. Cálculo

Flujo actual (Q_1) en metro cúbico sobre segundo

Altura de agua (H_t) metro

Altura de entrega relacionada al nivel del tanque (H_d) en metro

Altura de succión relacionada al nivel del tanque (H_s) en metro

Potencia de la bomba (P) en kilowatt

Potencia de salida (PI) en kilowatt

Eficiencia de la bomba (η)

4.5.4.3. Ecuaciones a utilizar

Flujo actual Q en m³/s

$$Q = \frac{W}{60\gamma t}$$

Donde

W= diferencia de pesos en la balanza durante t minutos para calcular el flujo promedio

t= tiempo requerido para calcular la diferencia de pesos

$\gamma = 1\ 000\ \text{Kg/m}^3$ peso específico del agua

Cabeza de agua (altura) relacionada con el nivel del agua (H_t) en metro

$$H_t = H_d - H_s + \frac{v_d^2 \gamma}{2g} - \frac{v_s^2 \gamma}{2g}$$

Como el diámetro de la tubería de succión es igual al diámetro de la tubería de entrega, las velocidades v_s y v_d son iguales, por lo tanto

$$H_t = H_d - H_s$$

Donde

H_d: presión de entrega de la bomba en m

H_s: presión de succión de la bomba en m

$$H_d = 10P_d - H_p$$

Donde:

H_p = altura de presión medida con el medidor de gancho

γ = 1 000 Kg/m³ peso específico del agua

$H_s = 13,6 \times 10^{-2} P_s - H_v$

H_v = Diferencia de altura medida con el medidor de gancho

Potencia de entrada de la bomba (P) en kilowatt

$$P = \frac{\sqrt{3}AVP_f\eta}{1\,000}$$

Donde:

A = corriente eléctrica consumida por la bomba

V = voltaje suministrado

Pf = factor de potencia

η = coeficiente de eficiencia de la bomba

Potencia de salida de la bomba

$$P_l = \frac{\gamma QH}{102}$$

Donde

γ = peso específico del agua

Entonces

$$P_l = 9,8QH$$

Eficiencia de la bomba

$$\eta_t = \frac{Pl}{P}$$

4.5.5. Arreglo de los resultados

Registro de los resultados

Los datos deben ser obtenidos de la práctica realizada y tabularse

Tabla XII. **Datos obtenidos durante la práctica de prueba de funcionamiento de bomba multietapa**

Datos obtenidos durante la práctica			
	Coeficiente de presión o coeficiente de pérdidas		
Símbolo	T	W	Reinolds
Dimensional	T	Kg	Red
Dato 1	Módulo	Balanza	Manómetro
Dato 2			
Dato 3			
Dato 4			
Dato 5			
Dato 6			
Dato 7			
Dato 8			
Dato 9			
Dato 10			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIII. **Datos obtenidos en mediciones de presión, velocidad, voltaje, corriente y factor de potencia**

Datos obtenidos durante la práctica			
	Coeficiente de presión o coeficiente de pérdidas		
Símbolo	Hv	Ps	V
Dimensional	M	Kg/cm ²	V
Dato 1	Manómetro	Indicador	Indicador
Dato 2			
Dato 3			
Dato 4			
Dato 5			
Dato 6			
Dato 7			
Dato 8			
Dato 9			
Dato 10			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XIV. **Datos calculados en la bomba**

Datos calculados			
	Coeficiente de presión o coeficiente de pérdidas		
Símbolo	Flujo Actual	Entrega de Bomba	H ₅
Dimensional	Q1	H ₀	m
Dato 1	M ³ /s	m	
Dato 2			
Dato 3			
Dato 4			
Dato 5			
Dato 6			
Dato 7			
Dato 8			
Dato 9			
Dato 10			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XV. **Datos calculados en el motor**

Motor			
Símbolo	Potencia de entrada	Potencia de salida	Eficiencia
Dimensional	P	P ₁	
Dato 1			
Dato 2			
Dato 3			
Dato 4			
Dato 5			
Dato 6			
Dato 7			
Dato 8			
Dato 9			
Dato 10			

Fuente: elaboración propia.

Gráficas

Las curvas deben ser ploteadas con base en el flujo promedio (Q_1)

Potencia de entrada de la bomba P vs Q_1

Potencia de salida de la bomba P₁ vs Q_1

Eficiencia de la bomba η_p vs Q_1

5. DESARROLLO DE LA PRUEBA DE EFECTO VENTURI

El efecto Venturi (también conocido tubo de Venturi) consiste en que un fluido en movimiento dentro de un conducto cerrado, disminuye su presión al aumentar la velocidad después de pasar por una zona de sección menor. Si en este punto del conducto se introduce el extremo de otro conducto, se produce una aspiración del fluido contenido en este segundo conducto.

El efecto Venturi se explica por el principio de Bernoulli y el principio de continuidad de masa. Si el caudal de un fluido es constante pero la sección disminuye, necesariamente la velocidad aumenta. Por el teorema de conservación de la energía si la energía cinética aumenta, la energía determinada por el valor de la presión disminuye forzosamente.

Un tubo de Venturi es un dispositivo inicialmente diseñado para medir la velocidad de un fluido aprovechando el efecto Venturi. Sin embargo, algunos se utilizan para acelerar la velocidad de un fluido obligándole a atravesar un tubo estrecho en forma de cono. Estos modelos se utilizan en numerosos dispositivos en los que la velocidad de un fluido es importante y constituyen la base de aparatos como el carburador de los vehículos.

La aplicación clásica de medida de velocidad de un fluido consiste en un tubo formado por dos secciones cónicas, unidas por un tubo estrecho en el que el fluido se desplaza consecuentemente a mayor velocidad. La presión en el tubo Venturi puede medirse por un tubo vertical en forma de U conectando la región ancha y la canalización estrecha. La diferencia de alturas del líquido en

el tubo en U permite medir la presión en ambos puntos y consecuentemente la velocidad.

Cuando se utiliza un tubo de Venturi hay que tener en cuenta un fenómeno que se denomina cavitación. Este fenómeno ocurre si la presión en alguna sección del tubo es menor que la presión de vapor del fluido. Para este tipo particular de tubo, el riesgo de cavitación se encuentra en la garganta del mismo, ya que aquí, al ser mínima el área y máxima la velocidad, la presión es la menor que se puede encontrar en el tubo. Cuando ocurre la cavitación, se generan burbujas localmente, que se trasladan a lo largo del tubo. Si estas burbujas llegan a zonas de presión más elevada, pueden colapsar produciendo así picos de presión local con el riesgo potencial de dañar la pared del tubo. En el aparato experimental se aprecia el efecto de la cavitación por ser el agua el líquido con que se realizan las prácticas de laboratorio.

5.1. Experimento de medición por medio de tubo de venturi

A continuación se muestra el objetivo principal del experimento de medición por medio de tubo de Venturi.

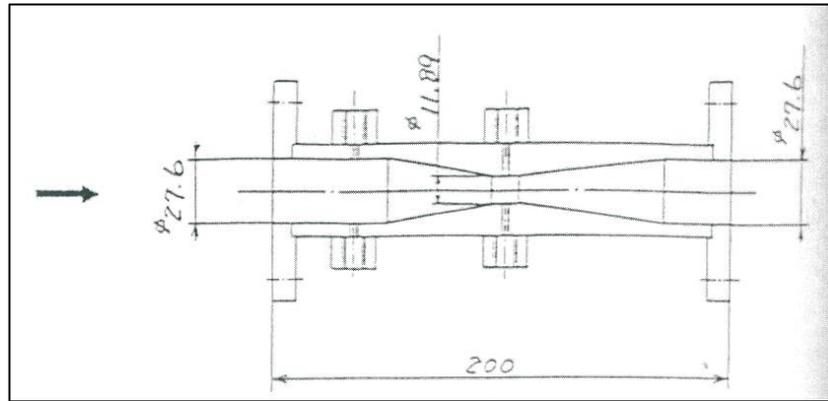
5.1.1. Objetivos

Determinar la diferencia de presión relativa entre la entrada y salida del tubo Venturi, de esta forma se podrá determinar un caudal promedio.

5.1.2. Aparato experimental

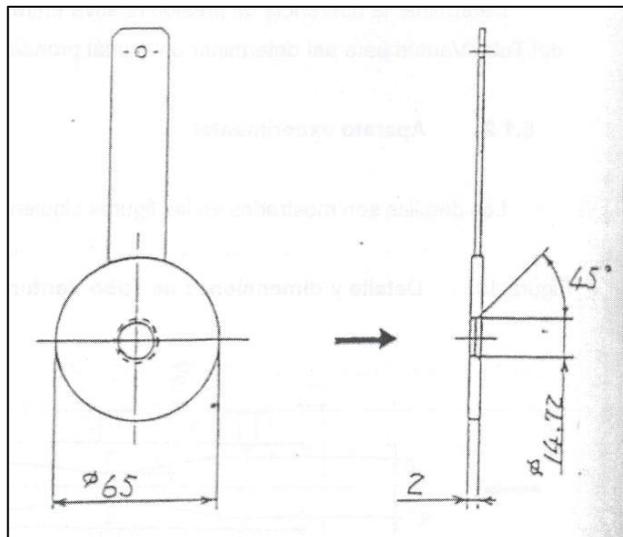
Los detalles son mostrados en la figura siguiente.

Figura 10. **Detalle y dimensiones de tubo Venturi vista lateral**



Fuente: elaboración propia, con programa Adobe Illustrator.

Figura 11. **Detalle y dimensiones de tubo Venturi vista planta**



Fuente: CARRILLO, Manuel. *Manual de equipo de simulación de central de potencia hidroeléctrica para entrenamiento técnico*. p. 89.

5.1.3. Procedimiento del experimento

A continuación se muestra la preparación del procedimiento del experimento.

5.1.3.1. Preparación

Todas las válvulas deben permanecer cerradas al momento de accionar la bomba de 3,7 KW, abrir la válvula V7 lentamente para lograr un flujo dentro del circuito de tubería, con la válvula V4 puede variar la presión de entrega de la bomba, abriéndola o cerrándola lentamente (ver figura 17).

La medida del flujo: con el selector de dos vías, la balanza, el contenedor de agua y el cronómetro deben estar preparados para hacer la medición.

5.1.3.2. Medición

Diferencia de presión ($h_0 - h_v$) relativa, con respecto del flujo que circula a través del tubo tipo Venturi utilizando el manómetro tipo U.

Se recomienda que se tomen diferentes presiones y flujos en forma alterna para la optimización de los resultados (muestra de por lo menos 5 mediciones).

5.1.3.3. Finalización de práctica

Cerrar la válvula V7 y V4 lentamente
Apagar la bomba

El agua en el canal abierto (2) y el agua en el depósito (5) pueden ser drenadas por la válvula de desagüe del canal.

5.1.4. Rango del experimento

A continuación se demuestra el rango del experimento en las siguientes mediciones.

5.1.4.1. Medición

Diferencia de presión producida antes de tubo Venturi (h_o) en milímetros de mercurio

Diferencia de presión producida después de tubo Venturi (h_v) en milímetros de mercurio

Entrega de la masa de agua por la bomba (W) en kilogramos

Tiempo requerido para la entrega de masa de agua (t) en segundos

Presión de entrega (P_r) en kilogramo sobre centímetro cuadrado

Temperatura del agua (T) en grados Celsius

5.1.4.2. Cálculo

Flujo actual (Q_1) en metro cúbico sobre segundos

Flujo teórico promedio antes de tubo Venturi (Q_o) en centímetro cúbico sobre segundo

Flujo teórico promedio después de tubo Venturi (Q_v) en centímetro cúbico sobre segundo

Coeficiente de capacidad (C_o)

Coeficiente de capacidad de tubo Venturi (C_v)

Número de Reynolds Red

5.1.5. Ecuaciones a utilizar

Flujo actual (Q_1) en metros cúbicos sobre segundo

$$Q_1 = \frac{W}{60\gamma t}$$

Donde

W= diferencia de pesos en la balanza durante t minutos para calcular el flujo promedio

t= tiempo requerido para calcular la diferencia de pesos

$\gamma = 1\,000 \text{ Kg/m}^3$ peso específico del agua

Flujo teórico promedio antes de tubo Venturi Q_0 en m

$$Q_0 = \frac{\pi d_0 (\sqrt{2} g h_0)}{4}$$

Donde

d_0 = diámetro a entrada de tubo Venturi = 0,0178 en m

$g = 9,8 \text{ m/s}^2$

$h_0 = 12,55 h'_0$

Donde

h_0 = diferencia de presión en el dispositivo tipo Venturi

h'_0 = lectura de la altura en el manómetro de mercurio

- Flujo teórico promedio después de tubo Venturi Q_1 en m.

$$Q_1 = \frac{\pi d_0 (\sqrt{2} g h_v)}{4}$$

Donde

d_o = diámetro a entrada de tubo Venturi = 0,0178 en m

g = 9,8 en m/s^2

$h_o = 12,55 h'_o$

Donde

h_v = diferencia de presión en el dispositivo tipo Venturi

h'_v = lectura de la altura en el manómetro de mercurio

Coefficiente de capacidad

$$C_v = \frac{Q_1}{Q_v}$$

Coefficiente de capacidad en tubo Venturi

$$C_o = \frac{Q_1}{Q_o}$$

Número de Reynolds

$$Red = \frac{v_{12} d_{12}}{\nu}$$

Donde:

v_{12} = velocidad del flujo dentro de la tubería

d_{12} = diámetro interno de la tubería

ν = viscosidad cinemática del agua

Velocidad del flujo en tubería

$$v_{12} = 999 Q_1$$

5.1.6. Arreglo de los resultados

A continuación se presenta el registro de los resultados.

5.1.6.1. Registro de los resultados

Los datos deben ser obtenidos de la práctica realizada y tabularse

Tabla XVI. **Datos obtenidos durante práctica de medición por medio de tubo Venturi**

Datos obtenidos durante la práctica			
	Coeficiente de presión o coeficiente de pérdidas		
Símbolo	Flujo Actual	Entrega de Bomba	Presión
Dimensional	T	W	Pr
Dato 1	T	Kg	
Dato 2	Módulo	Balanza	Bomba
Dato 3			
Dato 4			
Dato 5			
Dato 6			
Dato 7			
Dato 8			
Dato 9			
Dato 10			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVII. **Datos calculados en práctica de medición con tubo Venturi**

Datos calculados			
	Coeficiente de presión o coeficiente de pérdidas		
Símbolo	Flujo Actual	Entrega de Bomba	H ₅
Dimensional	Q1	H ₀	m
Dato 1	M ³ /s	m	
Dato 2	ec. 5-5-1	ec. 5-5-1-	ec. 5-5-5
Dato 3			
Dato 4			
Dato 5			
Dato 6			
Dato 7			
Dato 8			
Dato 9			
Dato 10			

Fuente: elaboración propia.

Tabla XVIII. **Datos calculados en práctica de medición con tubo Venturi**

Datos calculados			
	Coeficiente de presión o coeficiente de pérdidas		
Símbolo	Flujo Actual	Entrega de Bomba	H ₅
Dimensional	Q1	H ₀	m
Dato 1	M ³ /s	m	
Dato 2	ec. 5-5-1	ec. 5-5-1-	ec. 5-5-5
Dato 3			
Dato 4			
Dato 5			
Dato 6			
Dato 7			
Dato 8			
Dato 9			
Dato 10			

Fuente: elaboración propia.

Gráficas

Las curvas deben ser ploteadas con base en el número de Reynolds (Red).

Coeficiente de capacidad (P) vs índice del flujo real

Coeficiente de capacidad de tubo Venturi (PI) vs índice del flujo real

6. DESARROLLO DE LA PRÁCTICA DE TURBINA FRANCIS

La turbina Francis fue desarrollada por James B. Francis. Se trata de una turbo máquina motora a reacción y de flujo mixto.

Son conocidas como turbinas de sobrepresión por ser variable la presión en las zonas del rodete, o de admisión total ya que este se encuentra sometido a la influencia directa del agua en toda su periferia. También se conocen como turbinas radiales-axiales y turbinas de reacción.

Las turbinas Francis son turbinas hidráulicas que se pueden diseñar para un amplio rango de saltos y caudales, siendo capaces de operar en rangos de desnivel que van de los diez metros hasta varios cientos de metros. Esto, junto con su alta eficiencia, ha hecho que este tipo de turbina sea el más ampliamente usado en el mundo, principalmente para la producción de energía eléctrica mediante centrales hidroeléctricas.

Las grandes turbinas Francis se diseñan de forma individual para cada emplazamiento, a efectos de lograr la máxima eficiencia posible, habitualmente más del 90 %. Son muy costosas de diseñar, fabricar e instalar, pero pueden funcionar durante décadas.

Una forma de clasificación en función de la velocidad específica del rodete, cuyo número de revoluciones por minuto depende de las características del salto sería la siguiente:

Turbina Francis lenta. Para saltos de gran altura (alrededor de 200 m o más).

Turbina Francis normal. Indicada en saltos de altura media (entre 200 y 20 m).

Turbinas Francis rápidas y extrarrápidas. Apropriadas a saltos de pequeña altura (inferiores a 20 m).

Además, para la producción de electricidad, pueden usarse para el bombeo y almacenamiento hidroeléctrico, donde un embalse superior se llena mediante la turbina (en este caso funcionando como bomba) durante los períodos de baja demanda eléctrica, y luego se usa como turbina para generar energía durante los períodos de alta demanda eléctrica.

Se fabrican micro turbinas Francis baratas para la producción individual de energía para saltos mínimos de 3 metros.

6.1. Ventajas de la turbina Francis

Su diseño hidrodinámico permite bajas pérdidas hidráulicas, por lo cual se garantiza un alto rendimiento.

Su diseño es robusto, de tal modo se obtienen décadas de uso bajo un costo de mantenimiento menor con respecto a otras turbinas.

Junto a sus pequeñas dimensiones, con lo cual la turbina puede ser instalada en espacios con limitaciones física también permiten altas velocidades de giro.

Junto a la tecnología y a nuevos materiales, las nuevas turbinas requieren cada vez menos mantenimiento.

6.2. Desventajas

No es recomendado para alturas mayores de 800 mt, por las presiones existentes en los sellos de la turbina.

Hay que controlar el comportamiento de la cavitación.

No es la mejor opción para utilizar frente a grandes variaciones de caudal, por lo que se debe tratar de mantener un flujo de caudal constante previsto, antes de la instalación.

6.3. Componentes principales

Caja espiral: tiene como función distribuir uniformemente el fluido en la entrada del rotor de una turbina.

Pre-distribuidor: tienen una función netamente estructural, para mantener la estructura de la caja espiral, tienen una forma hidrodinámica para minimizar las pérdidas hidráulicas.

Distribuidor: es el nombre con que se conocen los álabes directores de la turbo máquina, su función es regular el caudal que entra en la turbina, a la vez de direccionar al fluido para mejorar el rendimiento de la máquina. Este recibe el nombre de distribuidor Fink.

Rotor: es el corazón de la turbina, ya que aquí tiene lugar el intercambio de energía entre la máquina y el fluido, pueden tener diversas formas dependiendo del número de giros específicos para el cual está diseñada la máquina.

Tubo de aspiración: es la salida de la turbina. Su función es darle continuidad al flujo y recuperar el salto perdido en las instalaciones que están por encima del nivel de agua a la salida. En general se construye en forma de difusor, para generar un efecto de aspiración, el cual recupera parte de la energía que no fuera entregada al rotor en su ausencia.

6.4. Prueba de funcionamiento de turbina francis

A continuación se encuentra el objetivo principal de la prueba de funcionamiento de turbina francis.

6.4.1. Objetivos

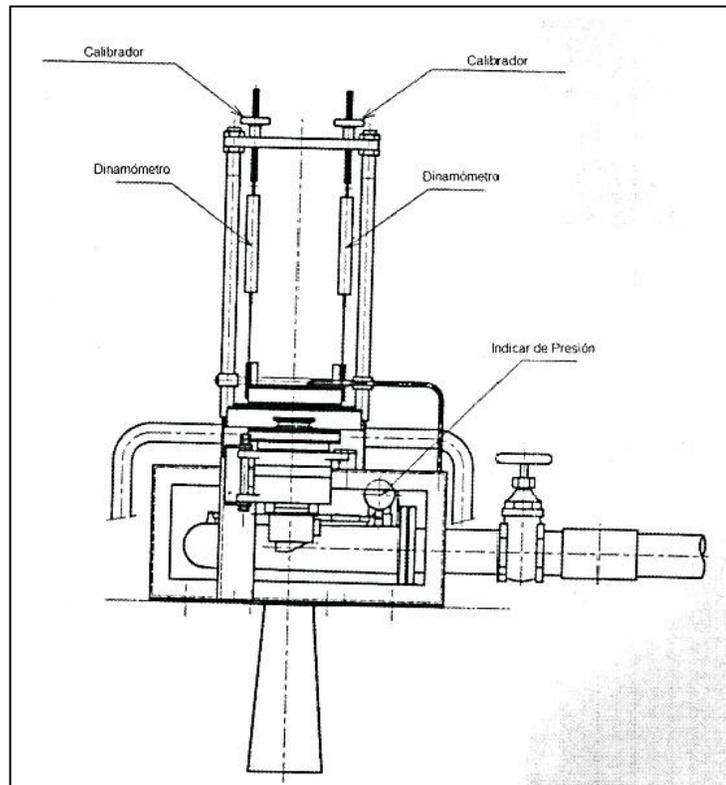
Calcular la salida teórica y real, así como la eficiencia de la turbina Francis.

Todos estos datos pueden ser medidos bajo una velocidad constante rotatoria de la turbina a una columna de agua constante.

6.5. Aparato experimental

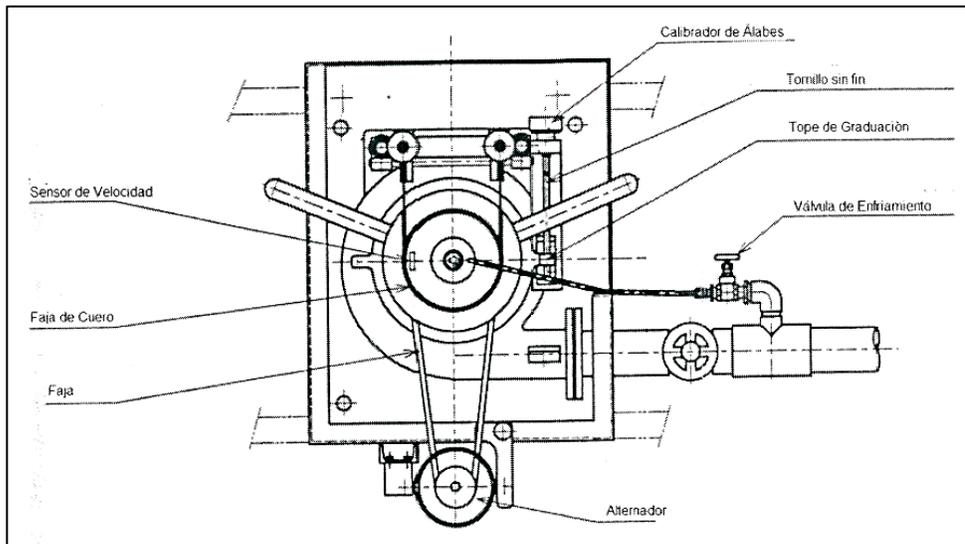
Los detalles son mostrados en las figuras siguientes:

Figura 12. **Detalle de turbina Francis, vista lateral**



Fuente: CARRILLO, Manuel. *Manual de equipo de simulación de central de potencia hidroeléctrica para entrenamiento técnico*. p. 90.

Figura 13. **Detalle de turbina Francis, vista de planta**



Fuente: CARRILLO, Manuel. *Manual de equipo de simulación de central de potencia hidroeléctrica para entrenamiento técnico*. p. 92.

6.6. Procedimiento de la práctica

A continuación se encuentra la preparación del procedimiento de la práctica.

6.6.1. Preparación

Calibración de dinamómetro de freno tipo Prony: el sistema del dinamómetro de freno debe estar horizontal y esto se logra ajustando los sostenedores desbalance de resorte.

La velocidad de la rueda Francis (N_f) y la columna de agua (H_f) deben ser ajustadas con la válvula V3, N_f debe ser de 800 rpm y H_f de 12 m.

Medida del flujo: con el selector de dos vías, la balanza, el contenedor de agua y el cronómetro deben estar preparados para hacer la medición.

6.6.2. Medición

La turbina Francis debe ser probada con varios caudales distintos, ajustando la válvula V3 y el ajuste de freno (dinamómetro tipo Prony) bajo las especificaciones de la velocidad rotacional de la turbina y la altura requerida.

La velocidad de la turbina, la presión del inyector, la medición que da el dinamómetro (carga) y el tiempo requerido y el peso del agua deben ser medidos para el desarrollo de la práctica.

La zapata del dinamómetro debe ser enfriada por medio de agua.

6.6.3. Procedimiento de finalización

Cerrar la válvula el inyector y la válvula V3

Apagar la bomba

El agua dentro del canal abierto debe ser drenada por medio de la válvula de desagüe del canal.

6.7. Rango del experimento

A continuación se presenta la medición del rango del experimento.

6.7.1. Medición

Velocidad rotacional de la turbina Francis (N_f) en revoluciones por minuto

La presión en el inyector (H_f) en kilogramos sobre centímetro cuadrado

La carga aplicada por el dinamómetro tipo Prony (G) en kilogramo

Masa de agua medida por la pesa W en G

Tiempo requerido para la medida de la masa de agua (t) en minuto

6.7.2. Calcular

El flujo promedio (Q_1) en metros cúbicos sobre segundo

La salida teórica de potencia en la turbina Francis (P_{thf}) en kilowatt

La salida real de la turbina Francis (P_f) en kilowatt

La eficiencia de la turbina Francis (η_f) en porcentaje

6.7.3. Ecuaciones a utilizar

Potencia teórica en la turbina Francis P_{thf} en kW

$$P_{thf} = \frac{\gamma Q H_f}{102}$$

Donde

$$\gamma = 1\,000 \text{ Kg/m}^3$$

Entonces

$$P_{thf} = 9,8 Q H_f$$

Potencia real de la turbina Francis P_f en kW

$$P_f = \frac{2\pi n_f LG}{60 \times 10^2}$$

Donde

N: velocidad de rotación de la turbina Francis en rpm

L: brazo del dinamómetro tipo Prony = 0,20 en m

G: carga medida por el dinamómetro en Kg

Entonces

$$P_f = \frac{n_f G}{4870}$$

Eficiencia de la turbina Francis η_p

$$\eta = \left(\frac{P_f}{P_{thf}} \right) \times 100$$

Caudal promedio

$$Q_1 = \frac{G}{60 \gamma t}$$

Donde

G: masa de agua pesada en la báscula

t: tiempo requerido

γ : 1 000 Kg

6.8. Interpretación de resultados

A continuación se muestra la interpretación de resultados.

6.8.1. Registro de resultados

Los datos de cada prueba que se realiza deben de ser registrados y tabulados.

Tabla XIX. **Datos obtenidos durante la práctica de turbina Francis**

Daos obtenidos durante la práctica					
	Flujo Actual	Flujo Actual	Velocidad	Carga	Altura
Símbolo	t	W	V	G	H
Dimensional	Seg	Kg	rpm	Kg	M
Referencia	Cronómetro	balanza	tacómetro	dinamómetro	Medidor gancho
Dato 1					
Dato 2					
Dato 3					
Dato 4					
Dato 5					
Dato 6					
Dato 7					
Dato 8					
Dato 9					
Dato 10					

Fuente: elaboración propia.

Tabla XX. **Datos calculados durante la práctica de turbina Francis**

Daos obtenidos durante la práctica					
	Caudal	Potencia teórica	Potencia real	Eficiencia	
Símbolo	Q_1	P_{thf}	P_f	n	
Dimensional	M^3/s	Kw	Kw	%	
Referencia	Cronómetro	ec. 5-6-1	ec. 5-6-2	ec. 5-6-3	
Dato 1					
Dato 2					
Dato 3					
Dato 4					
Dato 5					
Dato 6					
Dato 7					
Dato 8					
Dato 9					
Dato 10					

Fuente: elaboración propia.

Gráficas

Las curvas deben ser ploteadas en base del flujo promedio (Q_1)

Potencia teórica de turbina Francis P_{th} vs Q_1

Potencia real P vs Q_1

Eficiencia de la turbina Francis η_p vs Q_1

CONCLUSIONES

1. Con el módulo de Simulación de turbina Francis y Pelton se desarrolla e implementan las prácticas de laboratorio, para brindar los conocimientos que son utilizados en centrales de generación hidráulica.
2. Se desarrolla la práctica de laboratorio de medición de caudal se determina en forma teórica y experimental el caudal por medio de un vertedero de ángulo recto
3. Se implementa el desarrollo de funcionamiento de la turbina Pelton, para determinar la potencia real y teórica bajo una velocidad constante rotatoria.
4. Se implementa el desarrollo de la práctica de medición por fricción en tuberías y accesorios en función de los materiales utilizados para la construcción del módulo y el agua.
5. Se presenta el desarrollo de las pruebas de funcionamiento de las bombas multietapa, determinando la presión de entrada, presión de salida y eficiencia de la bomba.
6. Se desarrolla la prueba de efecto Venturi, en el cual a través de un dispositivo mecánico se estima el caudal que pasa en una tubería.
7. Se desarrolla la práctica de turbina Francis, en función de una velocidad constante, para determinar la eficiencia de la misma.

RECOMENDACIONES

1. La persona que designen como encargado de laboratorio puede considerar el brindar un mantenimiento adecuado al módulo de Simulación de turbina Francis y Pelton, principalmente para que no exista corrosión de las tuberías y en las bombas, con esto también se lograra el buen desarrollo de las prácticas de laboratorio.
2. A la persona encargada del desarrollo de las prácticas de laboratorio deberá considerar el movimiento circular del eje de las bombas, por lo que se recomienda hacer de conocimiento de los usuarios lo siguiente:
 - El tocar las bombas cuando estas estén en funcionamiento puede ocasionar accidentes graves tales como amputación de los dedos o quebraduras debido a que estas rotan a altas revoluciones.
 - Evitar el uso de ropa holgada o bufandas que puedan enredarse en el eje de los motores.
 - Indicar que el acceso está restringido al área de bombas cuando estas estén en funcionamiento, de notar alguna situación anómala reportarla inmediatamente con el instructor para que tome las medidas que considere pertinentes.
 - El tocar la faja de transmisión de la fuerza entre el generador y la turbina Francis cuando estas estén en funcionamiento puede ocasionar accidentes graves tales como amputación de dedos o quebraduras debido a que estas rotan a alta revoluciones.
3. Iguales condiciones de seguridad se deberán tomar en cuenta, al realizar la Prueba para la turbina Francis, el medio de transmisión de movimiento

entre la turbina y el generador es una faja para la transmisión de la fuerza.

4. Se sugiere ratificar los convenios entre la Facultad de Ingeniería por intermedio de la Escuela de Mecánica Eléctrica y el Instituto Nacional de Electrificación (Inde), para mantener el equipo existente en buen funcionamiento y uso continuo por parte del Inde, en caso de la Escuela, tener las ventajas de un laboratorio adicional para los estudiantes.

BIBLIOGRAFÍA

1. *Dispositivos para medir dispositivos caudal y velocidad de fluidos*. [en línea]. <<http://velocidadfluidos.blogspot.com/2010/10/dispositivos-para-medir-velocidad.html>>. [Consulta: 24 de enero de 2014].
2. FERNÁNDEZ DIEZ, Pedro. *Bombas centrífugas y volumétricas*. [en línea]. Departamento de Ingeniería Eléctrica y Energética-Universidad de Cantabria <http://www.academia.edu/7809190/DEPARTAMENTO_DE_INGENIERIA_ELECTRICA_Y_ENERGETICA_BOMBAS_CENTR%C3%8DFUGAS_Y_VOLU_M%C3%89TRICAS>. [Consulta: 30 de marzo de 2014].
3. GILES, Randal. *Mecánica de los fluidos e hidráulica*. Madrid: McGraw-Hill, 1994. 444 p.
4. HERNANDEZ KRAHE, Jose María. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. Madrid: UNED, 2010. 344 p.
5. KARASSIK, Igor; CARTER, Roy. *Bombas centrífugas*. México: CECSA, 1966. 560 p.
6. Wikipedia. *Efecto Venturi*. [en línea] http://es.wikipedia.org/wiki/Efecto_Venturi. [Consulta: 24 de enero de 2014].

7. _____ *Turbina Francis*. [en línea].
<http://es.wikipedia.org/wiki/Turbina_Francis> [Consulta: 24 de enero de 2014].

ANEXOS

APARATO DE DEMOSTRACION DEL FLUJO EN UN CIRCUITO DE FLUIDOS

MODELO: WT-3FP-L

INSTRUCCIONES DE MANEJO

Y

NOTAS DE FUNCIONAMIENTO

No. OP-8204-0024E

FUENTE DE ALIMENTACION

220 V. A.C. 60Hz 3 ϕ

110 V. A.C. 60Hz 2 ϕ

1. CONTENIDO

1. MODELO : WT-3FP-L
2. ESPECIFICACIONES GENERALES
3. TABLA DE COMPONENTES Y VISTA GENERAL
4. PANEL DE INSTRUMENTACION ELECTRICA, CIRCUITO DE ALIMENTACION Y DETALLE DE TUBERIA
5. EXPERIMENTOS
 - (1) EXPERIMENTO PARA MEDIR CAUDAL CON VERTEDEROS TRIANGULARES DE ANGULO RECTO
 - (2) PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO PARA TURBINA PELTON
 - (3) EXPERIMENTO PARA MEDIR LAS PERDIDAS POR FRICCION EN TUBERIAS Y ACCESORIOS
 - (4) PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO DE LA BOMBA MULTI-ETAPA PARA TURBINA
 - (5) EXPERIMENTO PARA MEDIR FLUJO POR MEDIO DE TUBO VENTURI
 - (6) PRUEBA DE FUNCIONAMIENTO PARA TURBINA FRANCIS

2. ESPECIFICACIONES GENERALES

CARACTERISTICAS

Todos los posibles estudios cuantitativos

Instrumentación completa proporcionada

Comparación directa entre alturas de presión principales

Ideal para trabajar en grupos de trabajo en el laboratorio

La salida del eje de cada turbina puede ser medida por un dinamómetro de freno de “prony”

Un mismo circuito de agua para ambas turbinas

Solamente la alimentación eléctrica es requerida

Gama de Experimentos

La salida del eje de cada generador pueden ser medidos por medio de:

1. Dinamómetro de freno tipo “Prony”
2. Una unidad de generador de C. A. (solamente para turbina Francis)

Para obtener las características de las bombas y turbinas sobre una distinta gama de flujos y alturas de agua

La medida del flujo puede ser calculada por:

1. orificio de flujo y un manómetro en forma de U en la tubería
2. Medidor de flujo tipo Venturi y manómetro en forma de U en la tubería
3. Válvula de compuerta y gancho de altura en el canal
4. tanque de calibración

Las pérdidas por fricción pueden ser medidas en:

1. tubería recta
2. Codo de radio pequeño de 90°
3. Válvula tipo Globo
4. Válvula de Compuerta
5. Válvula de Martillo
6. expansión y contracción súbita

ESPECIFICACIONES GENERALES

1. Bomba de agua y motor impulsor

Tipo:	Bomba centrífuga de voluta
Diámetro de tubería:	3B (nominal). 80.7mm (diámetro interno)
Altura de columna de agua y flujo:	15m x 0.81 m ³ /min. (17.8m x 0.7 m ³ /min.)
Potencia del Motor:	3.7 KW
Accesorios:	Válvula de Compuerta, calibrador de presión de la succión y la salida de la turbina (0 -6Kg/cm ² G) Manguera de succión flexible

2. Bomba de Agua y motor impulsor

Tipo:	Bomba centrífuga de voluta de dos etapas
Diámetro de tubería:	2B (nominal), 52.9mm (diámetro interno)

Altura de columna de agua y flujo: 26m x 0.25m³/min., (29m x 0.2 m³/min.)
Potencia del Motor: 2.2 KW
Accesorios: Válvula de Compuerta, calibrador de presión de la succión y la salida de la turbina (0 -6Kg/cm²)
Manguera de succión flexible

3. Turbina de agua tipo Francis

Diámetro de tubería: 3B (nominal). 80.7mm (diámetro interno)
Altura de columna de agua y flujo: 12m x 11 L/s
Revoluciones: 1000 rpm (máximo)
Accesorios: Dinamómetro de freno tipo "Prony"
Dinamómetro de AC (DC. 24V x 0.75KW)

4. Turbina de agua tipo Pelton

Diámetro de tubería: 50A (nominal). 52.9mm (diámetro interno)
Altura de columna de agua y flujo: 16.5m x 3.5 L/s
Revoluciones: 800 rpm (máximo)
Potencia generada: 0.3KW (aproximadamente)
Accesorios: Dinamómetro de freno tipo "Prony"
Válvula de presión (0 – 4Kg/cm²)

5. Canal

- a. Canal Abierto: 2800mm largo x 600mm ancho x 450mm alto
- b. Nivel de flujo separado por placas: 4 etapas separadas por placas perforadas
- c. Medida del flujo: Vertedero triangular de ángulo recto
- d. 2 formas de llenado de canal
- e. Medidor de altura tipo gancho: Rango (0 – 400mm)
Exactitud (10mm)

6. Tanque colector de agua

- a. Dimensiones: 400mm largo x 900mm ancho x 900mm Alto x 3.2mm espesor (nominales) de acero
- b. Capacidad: 2800 litros (aproximadamente)
- b. Accesorios: Medidor de nivel, tubería de drenaje, tubería de sobre flujos

7. Dispositivo de presión de flujo

- a. Sistema de presión: Control de flujo tipo by-pass (0–4Kg/cm²)
- b. Tanque recibidor de sobre flujo
- c. Calibrador de presión: 0 – 4Kg/cm²

8. Dispositivo de medición de flujo

- a. Ventura: 20mm diámetro de garganta
- b. Medidor de orificio 18mm diámetro de orificio
- c. Manómetro manómetro de U (sin mercurio Proporcionado)

9. Dispositivo de medición de
Perdidas por fricción

- a. Tuberías: 1¹/₄ B (nominal), 35.7mm (diámetro Interno)
- b. Circuito de Tubería: Codos de 90⁰ de radio corto, contracción y Expansión repentina, válvula tipo globo y tipo martillo
- c. Manómetro: Manómetro en forma de U (sin mercurio proporcionado), manómetro en forma de U inversa (nivel de agua)

10. Peso y capacidad del tanque

- a. Peso: 150Kg
- b. Capacidad: 130L

11. Panel de medición e instrumentos

- a. AC voltímetro: 0 – 400V x1
- b. AC amperímetro: 0 – 30A x1
- c. Medidor de factor de potencia: 0.5 -1 -1.5 x1
- d. Interruptor de encendido x3
- e. Carga eléctrica para generador AC:
 - i. Carga resistiva: 115W x ea.
 - ii. Ajuste de corriente de campo
 - iii. Voltímetro y amperímetro de DC

12. Accesorios estándar (no encontrados entre los dispositivos proporcionados en Aguacapa)

- a. Tacómetro de mano
- b. Cronometro
- c. Cubierta de pie

DETALLES GENERALES DE LOS COMPONENTES:

Estos están contruidos con materiales de alta calidad para tener mayor resistencia a la contra la corrosión sin descuidar su apariencia.

ALIMENTACION REQUERIDA PARA EL EQUIPO:

Conexión a tierra y corriente eléctrica 3 ϕ , 200/220V, 50/60Hz, otras fuentes de alimentación pueden suplir lo requerido.

Alimentación de agua y drenaje son requeridos para el buen funcionamiento del equipo.

DIMENSIONES Y PESO

Neto		Empacado para exportación	
Ancho:	5,200mm	Volumen:	33m ³
Profundidad:	1,600mm	Peso:	2000Kg
Alto:	2,700mm		

TABLA DE PARTES DEL EQUIPO
MODELO: WT – 3FP

1. BOMBA MULTI-ETAPA
 - 1.1. Calibrador de presión
 - 1.2. Calibrador de presión compuesto
 - 1.3. Válvula de entrada
 - 1.4. Válvula de paro
 - 1.5. Válvula de succión

2. CANAL ABIERTO
 - 2.1. Válvula de desagüe

3. PLACAS PERFORADAS (para estabilizar el flujo)

4. PLACA DE VERTEDERO

5. DEPOSITO DE AGUA PARA MUESTRA

6. CALIBRADOR DE GANCHO

7. 2 FORMAS DE LLENADO DE CANAL

8. SOPORTE

9. TANQUE COLECTOR DE AGUA

10. TURBINA PELTON
 - 10.1. Válvula de aguja (inyector)
 - 10.2. Calibrador de presión
 - 10.3. Válvula de esclusa
 - 10.1 DINAMOMETRO DE FRENO TIPO “PRONY”

- 10.1.1 Ajustador de freno
- 10.1.2 Balance de resorte
- 10.1.3 Refrigerante de agua para reducir el calor en el tambor
- 10.1.4 Pórtico para ajustar el brazo del freno

11. REGULADOR DE PRESION PARA EL CIRCUITO DE FLUJO

- 11.1. Válvula de paro
- 11.2. Válvula de paro
- 11.3. Válvula de paro
- 11.4. Calibrador de presión
- 11.5. Válvula de desagüe
- 11.6. Válvula de desagüe
- 11.7. Ajustador manual de presión

12. TUBERIA PARA MEDICION DE PERDIDAS LOCALIZADAS

13. CODOS PARA MEDICION DE PERDIDAS LOCALIZADAS

- 13.1. Codo
- 13.2. Codo
- 13.3. Curvatura de retorno (x2 Codos)

14. VALVULA DE EXCLUSA PARA LA MEDIDA DE LAS PERDIDAS LOCALIZADAS

15. VALVULA DE GLOBO PARA LA MEDIDA DE LAS PERDIDAS LOCALIZADAS

16. VALVULA DE MARTILLO PARA LA MEDIDA DE LAS PERDIDAS LOCALIZADAS

17. MEDIDOR TIPO VENTURI

18. ORIFICIO PARA MEDICION DE FLUJO

19. MANOMETROS

- 19.1. Manómetro de tipo u inverso
- 19.2. Manómetro de tipo u

20. PANEL DE INSTRUMENTACION ELECTRICA

21. BALANZA PARA PESO

22. CONTENEDOR DE AGUA

- 22.1. VALVULA DE DRENADO

23. TACOMETRO

24. CRONOMETRO

25. GENERADOR DE CORRIENTE DIRECTA

26. CARGA ELECTRICA RESISTIVA

27. PANEL DE INSTRUMENTACION AC

- 27.1. Voltímetro de AC
- 27.2. Amperímetro de AC
- 27.3. Indicador de factor de potencia

28. PANEL INSTRUMENTACION DC

- 28.1. Voltímetro de DC
- 28.2. Amperímetro de DC

29. BOMBA DE AGUA Y MOTOR IMPULSOR

- 29.1.
- 29.2. Calibrador de presión
- 29.3. Calibrador compuesto de presión
- 29.4. Válvula de compuerta
- 29.5. Válvula de paro
- 29.6. Válvula de presión

30. TURBINA TIPO FRANCIS

- 30.1. Válvula de control de flujo
- 30.2. Calibrador de presión
- 30.3. Válvula de esclusa
- 30.4. Calibrador de presión
- 30.5. embrague para válvula de control de flujo
- 30.6. polea de acople con generador

30.1 DINAMOMETRO DE FRENO TIPO "PRONY"

- 30.1.1 Ajustador de freno
- 30.1.2 Balance de resorte
- 30.1.3 Refrigerante de agua para reducir el calor en el tambor
- 30.1.4 Pórtico para ajustar el brazo del freno

31. MEDIDA DE CABEZA DE PERDIDAS

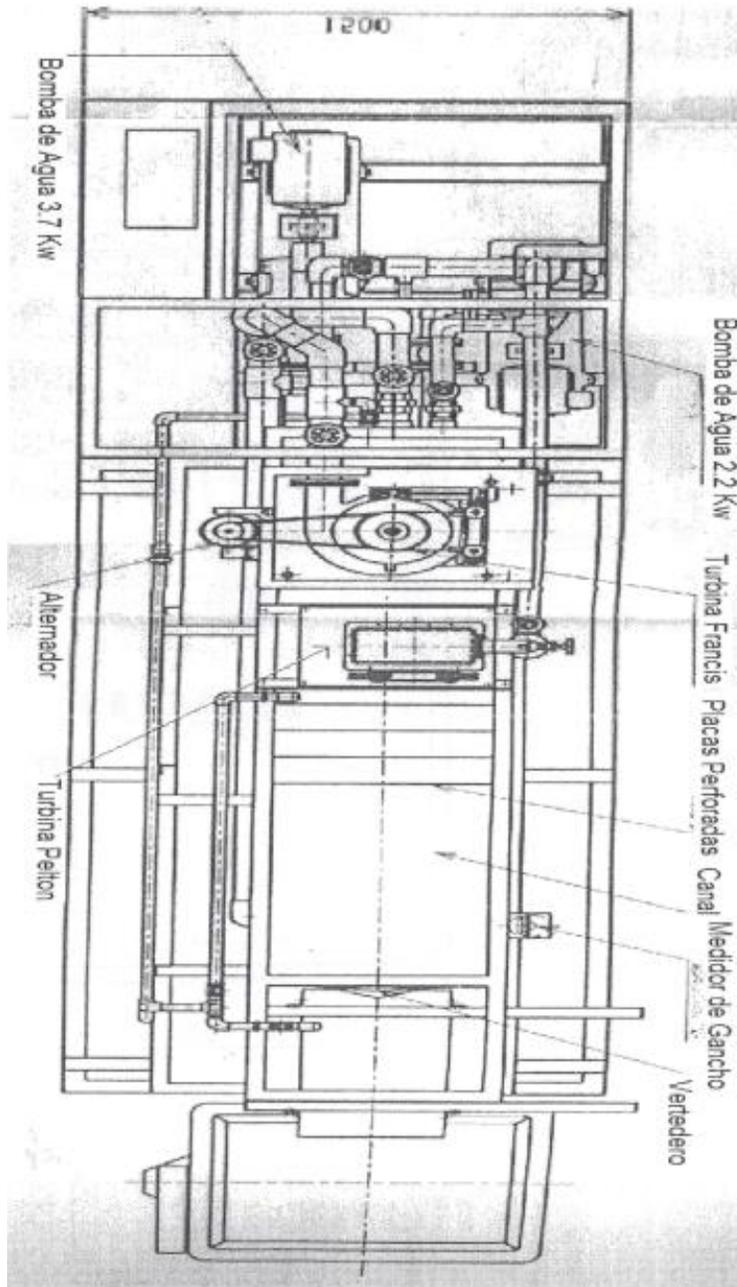
- 31.1. Expansión brusca
- 31.2. contracción brusca

Tabla I. **Viscosidad cinemática del agua.**

VISCOSIDAD CINEMATICA DE EL AGUA	
TEMPERATURA (T ⁰ C)	VISCOSIDAD CINEMATICA (M ² /S) x10 ⁻⁴
0	0.01794
5	0.01535
10	0.01297
15	0.01137
20	0.00996
25	0.00884
30	0.00796
35	0.00724
40	0.00663
45	0.00611
50	0.00562
55	0.00518
60	0.00480

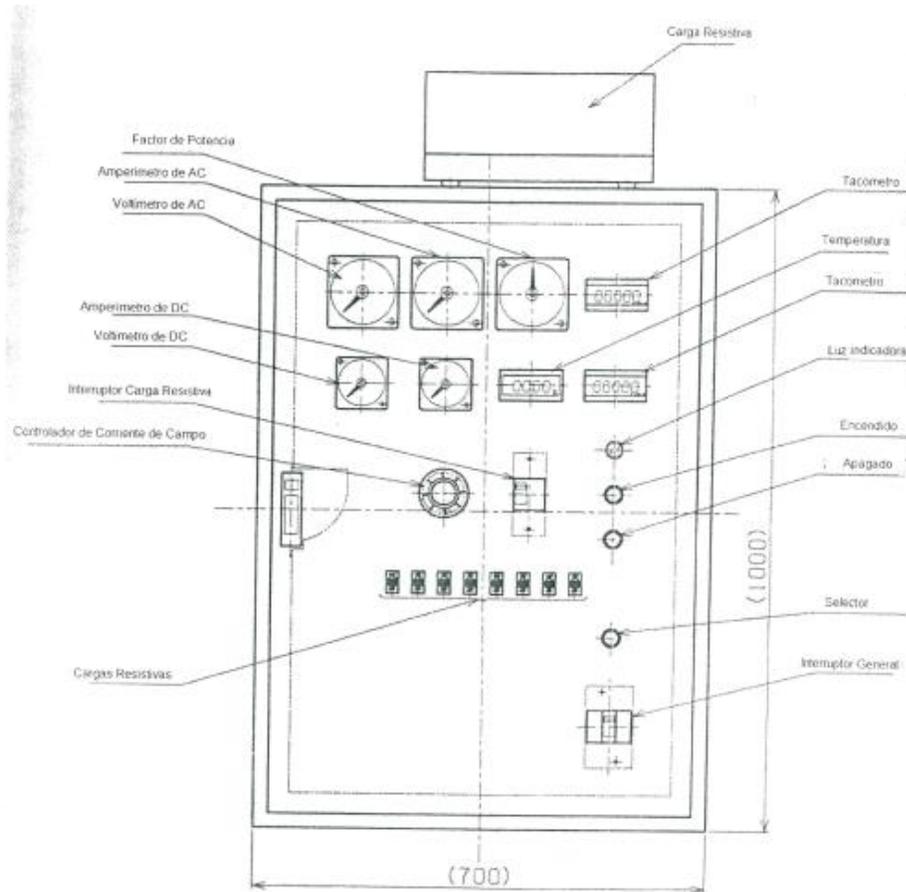
Fuente: Manual de equipo de simulación de central de potencia hidroeléctrica para
entrenamiento técnico.

Figura 1. Vista de Planta de Modulo de Simulación



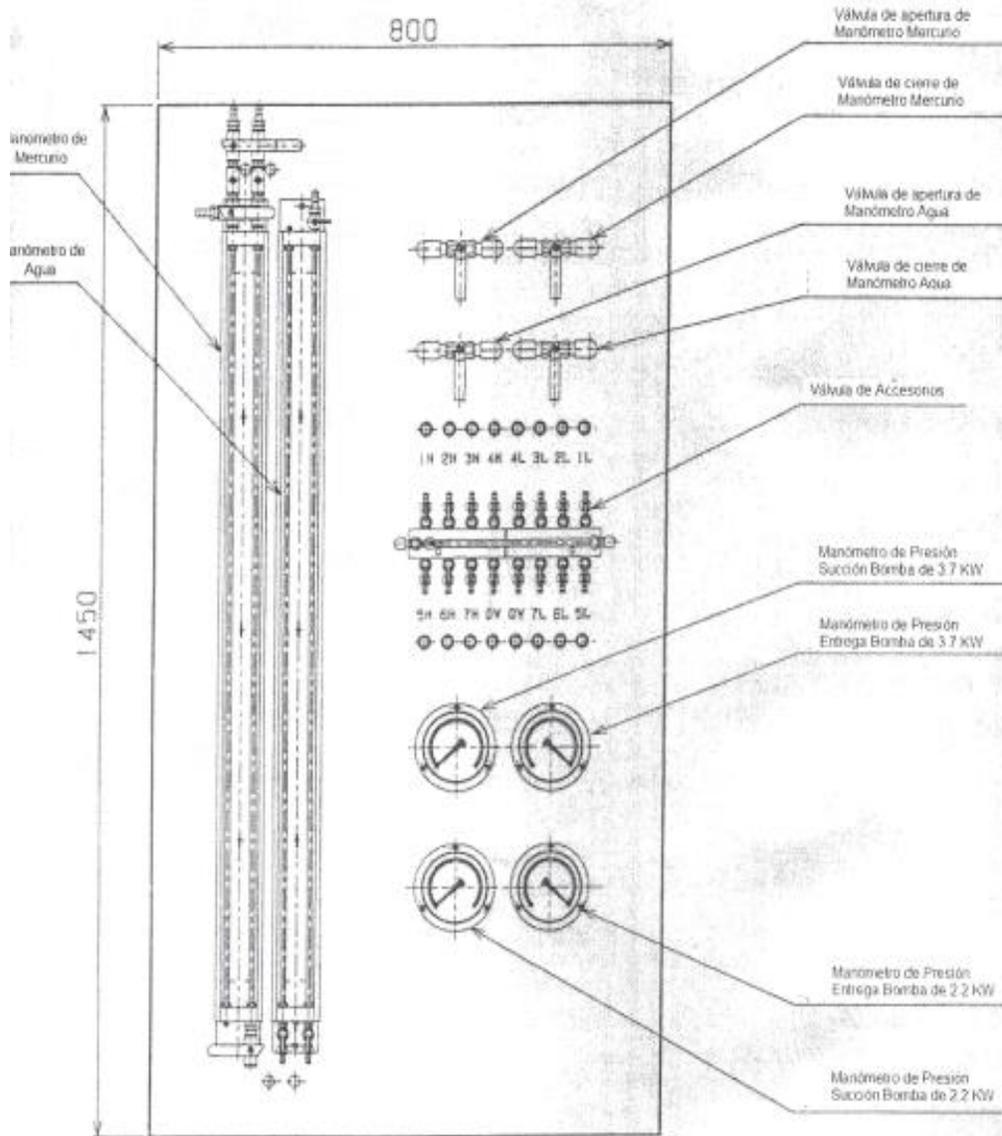
Fuente: Manual de equipo de simulación de central de potencia hidroeléctrica para entrenamiento técnico.

Figura 2. Panel de Instrumentación



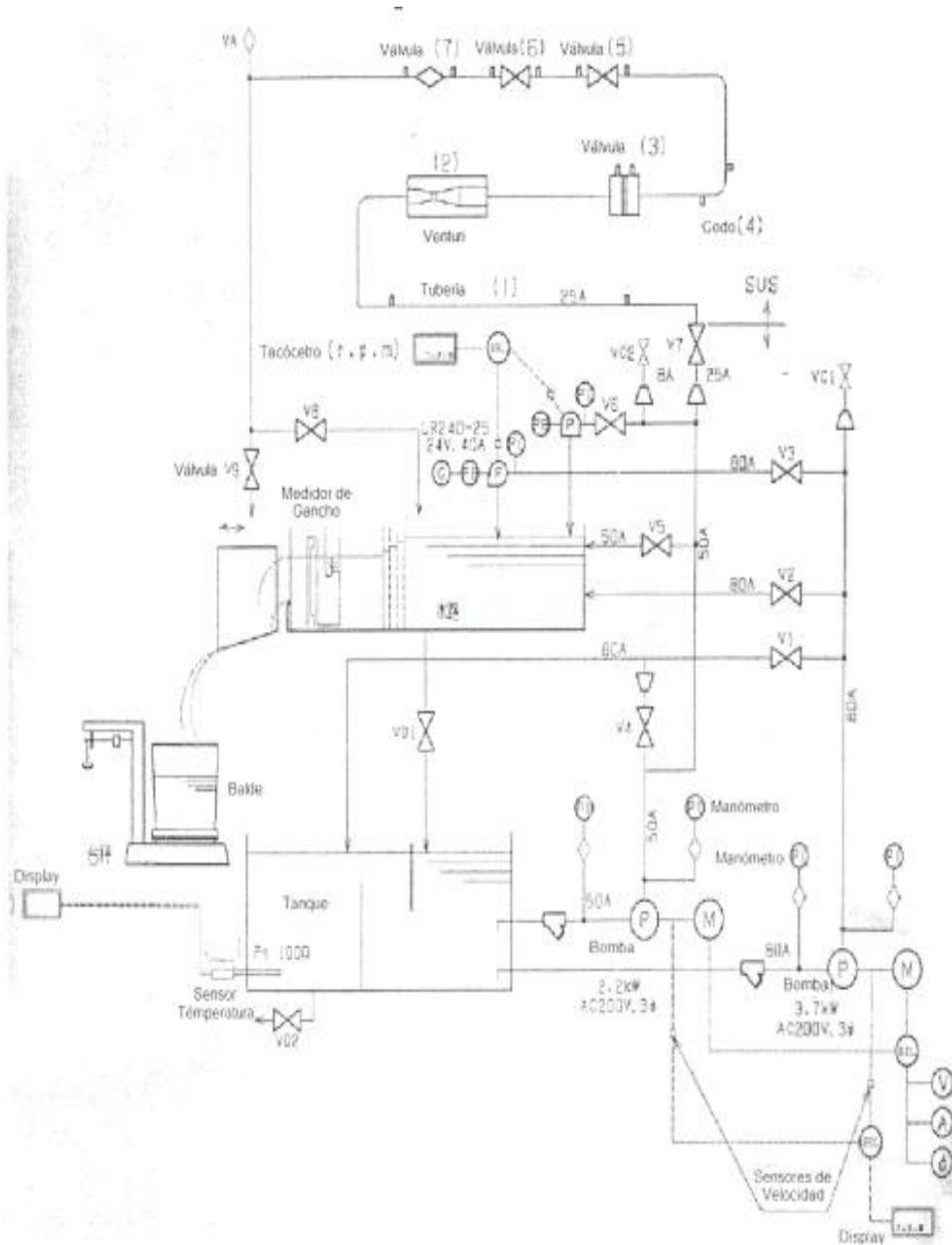
Fuente: Manual de equipo de simulación de central de potencia hidroeléctrica para entrenamiento técnico.

Figura 3. **Panel de Control**



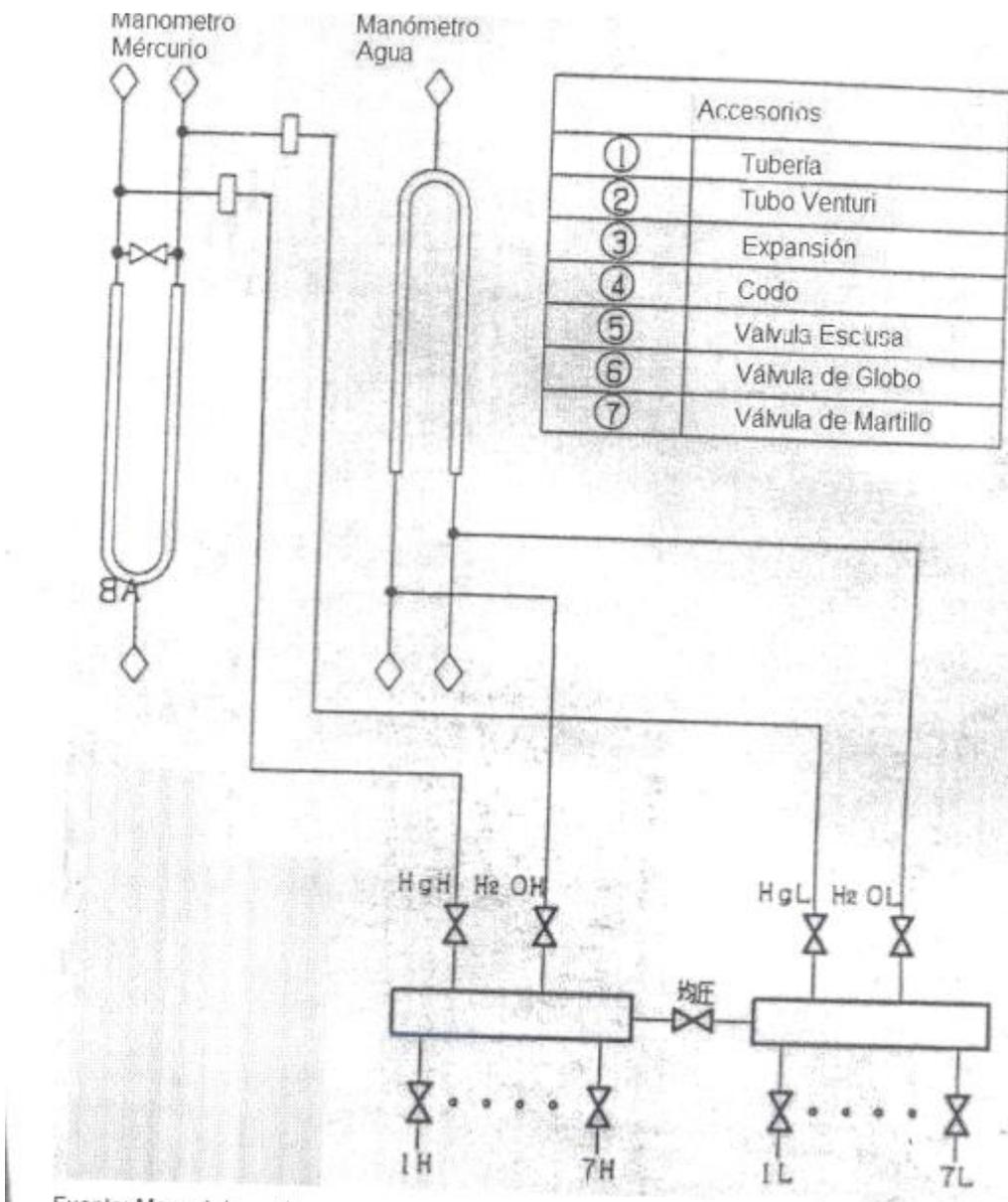
Fuente: Manual de equipo de simulación de central de potencia hidroeléctrica para entrenamiento técnico.

Figura 4. **Circuito**



Fuente: Manual de equipo de simulación de central de potencia hidroeléctrica para entrenamiento técnico.

Figura 5. Diagrama de manómetros de U para medir alturas de presión



Fuente: Manual de equipo de simulación de central de potencia hidroeléctrica para entrenamiento técnico.