



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA,
ELECTRÓNICA Y SISTEMAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA
ELÉCTRICA



**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DE
LABORATORIO PARA LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS
DE FUNCIONAMIENTO DE UNA BOMBA HIDRÁULICA
CENTRÍFUGA Y GRAFICAR SU CURVA CARACTERÍSTICA
H vs. Q”**

TESIS

PRESENTADA POR:

JOHNY JAVIER BRUNA TORRES

DENNIS CONDORI CAHUANA

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA**

PUNO – PERÚ

2023



NOMBRE DEL TRABAJO

"DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MÓDULO DE LABORATORIO PARA LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DE UNA BOMBA HIDRÁULICA CENTRÍFUGA Y GRAFICAR SU CURVA CARACTERÍSTICA H vs. Q"

AUTOR

JOHNY JAVIER /DENNIS BRUNA TORRES/CONDORI CAHUANA

RECuento DE PALABRAS

19848 Words

RECuento DE CARACTERES

106183 Characters

RECuento DE PÁGINAS

137 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

4.6MB

FECHA DE ENTREGA

Sep 11, 2023 2:59 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Sep 11, 2023 3:01 PM GMT-5

● **12% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base

- 10% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 7% Base de datos de trabajos entregados
- 0% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● **Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Material citado
- Bloques de texto excluidos manualmente
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)

 
Dr. Freddy Bernardo Cuyta Apaza
CIP: 166054
V° B°
SUB DIRECTOR(E) DE INVESTIGACIÓN
EPIME

 WALTER OSWALDO PAREDES PAREJA
INGENIERO MECANICO - ELECTRICISTA
Reg. del Colegio de Ingenieros N° 67951
ASESOR: Sr. WALTER OSWALDO PAREDES PAREJA

Resumen



DEDICATORIA

Dedicamos este trabajo de investigación a Dios quien nos inspira y nos da la fuerza para seguir cumpliendo uno de nuestros anhelos más importantes.

A nuestros padres por su amor, trabajo y sacrificio todos estos años para hacernos quienes somos hoy y quienes somos hoy. Es un honor ser sus hijos y son los mejores padres.

Gracias a nuestros hermanos y hermanas por estar siempre ahí, a nuestro lado, y por brindarnos apoyo moral en esta etapa de nuestras vidas.

Gracias a todos los que nos apoyan y hacen que nuestro trabajo sea un éxito, en especial a los que abren puertas y comparten conocimientos.

Johny Javier Bruna Torres



DEDICATORIA

Dedico a mis padres por apoyo económico y moral, a mis hermanos y amigos por su apoyo constante.

Dennis Condori Cahuana



AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por haberme brindado tan buena experiencia en la universidad, agradezco a mi universidad por hacerme una profesional que amo y a cada docente que participó en este proceso de formación integral para hacer de este grupo de egresados un producto terminado. convertido en memoria y prueba viva de la historia, en tratado que perdurará en el conocimiento y desarrollo de las generaciones venideras.

Finalmente, me gustaría agradecer a todos los que leyeron esta sección y más de mi tesis por su experiencia, investigación y conocimiento. Incluido en tu banco de información mental.

Johny Javier y Dennis



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN 13

ABSTRACT..... 14

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN..... 16

1.2. JUSTIFICACIÓN..... 17

1.3. OBJETIVO GENERAL 19

1.3.1. Objetivo general 19

1.3.2. Objetivos específicos..... 19

1.4. HIPÓTESIS 19

1.4.3. Hipótesis del trabajo..... 19

1.4.2. Hipótesis específicas 20

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES DEL PROYECTO 21

2.2. MARCO TEÓRICO 25

2.2.1. Bomba hidráulica Centrífuga 25

2.2.2. Fluidos 30



2.2.3. Conceptos importantes	34
2.2.4. Parámetros fundamentales de bombas	44
2.2.5. Curvas de funcionamiento de una bomba	47
2.2.6. Potencia de una bomba <i>P_B</i>	50
2.2.7. Instrumentos y dispositivos.....	50

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES.....	55
3.2. MÉTODOS	59
3.2.1. Método para medir el caudal.....	60
3.2.2. Método para determinar experimentalmente la altura manométrica o efectiva de una bomba	66
3.2.3. Método para determinar experimentalmente la curva característica de una bomba	68
3.2.4. Potencia de una bomba.....	70
3.2.5. Cavitación.....	74

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS	77
4.1.1. Ingeniería del diseño del sistema hidráulico del módulo de laboratorio.....	77
4.1.2. Cálculo de la Potencia de la bomba	93
4.1.3. Verificación del problema de cavitación.....	95
4.1.4. Procedimiento Experimental para Graficar Curva Característica H vs. Q... 100	
4.1.5. Curva de Homología	106
4.2. DISCUSIÓN	109



4.2.1. Influencia de la Altitud en el funcionamiento del Módulo Diseñado	112
V. CONCLUSIONES.....	118
VI. RECOMENDACIONES	120
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	121
ANEXOS.....	124

Área: Mecánica

Tema: Bombas centrifugas.

Fecha de sustentación: 21 de setiembre del 2023



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Bomba hidráulica centrífuga.....	26
Figura 2: Trayectoria de una partícula de agua en el rodete de una bomba: a) Radial; b) Axial; c) Radio-axial.....	27
Figura 3: Bomba centrífuga horizontal.....	27
Figura 4: bomba centrífuga vertical.	28
Figura 5: Partes de una bomba centrífuga.	29
Figura 6: Diferencia entre el comportamiento de un líquido y de un sólido frente a una fuerza cortante aplicada.	31
Figura 7: Relación entre las presiones manométrica, atmosférica y absoluta.	35
Figura 8: Imagen para demostración de la ecuación de continuidad.....	36
Figura 9: Esquema de una línea de corriente donde se aplica la ecuación de Bernoulli.....	38
Figura 10: Distribución de velocidades en flujo laminar y turbulento.....	39
Figura 11: Diagrama de Moody	42
Figura 12: Esquema del circuito hidráulico.....	43
Figura 13: Altura de carga de posición.....	45
Figura 14: Alturas de carga estática	46
Figura 15: Gráfico para determinar la altura efectiva.	46
Figura 16: Curva característica de una bomba.	47
Figura 17: Curva del sistema de tuberías.....	48
Figura 18: Punto óptimo de funcionamiento de una bomba.....	49
Figura 19: Manómetro de Bourdon	51
Figura 20: Manómetro de Bourdon	52
Figura 21: Rotámetro – partes	53
Figura 22: Válvula de compuerta	53



Figura 23: Válvula de globo	54
Figura 24: Esquema gráfico del sistema hidráulico de una bomba.	55
Figura 25: Parámetros geométricos del sistema hidráulico de una bomba.	57
Figura 26: Esquema del sistema hidráulico del módulo de laboratorio diseñado.	58
Figura 27: Montaje de un rotámetro	61
Figura 28: Venturímetro con manómetro diferencial	62
Figura 29: Gráfico para determinar el coeficiente de descarga C	64
Figura 30: Manómetro diferencial.....	65
Figura 31: Esquema de la instalación hidráulica del módulo de laboratorio.	67
Figura 32: Curva característica de una bomba.	70
Figura 33: Motobomba eléctrica	72
Figura 34: Esquema referencial del sistema hidráulico para el diseño	78
Figura 35: Esquema del circuito hidráulico para determinar la altura manométrica (H)	82
Figura 36: Alturas de aspiración e impulsión de una instalación hidráulica.	84
Figura 37: Determinación del coeficiente de fricción primaria (f) en el diagrama de Moody	89
Figura 38: Coeficiente de pérdidas para diferentes accesorios.	91
Figura 39: Lectura de la presión atmosférica	96
Figura 40: Determinación del $NPSHr$	99
Figura 41: Esquema de la bomba con los instrumentos de presión.....	101
Figura 42: Curva Característica H vs. Q	105
Figura 43: Curva de Homología	108
Figura 44: Curva del Fabricante y Curva del Sistema.....	109



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Cálculo de la ΣK de los coeficientes de las pérdidas de accesorios	91
Tabla 2: Datos experimentales medidos en los instrumentos del módulo diseñado....	102
Tabla 3: Datos experimentales del caudal (Q) y la altura manométrica (H).	104
Tabla 4: Caudales (Q_i) y alturas manométricas (H_i) para graficar la curva de homología	107
Tabla 5: Factor de reducción para variaciones de altura y temperatura de instalación	115



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

- ASME** : American Society of Mechanical Engineers
- EPIME** : Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica.
- FICA** : Facultad de Ingeniería Civil y Arquitectura
- PUCP** : Pontificia Universidad Católica del Perú
- PVC** : Policloruro de vinilo
- RPM** : Revoluciones por minuto
- UNAP** : Universidad Nacional del Altiplano de Puno



RESUMEN

En la actualidad la utilización de las bombas se está incrementando de una manera significativa en el sector industrial; por lo que llega a ser de necesidad que los ingenieros que trabajan en el área tan importante de la producción de la sociedad tengan una formación académica integral, en el aspecto teórico, como en el experimental o práctico, para que tengan un desenvolvimiento profesional eficiente. En ese contexto se desarrolló la investigación de tesis cuyo principal objetivo es diseñar y construir un módulo de laboratorio que permita la determinación experimental de parámetros de operación en una bomba hidráulica centrífuga y graficar la curva del fabricante, investigación experimental importante en el área del diseño mecánico. Los resultados de los objetivos propuestos se cumplieron satisfactoriamente se diseñó y construyó el módulo didáctico de laboratorio para la experimentación en una bomba, teniendo en consideración el aspecto de la cavitación, diseñándose los ensayos técnicos para determinar los parámetros de funcionamiento de la bomba y, realizándose los cálculos experimentales que permitieron graficar la curva característica del fabricante; empleándose en el desarrollo de la investigación, la metodología de la Ingeniería del Diseño Mecánico, conjuntamente con la metodología para el diseño de ensayos técnicos experimentales. Concluyéndose que es factible diseñar y construir módulos de laboratorios didácticos que contribuyan eficientemente en el proceso de formación académica de los estudiantes en especial la forma pedagógica para mejorar el nivel de formación profesional, y la investigación experimental del diseño mecánico tanto docentes como estudiantes, en el área de la ingeniería, siendo muy importante para la generación de tecnología en nuestro país.

Palabras clave: Bomba hidráulica, diseño mecánico, módulo laboratorio, parámetro, ensayos técnicos, cavitación.



ABSTRACT

Currently the use of pumps is increasing significantly in the industrial sector; Therefore, it becomes necessary for engineers who work in the very important area of society's production to have comprehensive academic training, both theoretically and experimentally or practically, so that they have efficient professional development. In this context, the thesis research was developed whose main objective is to design and build a laboratory module that allows the experimental determination of operating parameters in a centrifugal hydraulic pump and to graph the manufacturer's curve, an important experimental research in the area of mechanical design. . The results of the proposed objectives were satisfactorily met, the laboratory teaching module was designed and built for experimentation in a pump, taking into consideration the aspect of cavitation, technical tests were designed to determine the operating parameters of the pump and, carrying out the experimental calculations that allowed the manufacturer's characteristic curve to be graphed; using the methodology of Mechanical Design Engineering in the development of the research, together with the methodology for the design of experimental technical tests. Concluding that it is feasible to design and build teaching laboratory modules that efficiently contribute to the academic training process of students, especially the pedagogical form to improve the level of professional training, and the experimental research of mechanical design, both teachers and students, in the engineering area, being very important for the generation of technology in our country.

Keywords: Hydraulic pump, mechanical design, laboratory module, parameter, technical tests, cavitation.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

En el área de la ingeniería el conocimiento teórico y experimental es fundamental para comprender el funcionamiento de una bomba hidráulica centrífuga, más teniendo en cuenta su gran aplicación en el campo industrial, minero y residencial; estos conocimientos son importantes porque en el mercado hay una gran variedad de bombas y una selección óptima para una determinada aplicación, requiere el conocimiento teórico y experimental de los parámetros de funcionamiento de la bomba.

Los conocimientos teóricos que se aplican a las bombas hidráulicas son los relacionados a mecánica de fluidos, hidráulica y turbomáquinas, conocimientos que deben ser experimentados por los estudiantes para el proceso de aprendizaje y comprensión integral y, que es la única manera para la validación y aplicación de los conocimientos a la práctica. Para la experimentación de los aspectos teóricos del funcionamiento de una bomba, los módulos de laboratorio existentes en el mercado nacional no se prestan para una enseñanza didáctica y por ende para un aprendizaje eficiente de los estudiantes porque el diseño del módulo por consideraciones comerciales no coincide con los esquemas gráficos que presentan todos los libros, para el análisis teórico y experimental de una bomba, que generalmente consiste en depósito de agua ubicado en un nivel inferior, un sistema de tuberías hidráulico en el que se realiza el montaje de la bomba que impulsa el agua a un depósito de agua ubicado en un nivel superior; que es el objetivo de una bomba el de elevar un fluido de un nivel inferior a un gran nivel superior. En los módulos de laboratorio que se venden en el mercado nacional solo presentan un depósito en el nivel inferior en el que se recicla el agua impulsada por



la bomba; diseño hidráulico que no permite a los estudiantes apreciar objetivamente los parámetros de funcionamiento de una bomba hidráulica.

En el proyecto de investigación que es de tipo experimental o aplicativo se diseñó un módulo de laboratorio que se preste a una enseñanza didáctica de la determinación experimental de los parámetros de funcionamiento de una bomba hidráulica centrífuga, aplicando los conocimientos trascendentales de la mecánica de fluidos, hidráulica y turbomáquinas a la investigación experimental con el objetivo de contribuir a elevar el nivel académico de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica.

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

A nivel mundial el diseño y construcción de módulos de laboratorio para la enseñanza universitaria y su posterior venta al mercado mundial es realizado por empresas de Estados Unidos y Alemania, sus departamentos de diseño están integrados por un grupo de ingenieros de diseño con amplia experiencia en el rubro del diseño mecánico. En América Latina, como en el Perú las universidades para implementar sus laboratorios de preferencia compran los módulos de laboratorio a empresas extranjeras, principalmente de Estados Unidos y Alemania por su prestigio y garantía y su experiencia. Estas empresas venden sus módulos a través de empresas comerciales de venta que se encuentran en las capitales de los diferentes países, las cuales una vez que tienen una venta lo importan de la empresa extranjera ganando un buen porcentaje sobre el precio de costo.

El problema de la implementación de módulos de laboratorio en las universidades del Perú, como es el caso de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno, tiene su causa principal en el presupuesto económico del Estado que no destina el porcentaje adecuado para la educación en las universidades, lo cual tiene consecuencias nefastas en



la formación académica de los estudiantes, al no poder contrastar los conocimientos teóricos con la experimentación, necesaria para su aprendizaje y validación de dichos conocimientos. En ese contexto problemático nos preguntamos si es posible aplicar los conocimientos teóricos aprendidos en la universidad para contribuir a la solución de este problema crítico en la enseñanza de los docentes y en el aprendizaje de los estudiantes, lo cual repercute en su nivel de formación académica fundamental para su desempeño como profesional, por lo que nos planteamos las siguientes preguntas, que servirán de marco referencial de nuestro proyecto de investigación y, es más serán las guías que conducirán el desarrollo de nuestra investigación:

- ¿Es posible aplicar los conocimientos teóricos para diseñar un módulo de laboratorio para analizar el funcionamiento de una bomba hidráulica centrífuga?
- ¿Es posible realizar la construcción de un módulo de laboratorio para analizar el funcionamiento de una bomba hidráulica centrífuga?
- ¿Es posible determinar experimentalmente los parámetros de funcionamiento de una bomba hidráulica centrífuga?

1.2. JUSTIFICACIÓN

Una justificación importante del proyecto de investigación es la aplicación de los conocimientos aprendidos en la universidad a la solución de un problema práctico de la universidad, el diseño de un módulo para la implementación del Laboratorio de Ingeniería Mecánica con consideraciones de diseño de acuerdo a nuestras necesidades propias y que se adecue a realizar en él un proceso de enseñanza pedagógica y didáctica para el aprendizaje óptimo de los estudiantes. Y es más, el desarrollo del diseño mecánico en la industria nacional es mínimo, aspecto en el cual la Universidad Peruana debe jugar un papel importante, la tesis servirá como marco referencial para impulsar la implementación



de los laboratorios de la Universidad con módulos que se adecuen a la enseñanza universitaria de cada Escuela Profesional, considerando además que los precios de venta de los módulos es aproximadamente cinco veces el precio de un módulo diseñado en la Universidad.

En la revisión bibliográfica nacional e internacional solo existen diseños de módulos para estudiar el funcionamiento de bombas en serie y paralelo, en ese contexto es una justificación académica importante, porque en la tesis se diseñó un módulo para determinar los parámetros de operación de una sola bomba, lo cual es prioritario para comprender y estudiar posteriormente en forma más óptima la operación de las bombas cuando están instalados en serie y paralelo.

Los fluidos como el agua por su naturaleza, son altamente móviles, por lo que pueden ser transportados de un lugar a otro por medio de canales abiertos y conductos cerrados (tuberías); debido a la amplia difusión de los fluidos en la industria, el ingeniero debe estar capacitado para resolver problemas relacionados con las bombas hidráulicas que son amplios y complejos, que tienen que ser investigados y experimentados en módulos de laboratorio didácticos para la comprensión de los estudiantes que es el objetivo de la tesis y por lo tanto una justificación académica importante.

La justificación económica es relevante y obvia porque el diseño de módulos de laboratorio con características propias para solucionar un problema académico, en principio solucionará un problema crítico de la Universidad que es la implementación de los laboratorios por falta de presupuesto y en segundo lugar el ahorro de gran presupuesto económico por la diferencia entre los precios de módulos comprados y diseñados.

La investigación es un aspecto fundamental a desarrollar en la universidad e incluso con mayor énfasis la investigación de tipo experimental en el área de la ingeniería,



en ese entender el proyecto de investigación se justifica porque contribuirá a motivar la investigación aplicada o experimental muy importante en la formación académica profesional de la ingeniería y el módulo de laboratorio didáctico a diseñar impulsará y servirá para la enseñanza de la investigación de los estudiantes de la Escuela Profesional.

1.3. OBJETIVO GENERAL

1.3.1. Objetivo general

- Diseñar y construir un módulo de laboratorio para la determinación experimental de parámetros de funcionamiento de una bomba hidráulica centrífuga y graficar su curva característica.

1.3.2. Objetivos específicos

- Diseñar un módulo de laboratorio para analizar el funcionamiento de una bomba hidráulica centrífuga.
- Construir un módulo de laboratorio para analizar el funcionamiento de una bomba hidráulica centrífuga.
- Determinar experimentalmente los parámetros de funcionamiento de una bomba hidráulica centrífuga y graficar su curva característica H vs. Q .

1.4. HIPÓTESIS

1.4.3. Hipótesis del trabajo

- Es posible diseñar y construir un módulo de laboratorio para la determinación experimental de parámetros de funcionamiento de una bomba hidráulica centrífuga graficar su curva característica H vs. Q .



1.4.2. Hipótesis específicas

- Es posible diseñar un módulo de laboratorio para una bomba hidráulica centrífuga.
- Es posible construir un módulo de laboratorio para una bomba hidráulica centrífuga.
- Es posible determinar experimentalmente el funcionamiento de una bomba hidráulica centrífuga y graficar su curva característica H vs. Q .



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES DEL PROYECTO

Ruiz (2019) diseño e implementó un prototipo de módulo didáctico de caudal para medir su influencia en el aprendizaje de la instrumentación y control industrial. Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico de la Universidad Tecnológica del Perú. En la investigación el objetivo es elevar el rendimiento académico de los estudiantes a través del diseño de un módulo de laboratorio didáctico de caudal para la enseñanza experimental que complementa y valide los conocimientos teóricos.

El tipo de investigación es experimental, se recolectaron datos a través de una pre y post prueba, aplicándolo al módulo diseñado; finalmente con la aplicación de la post prueba a ambos grupos. Concluyéndose de estos resultados que el módulo diseñado en forma didáctica eleva en forma significativa el rendimiento académico de los alumnos.

Paredes (2019) diseño y construyó un módulo de bombas centrífugas e implementación de Guías Prácticas para el estudio de sus principales características. Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico Electricista, Universidad Católica de Santa María. El objetivo de la tesis fue diseñar y construir un módulo de banco de pruebas para analizar el funcionamiento de las bombas en diferentes sistemas hidráulicos y el diseño de las guías de laboratorio de Termofluidos de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, Mecánica Eléctrica y Mecatrónica.

La metodología empleada es el diseño mecánico experimental; el resultado del proyecto fue el banco de pruebas ideado similarmente a la de los sistemas hidráulicos de la industria. El módulo servirá para estudiar y analizar experimentalmente las



características de las bombas centrífugas y, contrastar y validar con la teoría de mecánica de fluidos y turbomáquinas. En la construcción del banco de pruebas se verificaron experimentalmente las mediciones de presión y caudal, para que coincidan con los cálculos de la teoría.

En base a la experimentación de las características de las bombas, se prepararon las Guías de Laboratorio para las prácticas respectivas de los alumnos de la Escuela Profesional.

Ortiz (2016), implemento el laboratorio de bombas centrífugas en la Universidad de Antioquia El ensayo técnico de bombas centrífugas, que servirá de marco referencial para la investigación de la tesis, cuyo objetivo es analizar el comportamiento de dos bombas a través de las gráficas de potencia y altura manométrica con respecto al caudal.

El módulo empleado consta de 2 bombas centrífugas, 2 manómetros, 2 vacuómetros, 2 dinamómetros y un tacómetro. En el ensayo para 2000 RPM y tres posiciones de la válvula de descarga se determina el caudal, trabajo de los motores eléctricos, altura manométrica y eficiencia del equipo.

Para las bombas funcionado en serie y paralelo, con los resultados experimentales se grafican las curvas de la altura manométrica respecto al caudal de operación.

Quispe & Maquera (2019) diseño y construyó un módulo de laboratorio para el análisis de los parámetros de una bomba centrífuga de 1 HP como turbina. Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico Electricista de la UNA - Puno. El objetivo de la tesis; que es una investigación de tipo experimental y descriptivo; es diseñar y construir un módulo de laboratorio para estudiar el funcionamiento de una bomba como turbina desde 3100 y 3600 RPM. La metodología se inició con la identificación de la necesidad, definición del problema, síntesis, análisis y optimización, evaluación y construcción del



prototipo. La conclusión de la investigación es algo concreto o real, el módulo diseñado y construido, donde se analizó experimentalmente que si es posible usar una bomba hidráulica centrífuga como turbina en microcentrales hidroeléctricas.

Huapaya & Ginocchio (2017) realizó la Guía de investigación en ciencias e Ingeniería PUCP. La presentación de esta guía muy importante para los alumnos de pregrado de la PUCP y en general para todas las universidades, fue realizada por la Vicerrectora de investigación de esta Universidad; cuya Guía se publicó gracias al trabajo académico de profesores, decanos, Jefes de Departamento y profesionales involucrados en la investigación. Este documento servirá de marco de referencia y contribuirá a la formación de investigadores idóneos y elevará el nivel académico de la publicación de trabajos de investigación.

Las guías abarcan las características de conocimientos y técnicas de investigación de cada Escuela Profesional considerando los aspectos éticos; lo que contribuirá al desarrollo académico de los alumnos y generando nuevos conocimientos. Las guías abarcan las características de conocimiento y técnicas para una mejor comprensión y aplicación tienen ejemplos tomados de las mejores tesis de cada facultad.

Moncada (2021) implemento el Laboratorio para el estudio de bombas centrífugas para la Universidad Antonio Nariño sede Cucuta. Colombia, Tesis para optar el título de Ingeniero Mecánico. El objetivo de la investigación es la implementación de un laboratorio con un módulo con características didácticas para una mejor enseñanza y aprendizaje del funcionamiento de bombas centrífugas, porque en la actualidad no se cuenta con el módulo. En las etapas de la metodología se compró una bomba centrífuga, se transportó la bomba al taller de desmontaje, se decidió los cortes a realizar en la carcasa, se ejecutaron los cortes y se pintó para una mejor identificación de la parte interna



de la bomba, se armó la bomba, se fabricó el soporte metálico de la bomba y al final con el diseño de las guías pedagógicas. Se concluyeron satisfactoriamente las etapas de la metodología de la investigación para diseñar y construir el módulo de laboratorio pedagógico.

Ardila et al. (2019) diseño y construyó de un banco de pruebas de bombas centrífugas en serie y en paralelo. Tesis para optar el título de Ingeniero electromecánico en Unidades Tecnológicas de Santander. España. Considerando que en los procesos industriales se requiere sistemas de bombeo con gran caudal y altura manométrica o efectiva, por lo que es necesario más de una bomba. El objetivo de la investigación es diseñar, construir y poner en marcha el banco de pruebas para operar bombas en serie y paralelo; para elevar el nivel de aprendizaje de los alumnos de Ingeniería electromecánica en el curso de mecánica de fluidos. La selección adecuada de las bombas para el banco de pruebas, implicó un análisis hidráulico de los sistemas de conexión de las bombas en serie y paralelo. Análogamente se analizó para la selección e accesorios e instrumentos de medición para un eficiente funcionamiento del sistema hidráulico. El módulo a diseñar servirá para medir caudales, presiones, determinar curvas características y, observar el funcionamiento de bombas centrífugas en serie y paralelo. En la tesis se desarrolla Guías de Laboratorio para la experimentación de los alumnos.

Arviza & Balbastre (2020) elaboró las Prácticas de Laboratorio: Hidráulica. En la Universidad Politécnica de Valencia - España. Esta información bibliográfica tiene por temática práctica sobre sistemas hidráulicos impulsados por bombas centrífugas. En la agricultura el desarrollo de riegos a presión: aspersión, microaspersión y localizado; como la utilización de aguas subterráneas para riego, es importante seleccionar los dispositivos hidráulicos para la distribución del agua del punto de captación al destino final; uno de los dispositivos principales son las tuberías, los que deben seleccionarse de acuerdo a las



Normas vigentes, material adecuado, etc. y lo principal en función de la geometría del sistema hidráulico impulsado con bombas centrífugas de acuerdo a la necesidad a satisfacer en la sociedad.

Cajo & Lopez (2012) diseño y construyó un banco de pruebas para la determinación de la eficiencia de bombas centrífugas domiciliarias. Tesis para optar el título de Ingeniero Químico de la Escuela de Ingeniería Química de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Ecuador. Se realizó la investigación porque no existía un módulo para realizar ensayos en los laboratorios de la Escuela, los estudiantes solo adquirirían conocimientos teóricos. El módulo diseñado sirve para determinar experimentalmente la potencia, caudal, presión, pérdidas primarias y secundarias y eficiencia máxima de las bombas acopladas en serie y paralelo. Los resultados obtenidos al montar 44 bombas de diferentes marcas comerciales fueron diferencias en la capacidad máxima de bombeo al montarlas individualmente. Las bombas Pedrollo y Mheyeres bombean 25 L/min con una eficiencia de 30%, las Barrow y Paolo bombean 20 L/min con una eficiencia de 25%; por las características técnicas de las bombas y el sistema hidráulico.

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Bomba hidráulica Centrífuga

La bomba centrífuga es una bomba hidráulica que convierte la energía mecánica en energía cinética del agua, aumenta la velocidad del agua para que pueda ser transportada a distancias muy grandes. Se la denomina también rotodinámica, son las bombas hidráulicas más utilizadas en la industria para bombear líquidos en general y son capaces de desplazar grandes volúmenes de agua.

En la industria utilizan las bombas centrífugas en los procesos mecánicos, como en la industria química, sector de automoción, industria alimentaria, etc.



Figura 1: Bomba hidráulica centrífuga

Fuente: <https://www.seguas.com/bombas-centrifugas-instalaciones-hidraulicas/>

2.2.1.1. Tipos de bombas centrífugas

Por la dirección del flujo: Según la dirección como el agua atraviese la bomba, en la Figura 2.2 se grafica con línea continua y flecha la trayectoria con que atraviesa una partícula el rodete:

- **Radial:** La velocidad del agua según el eje del rodete solo tiene componentes tangencial y radial.
- **Axial:** La velocidad del agua solo tiene componentes axial y circunferencial.
- **Radio-axial:** La velocidad del agua tiene componente en los tres ejes.

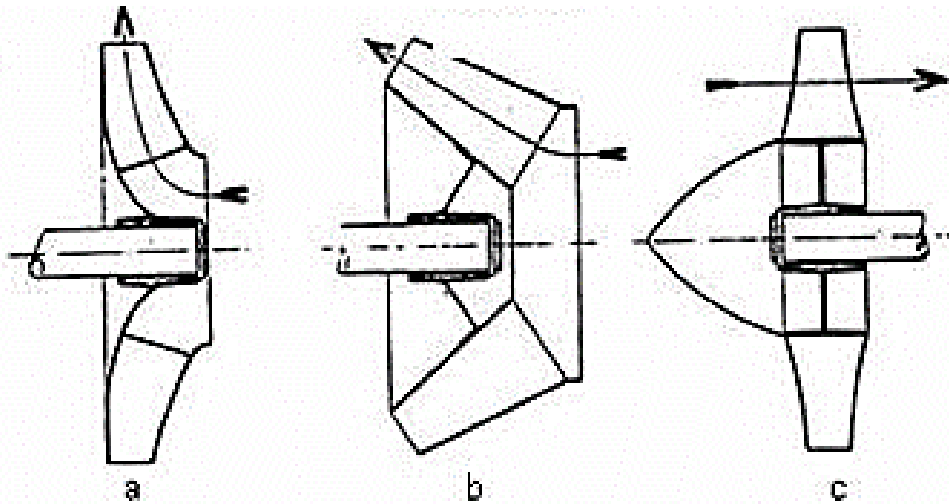


Figura 2: Trayectoria de una partícula de agua en el rodete de una bomba: a) Radial; b) Axial; c) Radio-axial.

Fuente: <https://www.aiu.edu/spanish/Thermodynamic.html>

Por la posición del eje de rotación:

- **Horizontales:** el eje de rotación de la bomba tiene una posición horizontal.



Figura 3: Bomba centrífuga horizontal.

Fuente: <https://www.seguas.com/bombas-centrifugas-instalaciones-hidraulicas/>

- **Verticales:** El eje de rotación de la bomba tiene una posición vertical.



Figura 4: bomba centrífuga vertical.

Fuente: <https://www.seguas.com/bombas-centrifugas-instalaciones-hidraulicas/>

2.2.1.2. Partes de una bomba Centrífuga

Las partes son:

- **Carcasa:** Parte protectora de los mecanismos internos activos de la bomba. Es construida con el material adecuado a su función, de hierro fundido si se usa para bombear agua, o acero inoxidable para bombear fluidos corrosivos.
- **Rodete:** Elemento para impulsar el agua de la carcasa, constituido por álabes de varias formas que rotan dentro de la carcasa circular, está unido al eje constituyendo la parte giratoria de la bomba.
- **Difusor:** Está encerrado en la carcasa junto con el rodete. Está constituido por álabes fijos divergentes; la velocidad del agua disminuye cuando crece la sección de la carcasa, logrando la conversión de la energía cinética en energía de presión, elevando la eficiencia de la bomba.
- **Eje:** Sostiene el rodete para que rote con el eje accionado por el motor.

- **Rodamientos:** Dispositivos que sirven de soporte al eje del rodete impulsor.
- **Conductos de entrada y salida:** Son las tuberías o conductos para circulación del agua, la de entrada es la tubería de aspiración y la de salida tubería de impulsión.
- **Motor eléctrico:** Es la parte fundamental de una electrobomba de agua, transforma la energía eléctrica en mecánica, este motor es usado por su bajo costo y facilidad de transporte, hace girar al eje y al rodete entregándoles energía para producir el movimiento del agua. Dependiendo de su potencia podría movilizar mayor o menor caudal de agua.
- **Panel de control:** Elemento de control para accionar la bomba centrífuga.

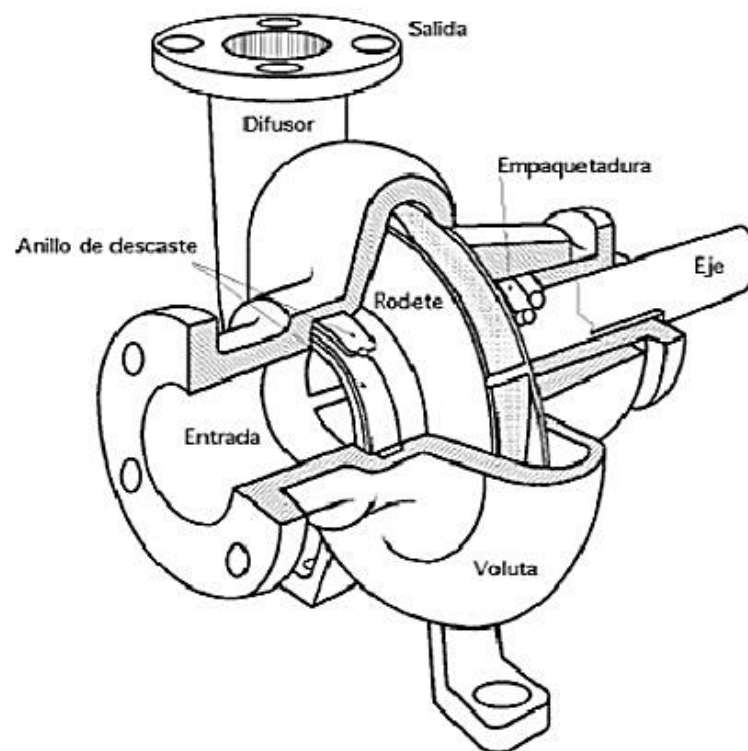


Figura 5: Partes de una bomba centrífuga.

Fuente: <https://www.seguas.com/bombas-centrifugas-instalaciones-hidraulicas/>

2.2.1.3. Ventajas de las bombas centrífugas

Las principales son:



- Mecanismos de acoplamiento sencillos y no tienen dispositivos articulados.
- El gasto es constante para un funcionamiento definido.
- Son bombas que se adecúan fácilmente a diversas circunstancias. Son versátiles.
- Son de dimensiones pequeñas y de poco peso.
- Poco mantenimiento preventivo.
- El acoplamiento de variadores de velocidad aumenta su eficiencia.
- Según las necesidades de bombeo están disponibles sistemas de bombeo integrales.
- Las bombas son baratas.

2.2.2. Fluidos

Un fluido es una materia que tiene la característica de fluir y no presenta rigidez ni elasticidad, debido a lo cual cualquier fuerza tiende a cambiar su forma y adopta la forma del recipiente que lo contiene. Los fluidos son líquidos o gases, dependiendo de la cohesión entre sus moléculas.

- **Líquidos:** Las partículas tienen movimiento libre porque las fuerzas intermoleculares lo permiten, tienen volumen constante y adquiere la forma del recipiente que lo contienen. Los líquidos son incompresibles y, ejercen presión sobre cuerpos sumergidos en el líquido y sobre las paredes del recipiente, llamada presión hidrostática.
- **Gases:** Tienen partículas en movimiento separadas que chocan unas con otras, no tienen forma ni volumen definido y tienden a tener el máximo volumen por lo que son expandibles. Los gases son compresibles, disminuye su volumen cuando se ejercen fuerzas sobre las paredes del recipiente que lo contienen.

Un fluido por la característica de su fluidez cambia de forma cuando se ejerce sobre él un esfuerzo cortante mínimo. En un sólido se produce un cambio fijo γ cuando se aplica una fuerza cortante.

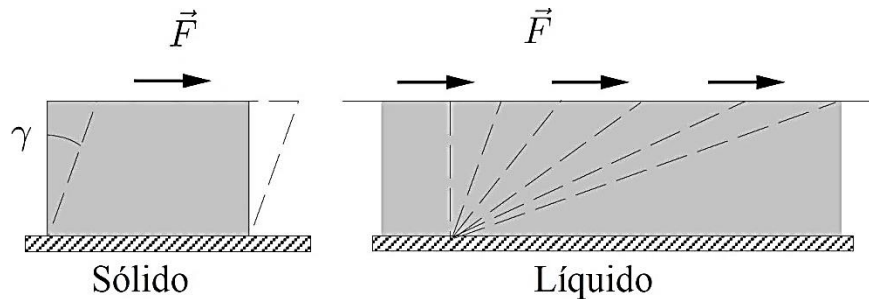


Figura 6: Diferencia entre el comportamiento de un líquido y de un sólido frente a una fuerza cortante aplicada.

Fuente: Martín, A. (2019). Apuntes de mecánica de Fluidos. Edit. Universidad Politécnica de Madrid.

2.2.2.1. Propiedades de los fluidos

- Densidad (δ)

La densidad de un fluido está definida como la masa por unidad de volumen. Si el fluido es homogéneo en cada punto la densidad es constante. En el sistema internacional su unidad es Kg/m^3 .

$$\delta = \frac{m}{V}$$

Donde: m : masa (Kg)

V : volumen (m^3)

δ : densidad (Kg/m^3)

- Peso específico (γ)

En un fluido se define el peso por unidad de volumen. En un fluido homogéneo el peso específico es constante. En el sistema internacional su unidad es N/m^3 .



$$\gamma = \frac{W}{V} = \frac{mg}{V}$$

Donde: W : peso (N)

m : masa (Kg)

g : aceleración de la gravedad (m/s^2)

V : volumen (m^3)

δ : densidad (Kg/m^3)

- **Volumen específico (v)**

El volumen específico de un fluido se define como el volumen por unidad de masa.

Para un fluido homogéneo es constante, en el sistema internacional su unidad es m^3/Kg . Es la inversa de su densidad correspondiente.

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\delta}$$

Donde: V : volumen (m^3)

m : masa (Kg)

v : volumen específico (m^3/Kg)

δ : densidad (Kg/m^3)

- **Viscosidad**

Se entiende como viscosidad la resistencia que opone un fluido al movimiento, análogo al rozamiento de los sólidos. En fluidos perfectos la viscosidad no se toma en cuenta, en fluidos viscosos o reales se toma en cuenta.

- **Viscosidad cinemática (ν)**

Se define como la relación existente entre la viscosidad dinámica y la densidad del fluido respectivo.



$$v = \frac{\mu}{\delta}$$

Donde: μ : viscosidad dinámica (N-s/m²)

δ : densidad (Kg/m³)

v : viscosidad cinemática (m²/s)

- **Viscosidad dinámica (μ)**

Es la que posee un fluido en movimiento debido a un esfuerzo cortante, definido por la viscosidad de Newton.

$$\mu = v \cdot \delta$$

En el sistema internacional su unidad es Pa-s.

- **Presión (P)**

La presión en un punto de un fluido se define como la fuerza por unidad de área, en el sistema internacional la unidad es Pa (Pascal). En un fluido real o viscoso aparecen fuerzas tangenciales de rozamiento.

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

Donde:

F : fuerza (N)

A : área o superficie (m²)

P : presión (N/m² = Pa)

- **Compresibilidad**

En los fluidos está determinado por un coeficiente de compresibilidad K , que se define como la disminución del volumen sobre la unidad de crecimiento de la presión. En el sistema internacional su unidad de m²/N.



$$k = \frac{1}{v} \frac{dV}{dP}$$

2.2.3. Conceptos importantes ¹

2.2.3.1. Caudal (Q)

El caudal se le define como volumen de fluido o flujo volumétrico que circula por una superficie específica por cada unidad de tiempo. En el sistema internacional su unidad es m^3/s .

$$Q = v \cdot A$$

Donde:

v : velocidad (m/s)

A : área (m^2)

Q : caudal (m^3/s)

2.2.3.2. Presión atmosférica (P_{atm})

La tierra está rodeada por el aire que es una masa gaseosa que tiene peso, el cual actúa sobre cualquier punto de la tierra y a la presión que ejerce se le denomina presión atmosférica.

2.2.3.3. Presión manométrica (P_{man})

Es la presión medida con instrumentos llamados manómetros, cuya medición de la presión lo hacen con respecto a la presión atmosférica.

¹ Mott, R. (2019): Mecánica de fluidos aplicada. Edit. Prentice Hall.

2.2.3.4. Presión absoluta (P_{abs})

La presión absoluta se la define como la presión medida con respecto del vacío absoluto. Por consiguiente, la presión absoluta es igual a la suma de la presión manométrica más la presión atmosférica.

$$P_{abs} = P_{man} + P_{atm}$$

La relación entre dichas presiones se puede analizar en la siguiente figura.

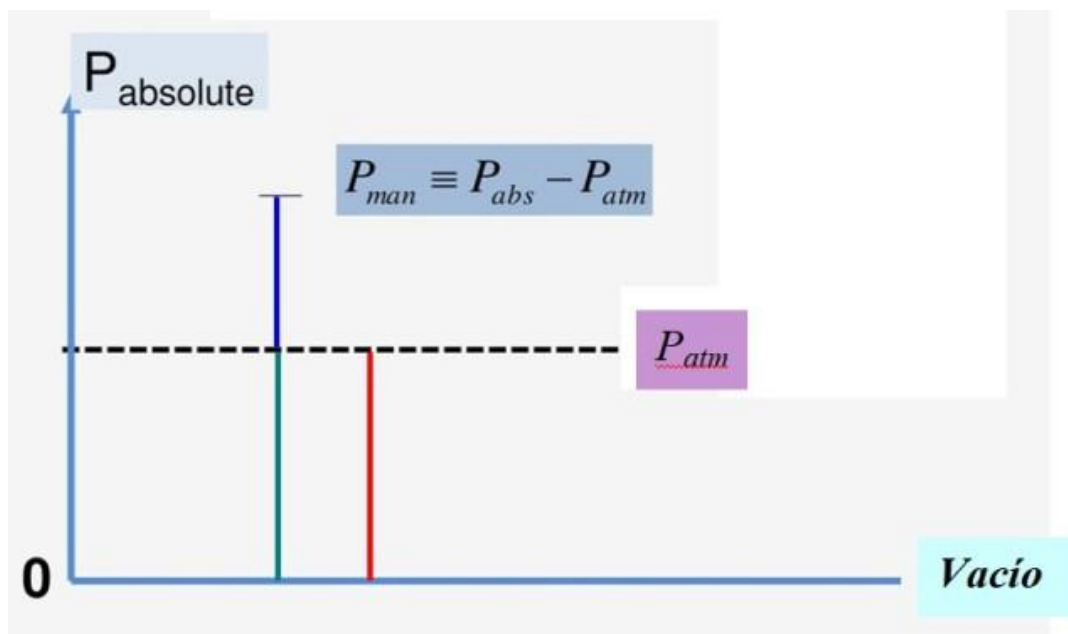


Figura 7: Relación entre las presiones manométrica, atmosférica y absoluta.

Elaborado por el equipo de trabajo

2.2.3.5. Ecuación de continuidad

Si un fluido es incompresible la masa total que circula por un conducto y si no existe pérdidas ni ganancias, permanece constante. Es decir, la masa permanece constante mientras el fluido circula y también la densidad es constante durante el flujo.

La ecuación de la continuidad es:

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$$

Donde: v_1 y v_2 : velocidad del fluido en dos secciones de un conducto.

A_1 y A_2 : áreas respectivas.

Al producto de la velocidad por el área de la sección transversal se le denomina caudal, por lo que la ecuación de continuidad implica que el caudal es constante.

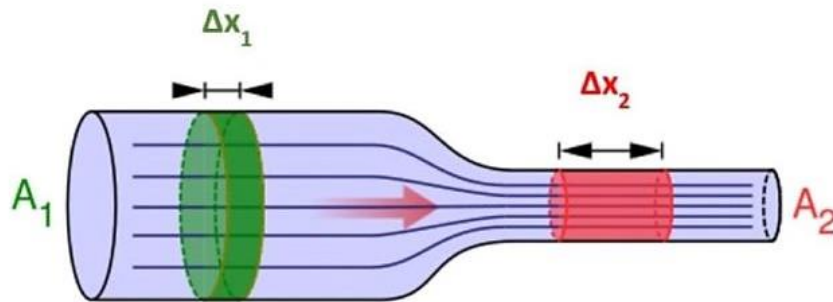


Figura 8: Imagen para demostración de la ecuación de continuidad.

Fuente: <https://www.lifeder.com/ecuacion-de-continuidad/>

Se sabe que la densidad es igual a:

$$\delta = \frac{m}{V}$$

Entonces la masa Δm , es igual a:

$$\Delta m_1 = \delta \cdot V_1$$

Donde de la figura 2.8, el $V_1 = A_1 \cdot \Delta x_1$

entonces $\Delta m_1 = \delta(A_1 \cdot \Delta x_1)$, pero dado que la velocidad es igual a:

$$v_1 = \frac{\Delta x_1}{\Delta t}$$

Δm_1 se puede escribir como:

$$\Delta m_1 = \delta \cdot A_1 \cdot \Delta x_1 = \delta \cdot A_1 \cdot (v_1 \cdot \Delta t)$$



Análogamente en la sección 2:

$$\Delta m_2 = \delta \cdot A_2 \cdot \Delta x_2 = \delta \cdot A_2 \cdot (v_2 \cdot \Delta t)$$

Por conservación de la masa:

$$\Delta m_1 = \Delta m_2$$

$$\delta \cdot A_1 \cdot \Delta x_1 = \delta \cdot A_2 \cdot \Delta x_2$$

Por consiguiente:

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2$$

2.2.3.6. Ecuación de Bernoulli

La ecuación de Bernoulli relaciona las variaciones de presión con las variaciones de velocidad y la altura considerando que ocurre a lo largo de cualquier línea de corriente, siendo en la práctica una ecuación útil y eficiente. Solo se aplica si el flujo es estable, incompresible, sin fricción y en toda la longitud de una línea de corriente:

$$\frac{\rho}{\gamma} + \frac{v^2}{2g} + Z = \text{Constante}$$

La ecuación usualmente se aplica entre dos puntos sobre una línea de corriente, considerando las restricciones:

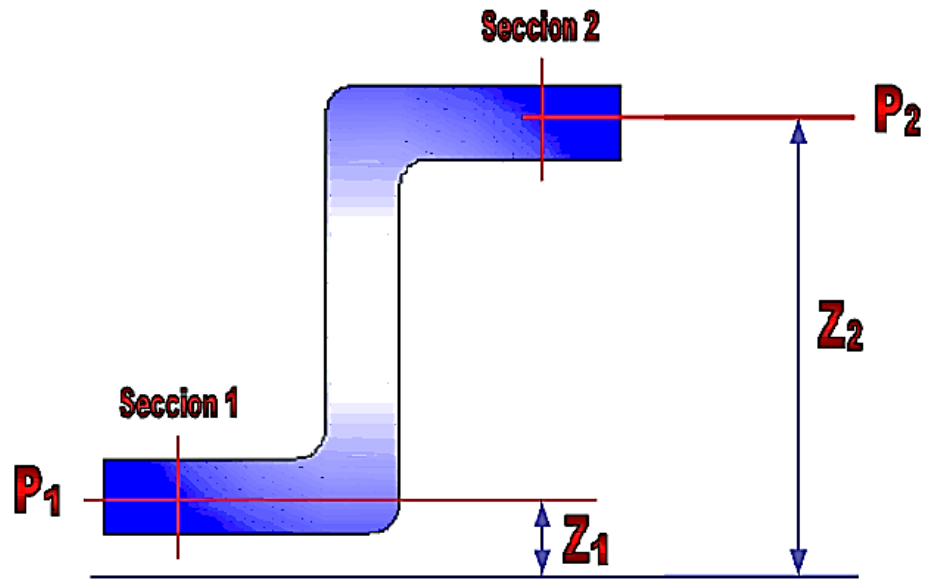


Figura 9: Esquema de una línea de corriente donde se aplica la ecuación de Bernoulli

Fuente: http://www.unet.edu.ve/~fenomeno/F_DE_T-76.htm

Al aplicar la ecuación de Bernoulli entre los puntos 1 y 2 obtenemos:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2$$

Donde: $P_1; P_2$: presiones

$v_1; v_2$: velocidades

$Z_1; Z_2$: alturas

g : aceleración de la gravedad

γ : peso específico

2.2.3.7. Distribución de velocidad en tuberías

La velocidad del flujo de agua a través de una tubería varía en cada punto de la sección transversal, la velocidad no tiene distribución uniforme por la influencia importante que tienen la viscosidad del fluido, la rugosidad de la tubería, la fricción entre las moléculas del fluido y la turbulencia en el desplazamiento de los fluidos. En el flujo

laminar la distribución seguirá una ley de variación parabólica, la velocidad máxima se presenta en el eje de la tubería.

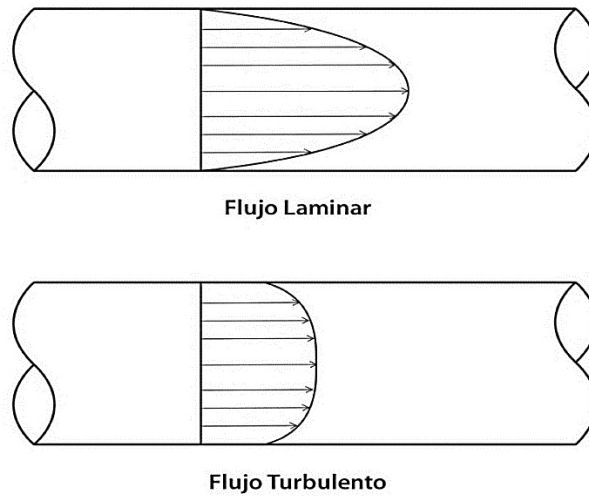


Figura 10: Distribución de velocidades en flujo laminar y turbulento.

Fuente: <https://es.scribd.com/document/413009729/Distribucion-de-Velocidad-en-Tuberias-Hidraulica#>

2.2.3.8. Flujo Laminar

El flujo laminar es un flujo uniforme y lento, el cual parece que fluye en varias capas, en forma uniforme y de manera regular; en el flujo laminar las líneas de corriente no se atraviesan entre sí.

2.2.3.9. Flujo Turbulento

El flujo turbulento es de movimiento rápido y de manera caótica, existiendo mucha mezcla del fluido, lo que tiene aplicaciones en la mezcla de fluidos, en reacciones químicas y para lograr el aumento de transferencia de calor de un fluido a otro; una característica de estos flujos es la formación de remolinos, lo que determina que entre las líneas de corriente se mezclen.



2.2.3.10. Número de Reynolds

Las pérdidas de energía en el comportamiento de un fluido, depende si es flujo laminar o turbulento. Osborne Reynolds demostró que se puede predecir si un fluido es laminar o turbulento, si se conoce un número adimensional que lleva su nombre, número de Reynolds (N_R).

$$N_R = \frac{v \cdot D \cdot \rho}{\mu} = \frac{v \cdot D}{\nu}$$

Donde: v : velocidad del fluido

D : diámetro de la tubería

ρ : densidad del fluido

μ : viscosidad dinámica

ν : viscosidad cinemática

Si un flujo tiene:

- $N_R < 2000$: flujo laminar
- $2000 < N_R < 4000$: zona de transición de laminar a turbulento
- $N_R > 4000$: flujo turbulento

2.2.3.11. Pérdidas primarias

Las pérdidas primarias en tuberías son la energía que se pierde por fricción en conductos, tuberías y dispositivos, que hacen que disminuya la presión entre dos puntos del sistema hidráulico. La ecuación de Darcy permite calcular las pérdidas primarias, a través de la siguiente expresión:

$$h_p = \lambda \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$



Donde: λ : factor de fricción

L : longitud de tubería

D : diámetro interno de la tubería

v : velocidad media del fluido

g : aceleración de la gravedad

h_p : pérdidas primarias

La expresión sirve para calcular pérdidas en flujo laminar y turbulento; lo que varía es el factor de fricción adimensional λ .

2.2.3.12. Diagrama de Moody

El diagrama de Moody nos permite determinar el factor de fricción adimensional λ , en la figura 2.11. Se observa que λ está graficado respecto al número de Reynolds (N_R), con un conjunto de curvas de la rugosidad relativa (D/ϵ); los datos básicos necesarios son el diámetro interno de la tubería (D), material de la tubería, velocidad (v) y temperatura del ambiente para determinar la viscosidad cinemática.

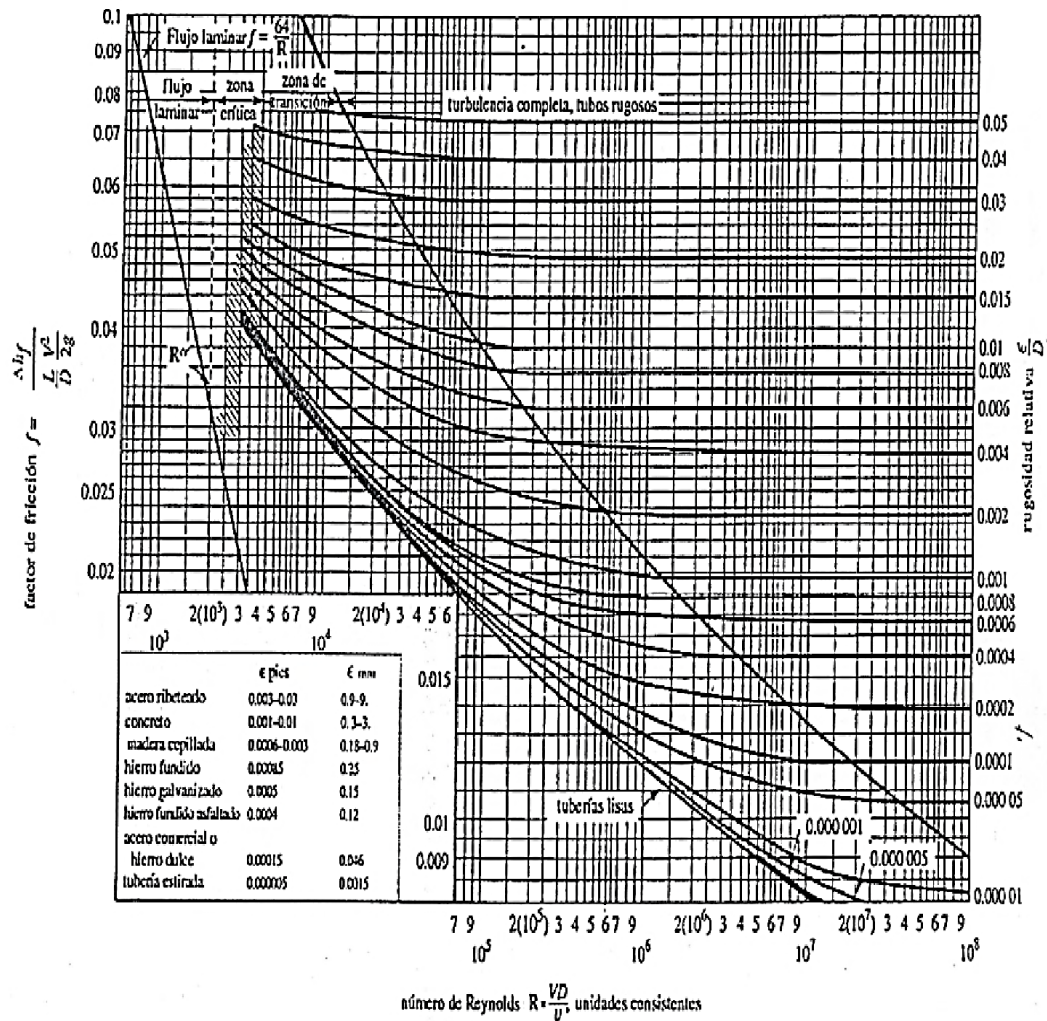


Figura 11: Diagrama de Moody

Fuente: Moot, R. (2018). Mecánica de fluidos. Madrid. Editorial Prentice Hall Hispanoamericana.

2.2.3.13. Pérdidas secundarias

En los sistemas hidráulicos las pérdidas primarias ocurren por fricción en las tuberías, las pérdidas secundarias son menores en comparación con las primarias y se producen por cambios en la sección transversal de la trayectoria del fluido, o por obstrucción de la misma, como en las válvulas. La pérdida de energía se produce por fenómenos físicos complejos y su cuantificación es compleja también. Las magnitudes experimentales de pérdida de energía se cuantifican utilizando coeficientes de resistencia (K) de dispositivos hidráulicos.

$$h_s = K \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Donde: K : coeficiente de resistencia

v : velocidad media del fluido

g : aceleración de la gravedad

h_s : pérdidas secundarias

2.2.3.14. Altura manométrica o útil (H_m)

La altura manométrica de una bomba se define como la altura teórica menos las pérdidas de energía que se generan en el interior de la bomba.

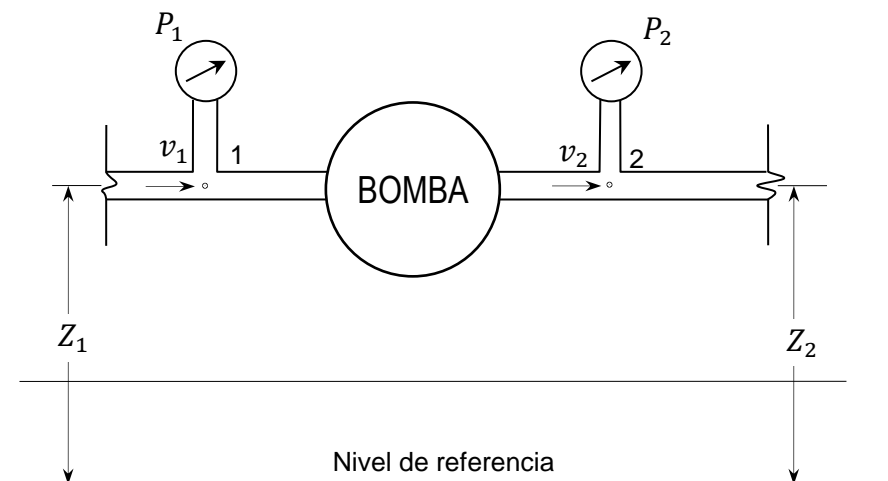


Figura 12: Esquema del circuito hidráulico

Elaborado por el equipo de trabajo

En la figura 12, aplicamos la ecuación de Bernoulli en las secciones 1 y 2 del circuito, obteniendo:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 + H_m = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2$$

Operando:



$$H_m = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + Z_2 - Z_1$$

Donde: $P_2; P_1$: presiones en las secciones 1 y 2

$v_2; v_1$: velocidades en las secciones 1 y 2

$Z_2; Z_1$: alturas geodésicas en las secciones 1 y 2

γ : peso específico

g : aceleración de la gravedad

H_m : altura manométrica

En la expresión de la altura manométrica, si las tuberías de aspiración e impulsión tienen igual diámetro el término $(v_2^2 - v_1^2)/2$ es igual a cero y el término $(Z_2 - Z_1)$ es igual a cero.

Por consiguiente, la altura manométrica queda reducida a:

$$H_m = \frac{P_2 - P_1}{\gamma}$$

Expresión útil para calcular la altura manométrica (H_m) en una bomba en operación o funcionamiento.

2.2.4. Parámetros fundamentales de bombas

2.2.4.1. Altura de carga (H)

La altura de carga es la columna de agua que actúa en su base, ejerciendo una expresión P :

Entonces:

$$H = \frac{P}{\gamma}$$

Donde: P : presión del agua

γ : peso específico del agua

H : altura de carga

2.2.4.2. Altura de carga de posición

La altura de carga de posición de un sistema hidráulico de una bomba; es la altura de un punto de referencia con respecto a un nivel de referencia.

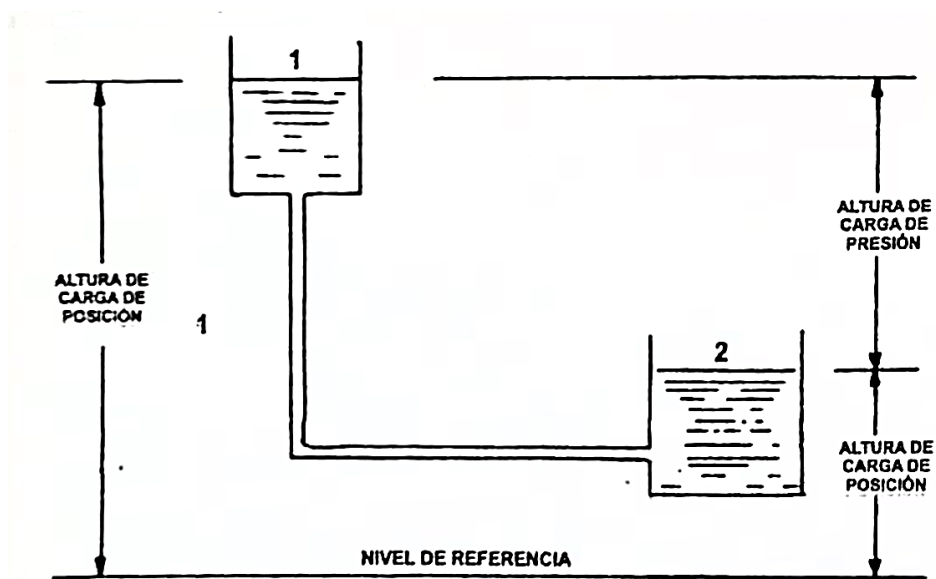


Figura 13: Altura de carga de posición

Elaborado por el equipo de trabajo.

2.2.4.3. Altura de velocidad (h)

La altura de velocidad es la energía de agua que es referida a la velocidad de agua que se define en términos de unidad de altura.

$$h = \frac{v^2}{2g}$$

Donde: v : velocidad del agua

g : aceleración de la gravedad

h : altura de velocidad

2.2.4.4. Altura de carga estática

Las alturas de carga estática de un sistema hidráulico de una bomba se observan en la figura siguiente.

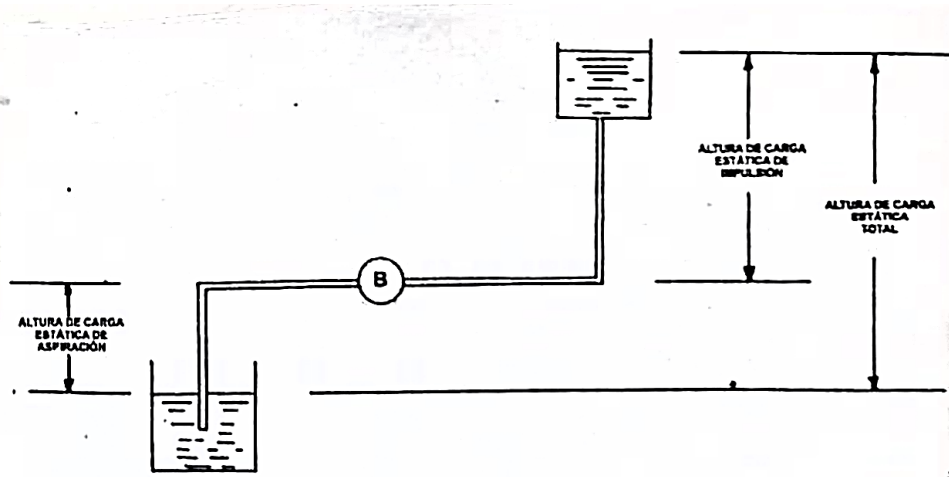


Figura 14: Alturas de carga estática

Elaborado por el equipo de trabajo.

2.2.4.5. Altura efectiva de la bomba (H)

La altura efectiva o manométrica también puede ser definida por medio de la determinación de la altura del sistema.

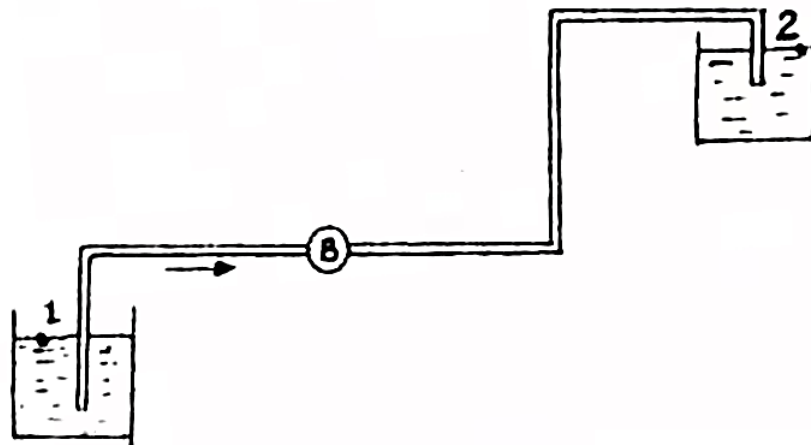


Figura 15: Gráfico para determinar la altura efectiva.

Elaborado por el equipo de trabajo

Aplicando en el gráfico la ecuación de Bernoulli entre los puntos 1 y 2 se obtiene:

$$H = H_{sist} = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + Z_2 - Z_1 + \sum h_p$$

En la expresión anterior la suma de las pérdidas en la tubería de aspiración con las pérdidas en la tubería de impulsión está expresada por el término $\sum h_p$.

2.2.5. Curvas de funcionamiento de una bomba

2.2.5.1. Curva característica H-Q

La curva característica H-Q permite analizar a través de ella el comportamiento de la bomba, podemos determinar en el gráfico la altura de presión que le corresponde a un caudal cualesquiera.

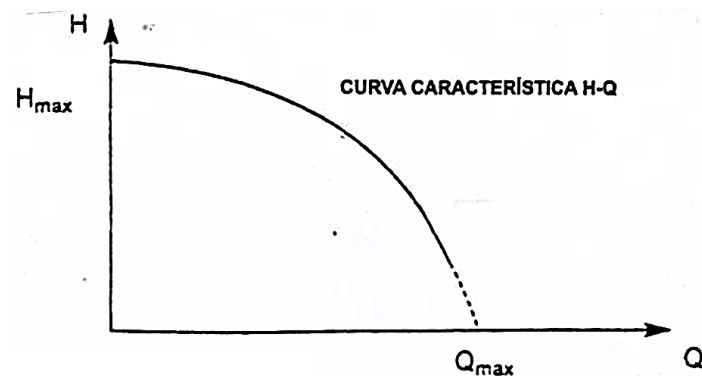


Figura 16: Curva característica de una bomba.

Elaborado por el equipo de trabajo.

Donde:

H : altura de presión de la bomba

Q : Caudal del agua

2.2.5.2. Curva del sistema de tuberías

En la curva del sistema del gráfico H_0 es la altura del nivel inferior del agua y la curva parabólica está determinada por la suma de pérdidas primarias y secundarias en el sistema hidráulico de la bomba.

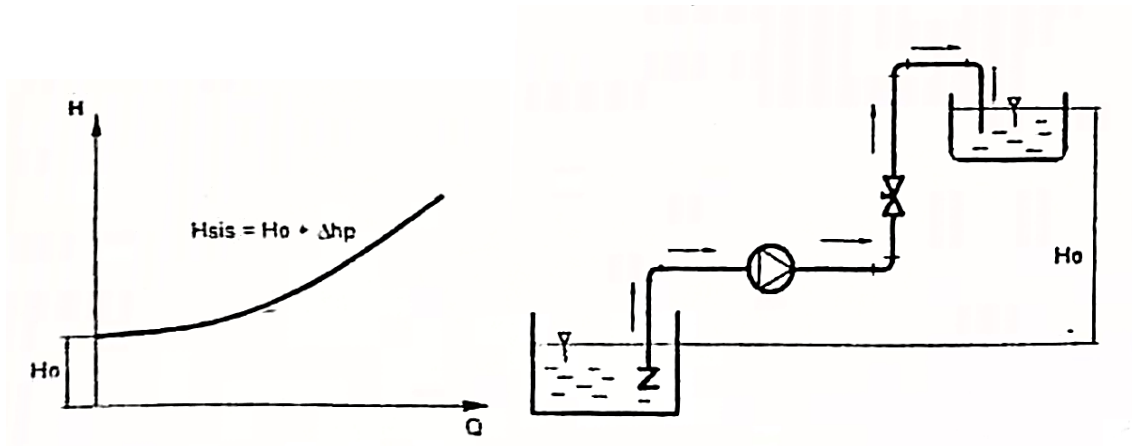


Figura 17. Curva del sistema de tuberías

Fuente: Goñi, J. (2020). Máquinas hidráulicas y térmicas. Editorial Universidad de Lima.

La curva del sistema se determina sumando a la altura geodésica (H_0) la suma de pérdidas primarias y secundarias.

En la figura 2.17:

$$H_{sis} = H_0 + \Delta h_p$$

Donde:

H_0 : altura geodésica

Δh_p : pérdidas primarias y secundarias

Q : Caudal del agua

H_{sis} : altura de sistema

2.2.5.3. Punto óptimo de funcionamiento de una bomba

Cuando una bomba está en operación, debe hacerlo bajo las mejores condiciones de trabajo en cuanto se refiere al caudal (Q) y la altura efectiva (H), para proporcionar un funcionamiento óptimo al sistema hidráulico de tuberías y de esa manera brindar protección a la vida útil de la bomba.

Para determinar el punto óptimo de funcionamiento de la bomba (PF) se interseca la curva característica H-Q con la curva del sistema de tuberías, cumpliéndose en el punto $H = H_{sis} = H_B = H_{PF}$, correspondiente al caudal correspondiente $Q = Q_o$.

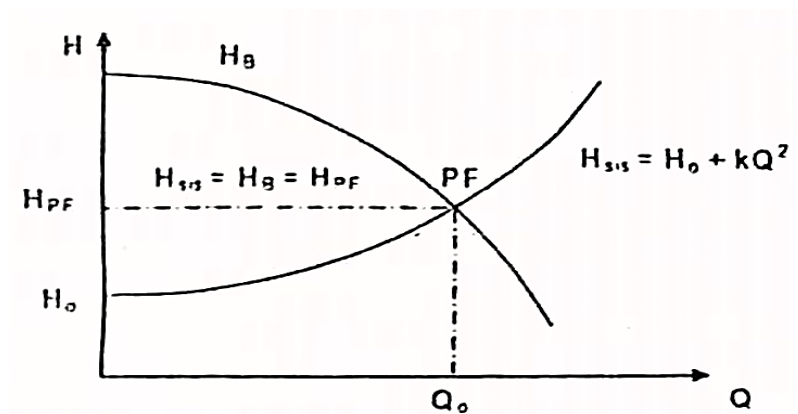


Figura 18: Punto óptimo de funcionamiento de una bomba.

Fuente: Goñi, J. (2020). Máquinas hidráulicas y térmicas. Editorial Universidad de Lima.

2.2.5.4. Potencia hidráulica de un fluido (P_h)

La energía necesaria que debe poseer un fluido para que pueda ser transportado en el tiempo se la denomina potencia hidráulica. Su ecuación para su cálculo es:

$$P_h = \gamma \cdot Q \cdot H$$

Donde: γ : peso específico del fluido

Q : Caudal

H : alturas del fluido

P_h : potencia hidráulica

2.2.6. Potencia de una bomba (P_B)

La potencia de una bomba (P_B) es la que genera la máquina en su eje, por lo que se le denomina potencia al eje. Se calcula considerando la potencia hidráulica, la que disminuye por las pérdidas internas de la bomba y la que se la considera en la eficiencia hidráulica (η_h); por consiguiente:

$$P_B = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{\eta_h}$$

Donde la eficiencia hidráulica η_h está en el rango de 0,6 – 0,8.

2.2.7. Instrumentos y dispositivos

2.2.7.1. Manómetros

Un manómetro funciona por una diferencia entre la presión exterior e interior de un tubo de metal curvado que tiene una sección elíptica el cual se deforma mecánicamente bajo la presión, provocando la deflexión en el extremo libre que es proporcional a la magnitud de la diferencia de presión. El tubo tiene forma en C o espiral sobre el cual actúa la atmósfera, colocado en el interior de una caja sellada. Un manómetro muy usado es el de tipo Bourdon, para ambientes de trabajo que sean corrosivos, el manómetro se llena de glicerina la caja de acero inoxidable. El manómetro de tipo Bourdon lleno de glicerina se puede observar en la Figura 2.19.



Figura 19: Manómetro de Bourdon

Fuente: <https://www.bloginstrumentacion.com/productos/presion/manmetro-de-glicerina-ventajas-y-aplicaciones/>

2.2.7.2. Vacuómetro

En el funcionamiento de una bomba en la tubería de aspiración se presentan presiones inferiores a la presión atmosférica, por lo que utilizan manómetros denominados vacuómetro como los tipo Bourdon graduados desde presiones negativas hasta la presión cero. El diseño de la marca respectiva, gradúan presiones de vacío o negativas desde 0,001 a 100 mbar o desde 0,000001 hasta 10^{-9} mbar.

Los vacuómetros se utilizan en el sector industrial y en la investigación técnica.

Se observa un vacuómetro con glicerina en la Figura 2.20 siguiente:



Figura 20: Manómetro de Bourdon

Fuente: <https://articulo.mercadolibre.com.pe/MPE-447889552-vacuometro-con-punzon-para-alimentos>

2.2.7.3. Rotámetro

Para medir en forma directa el caudal que circula en una tubería el instrumento que se utiliza es rotámetro, que mide caudales de líquidos. Es un instrumento que funciona aplicando el principio de cuerpo en suspensión. Consta de un tubo de forma cónica de plástico graduado con unidades de volumen, en cuyo interior se encuentra un cuerpo en suspensión es levantado por la inercia de movimiento del agua o fluido, la altura de suspensión es la lectura que marca el rotámetro en la escala graduada. Si aumenta el caudal el cuerpo en suspensión del rotámetro sube y aumenta la superficie de contacto entre el cuerpo y el tubo de vidrio. El nivel de cuerpo en suspensión da como lectura la medida del caudal en la escala del rotámetro, como se muestra en la figura 2.21.

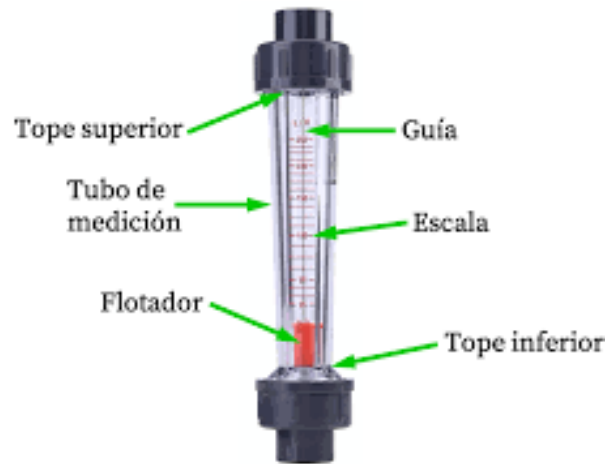


Figura 21: Rotámetro – partes

Fuente: <https://www.google.com/imgres?imgurl=https%3A%2F%2F> (partes del rotámetro)

2.2.7.4. Válvula de compuerta

La válvula de compuerta se usa para controlar fluidos con trayectoria lineal, para restricción mínima del caudal, estas válvulas deben su nombre a que la parte que restringe el caudal es una compuerta, la que puede ser de paso completo o de cierta restricción, lo que provoca pequeña pérdida de presión. Una característica de las válvulas de compuerta es que tienen un sello, a través del asiento de un disco que separa dos secciones distribuidas.



Figura 22: Válvula de compuerta

Fuente: <https://www.google.com/imgres?imgurl=https://promart.vteximg.com.br/>

2.2.7.5. Válvula de globo

Las válvulas de globo tienen la función o permiten la regulación de un fluido a través de un pistón que sube o baja estrangulando el fluido que pasa, ofreciendo un cierre hermético considerando que el asiento del pistón es flexible. Estas válvulas se utilizan en líneas de fluidos donde es necesario que se produzcan caídas de presión elevadas por las características del proceso.

Las válvulas de globo se producen por forja o fundición en bronce, acero carbono, acero inoxidable, hierro.



Figura 23: Válvula de globo

Fuente: <https://www.google.com/imgres?imgurl=https://mlieirnflyeq.i.optimole.com>

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES

En principio los materiales a emplear en el proyecto de investigación estarán en función a las características geométricas y técnicas del módulo didáctico de laboratorio a diseñar considerando que debe cumplir el objetivo de ser para un proceso de enseñanza y aprendizaje óptimo y eficaz de los docentes y alumnos de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica Eléctrica.

El módulo de laboratorio didáctico para una enseñanza pedagógica, será diseñado considerando que se adecúe a los esquemas gráficos existentes en casi todos los libros para el estudio teórico de una bomba, basado en la función de esta máquina en transportar un fluido desde un nivel inferior a un nivel superior ubicado a una altura significativa con respecto a un nivel de referencia como el suelo.

El diseño geométrico existente en los libros para la enseñanza teórica del funcionamiento de una bomba es el que se muestra en la figura siguiente:

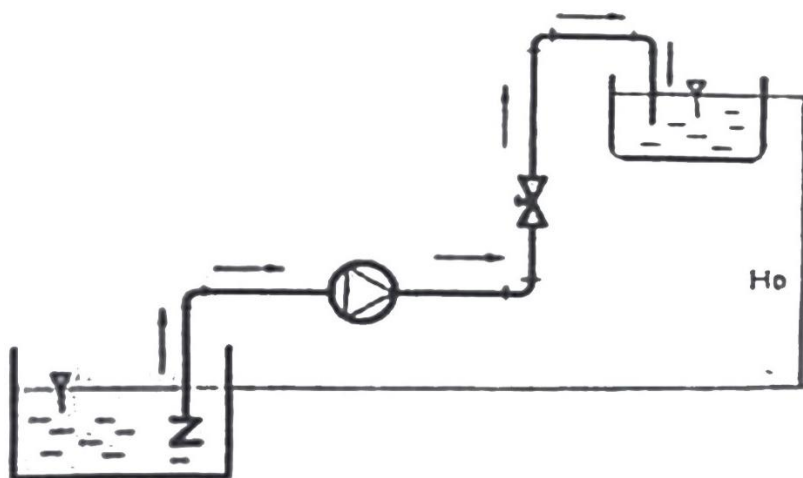


Figura 24: Esquema gráfico del sistema hidráulico de una bomba.

Elaborado por el equipo de trabajo.

En la figura 24 el esquema gráfico existente en los libros se presta para una buena enseñanza didáctica – pedagógica de los docentes y un aprendizaje y comprensión fácil por parte de los estudiantes; porque en el gráfico se aprecia la función que cumple la bomba en un sistema hidráulico.

Considerando las apreciaciones anteriores respecto a la enseñanza teórica, ésta debe concordar con la experimentación práctica del funcionamiento de una bomba en el laboratorio, lo cual no sucede porque los módulos de laboratorio que venden las empresas que se dedican a este rubro, no coinciden con los esquemas teóricos utilizados en los libros para la enseñanza del funcionamiento de una bomba, porque por consideraciones comerciales y de transporte de la fábrica en el extranjero al país, son módulos compactos que no sean de gran volumen; en el caso particular del módulo para el estudio de una bomba, solamente presentan un depósito para el agua, la que se recicla durante el funcionamiento. Siendo lógico que presenta una distorsión con respecto a la enseñanza teórica del funcionamiento de una bomba, porque en principio el estudiante no aprecia el objetivo que tiene una bomba, ni tampoco se puede observar en el módulo compacto de un solo depósito para el agua en forma real a práctica parámetros geométricos importantes que se enseñan en la teoría relacionados con el funcionamiento de una bomba. En la siguiente figura se aprecian parámetros geométricos en la instalación hidráulica de una bomba, que es importante identificarlos cuando se está experimentando en un módulo de laboratorio al funcionamiento de una bomba.

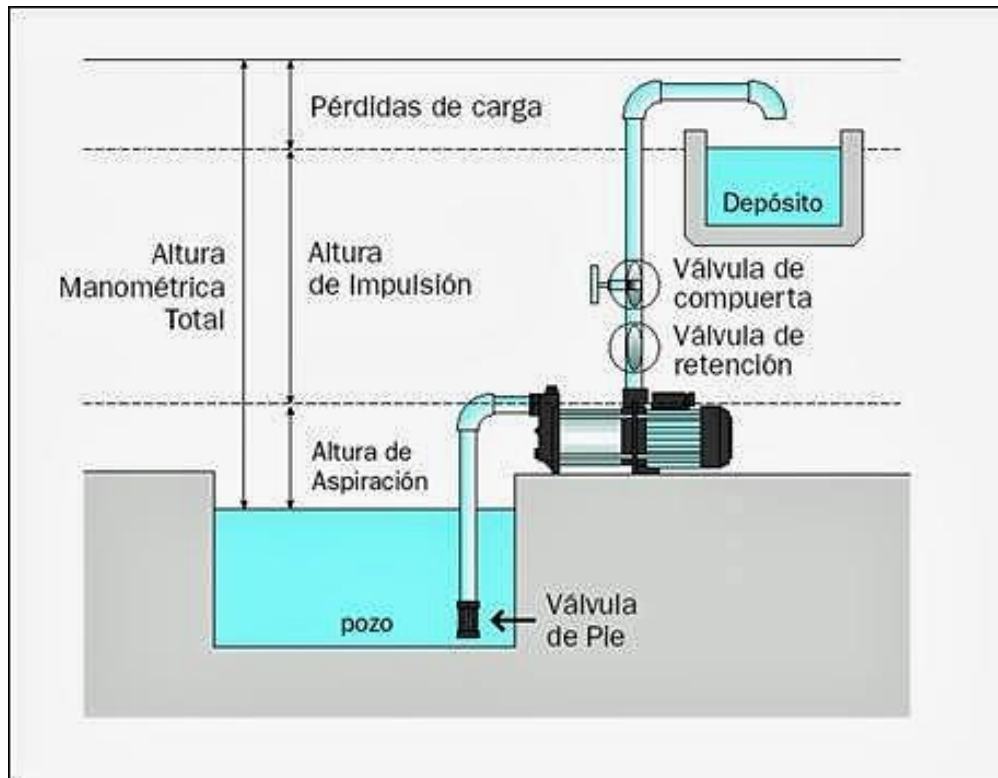


Figura 25: Parámetros geométricos del sistema hidráulico de una bomba.

Fuente: <https://www.google.com/imgres?imgurl=http://1.bp.blogspot.com/>

El módulo a diseñar tendrá las características de la Figura 25 para que el aprendizaje experimental contribuya a reforzar y contrastar la teoría con la práctica, importante para un aprendizaje integral por parte de los estudiantes. Analizando por ejemplo los cálculos experimentales, que se podrán realizar en el módulo a diseñar, se podrá graficar la curva del sistema, para lo cual un importante parámetro es la altura geodésica que es igual a la suma de la altura de aspiración con la altura de impulsión; alturas que no se pueden visualizar en un módulo de fábrica por tener un solo depósito para el agua y, de igual manera con los otros parámetros geométricos. En ese contexto y analizando en primer lugar las consideraciones didácticas y pedagógicas con respecto a las características que debe tener el módulo a diseñar y, en función a las cuales se decidieron las consideraciones técnicas y geométricas del módulo de laboratorio. El módulo de laboratorio para la determinación de parámetros de funcionamiento de una bomba hidráulica centrífuga, tendrá el siguiente sistema hidráulico cuyo esquema se muestra en la siguiente figura:

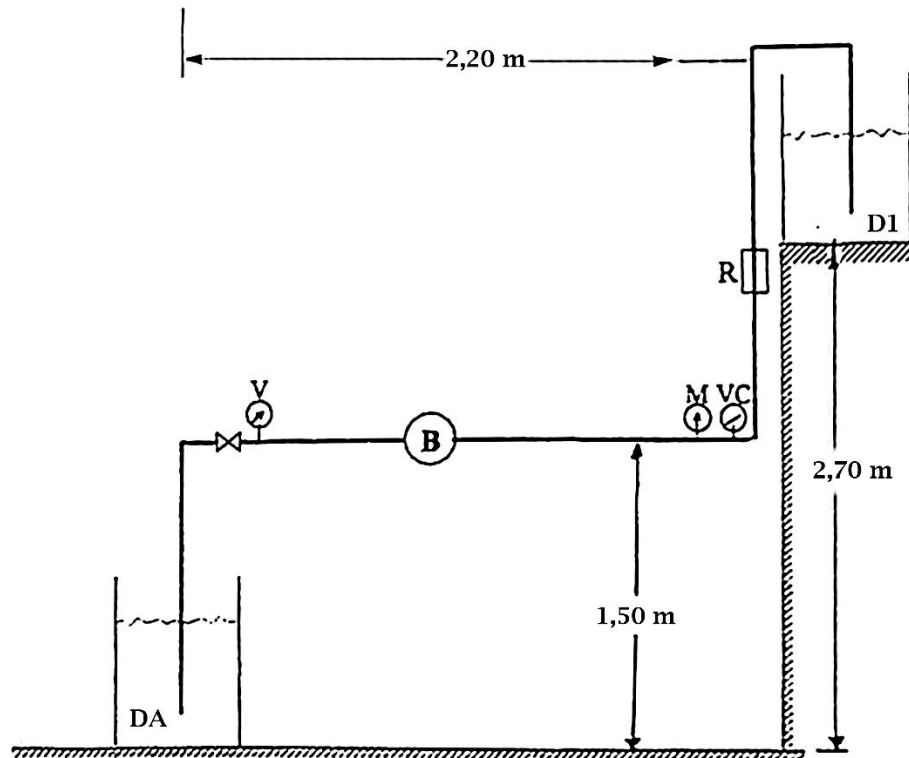


Figura 26: Esquema del sistema hidráulico del módulo de laboratorio diseñado.

Elaborado por el equipo de trabajo

Donde:

DA : depósito de aspiración

V: vacuómetro

B : bomba

M : manómetro

VC : válvula de compuerta

R : rotámetro

D1 : depósito de impulsión

En función a la Figura 26, que muestra el sistema hidráulico de la bomba, del módulo que se diseñó en el proyecto de investigación, se empleará para su construcción los siguientes materiales:

- 1 bomba hidráulica centrífuga: marca MEBA

Potencia : 0,5 HP

Caudal máximo : 35 L/min



- Altura de elevación máxima : 32 m
- Motor : 220 V – 60 Hz – 3450 min⁻¹
- 1 vacuómetro: marca WEIZZ
- Rango de medición : -1 a 0 bar
- 1 manómetro: marca WEIZZ
- Rango de medición : 0 – 2,6 bar
- 1 rotámetro
- Rango de medición : 0 – 30 L/min
- 1 depósito de aspiración
- Volumen : 450 L
- 1 depósito de impulsión
- Volumen : 450 L
- 2 válvulas de globo
- Presión mínima : 0,5 bar
- 1 válvula de compuerta
- Caudal mínimo : 360 L/s
- 10 codos de 1 pulgada
- 4 reductores de diámetro de ½" pulgada a 1 pulgada
- 2 tuberías de PVC de 1 pulgada

3.2. MÉTODOS

Las bombas hidráulicas centrífugas debido a su funcionamiento durante su vida sufren un proceso de degradación por varias causas lógicas como el desgaste, variación de propiedades del fluido que transportan por las condiciones de operación, ensuciamiento del ambiente de trabajo. En ese contexto el personal de supervisar la operación, mantenimiento y confiabilidad del sistema hidráulico, es necesario que



realicen un monitoreo constante de los parámetros de funcionamiento de las bombas, para analizar y evaluar si están en los rangos especificados, prevenir posibles fallas y, si la bomba está operando de acuerdo a sus funciones establecidas y si son compatibles con los objetivos de seguridad industrial, ambiental, de energía, de funcionamiento y de mantenimiento.

Los parámetros de funcionamiento de una bomba son fundamentales para realizar la selección óptima de una bomba.

Es importante analizar e interpretar adecuadamente las curvas características de una bomba; en la operación de una bomba se presentan muchos problemas de diferente índole, que deben ser resueltos óptimamente, para lo cual se debe conocer en forma precisa si la bomba está operando de acuerdo a sus parámetros de funcionamiento. El módulo diseñado nos permitirá determinar las curvas de la bomba, el módulo estará equipado con los instrumentos y dispositivos necesarios para realizar las mediciones de las presiones de aspiración y la presión de impulsión de la bomba, se debe decidir la metodología para medir el caudal que proporciona la bomba, como también la altura manométrica de la bomba.

3.2.1. Método para medir el caudal

Para medir el caudal que circula por el sistema hidráulico impulsado por la bomba, se puede realizar de dos maneras:

- **Medición directa:** el caudal que circula por las tuberías del sistema hidráulico se realiza por lectura directa en un instrumento denominado Rotámetro para lo cual se realiza su montaje en la tubería donde se quiere medir el caudal.



Figura 27: Montaje de un rotámetro

Fuente: <https://rotametros.mx/>

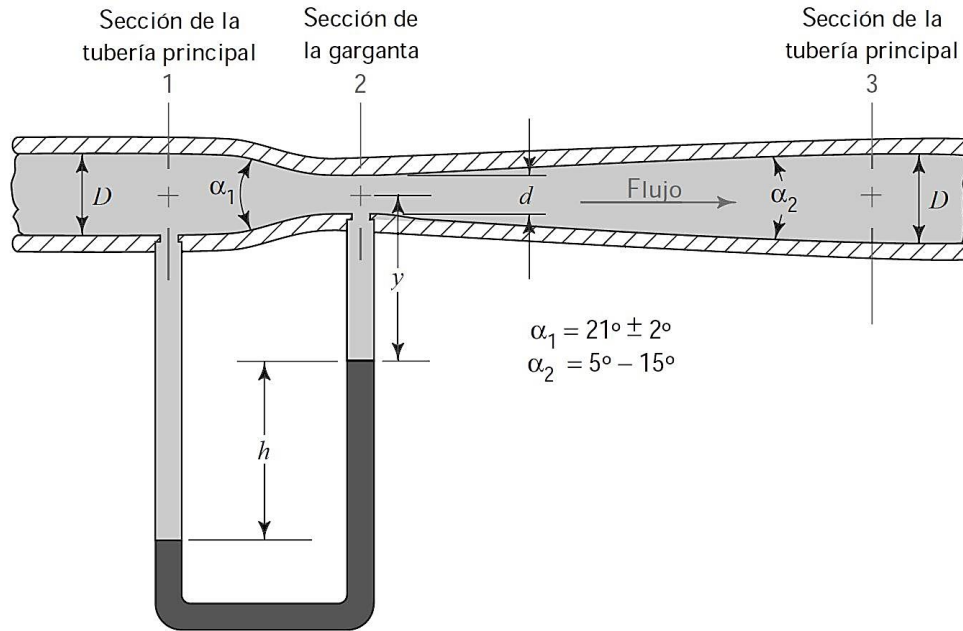
- **Medición indirecta:** El método de medición indirecta del caudal se presta para ser utilizado en un ambiente académico como es la universidad. Es necesario utilizar el tubo Venturi o venturímetro que junto con su manómetro diferencial es montado en la tubería donde se quiere determinar el caudal; es un medidor que se basa en la presión diferencial para determinar la velocidad del fluido que multiplicada por el área de la tubería da como resultado el caudal respectivo.

Aplicando la ecuación de Bernoulli y la ecuación de continuidad se puede determinar la relación que nos permite calcular la velocidad del fluido.

En la figura 3.5, aplicando en las secciones 1 y 2 las ecuaciones de Bernoulli y continuidad obtenemos:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 \quad (1)$$

$$Q = A_1 v_1 = A_2 v_2 \quad (2)$$



(b) Detalles del diseño estándar

Figura 28: Venturímetro con manómetro diferencial

Fuente: Mott, R. (2015). Mecánica de fluidos aplicada, México. Editorial Prentice –

Hall Hispanoamericana, S.A.

Las ecuaciones (1) y (2) son válidas por ser el agua un fluido incompresible y, son teóricas por no considerar pérdidas. Resolviendo las ecuaciones se tiene:

$$v_2 = \sqrt{\frac{2g[(P_1 - P_2)/\gamma + (Z_1 - Z_2)]}{1 - (A_2/A_1)^2}} \quad (3)$$

Realizando simplificaciones, las secciones 1 y 2 tienen la misma altura de elevación, por lo tanto $Z_1 = Z_2$, en general $(Z_1 - Z_2)$ es pequeña aún si el venturímetro esté instalado verticalmente.

Como v_2 es teórica o ideal por no considerar pérdidas en su determinación; introducimos un coeficiente de descarga C para asumir dichas pérdidas de energía, por consiguiente:



$$v_2 = C \sqrt{\frac{2g(P_1 - P_2)/\gamma}{1 - (A_2/A_1)^2}} \quad (4)$$

Ecuación de la velocidad del agua en la garganta del venturímetro, pero como se quiere calcular el caudal $Q = A_2 v_2$, entonces:

$$Q = C A_2 \sqrt{\frac{2g(P_1 - P_2)/\gamma}{1 - (A_2/A_1)^2}} \quad (5)$$

Donde: C : coeficiente de descarga

A_2 : sección en la garganta del venturímetro

g : aceleración de la gravedad.

P_1 : presión en la sección 1

P_2 : presión en la sección 2

γ : peso específico del agua

A_1 : sección en el punto 1

Q : caudal que circula

El coeficiente de descarga C es determinado experimentalmente y está en función del número de Reynolds y de las medidas reales del venturímetro. Lo determinaremos utilizando un gráfico producto de la investigación del ASME Research Committee on Fluid Meters, el que se muestra en la figura siguiente:

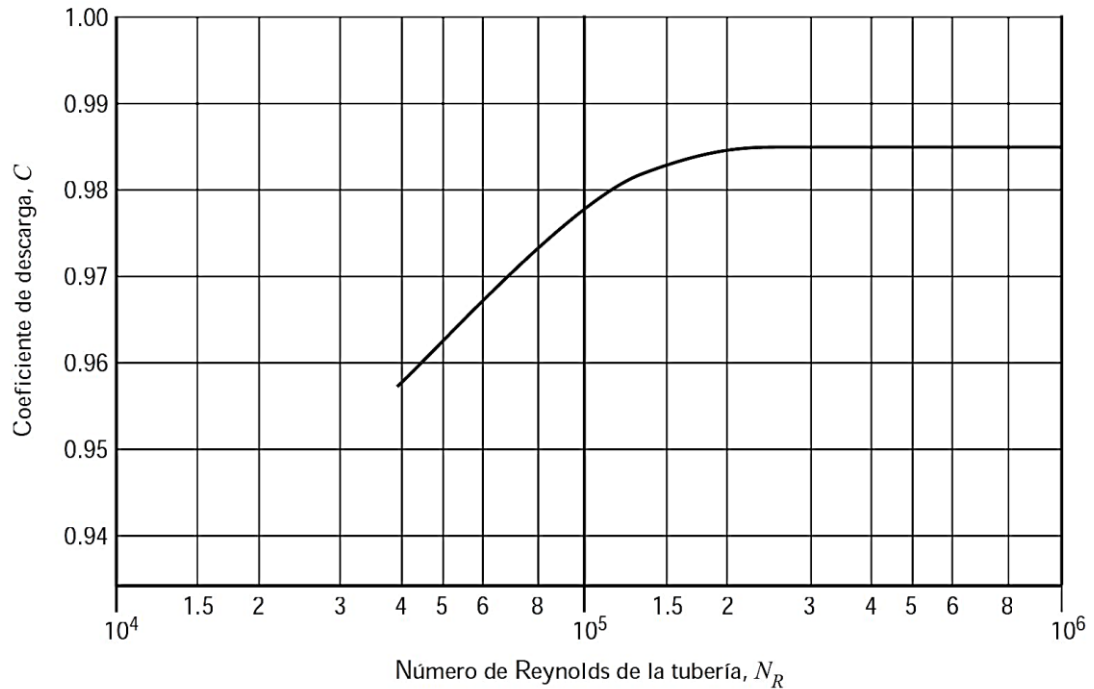


Figura 29: Gráfico para determinar el coeficiente de descarga C .

Fuente: ASME Research Committee Fluid Meters

En la determinación experimental los datos que se medirán son la diferencia de presión existente (h) entre la sección 1 y 2, lectura que se realizará en el manómetro diferencial, como se observa en la siguiente figura, las secciones A_1 y A_2 son dimensiones conocidas del venturímetro, el peso específico del agua se obtendrá de tablas existentes en libros de mecánica de fluidos y para tener precisión en los cálculos se obtendrá a la temperatura ambiente del laboratorio; el coeficiente de descarga C del gráfico proporcionado por la ASME.

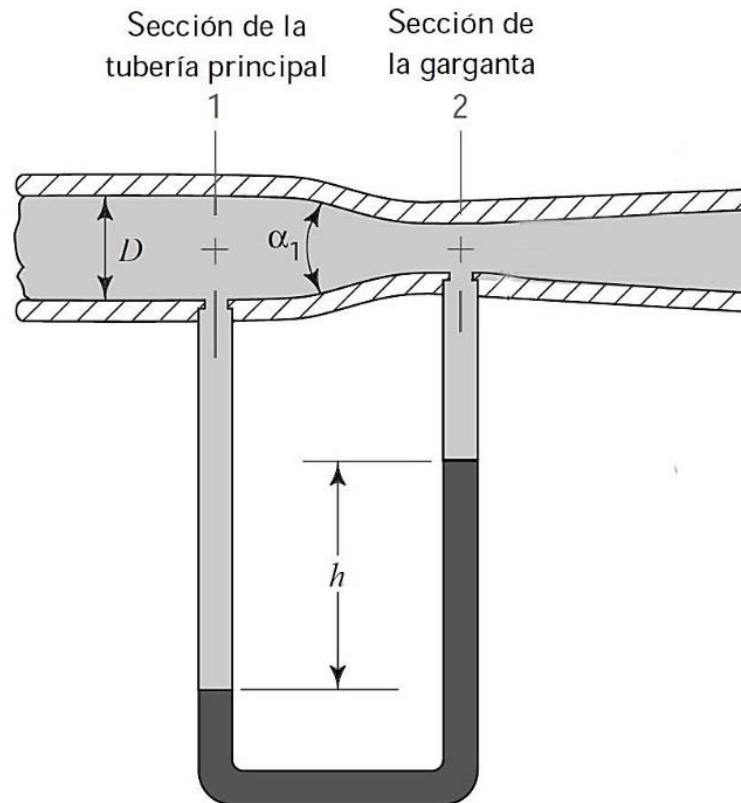


Figura 30: Manómetro diferencial.

Elaborado por el equipo de trabajo.

Aplicando manometría entre los puntos 1 y 2 del manómetro diferencial de la figura, operando se demuestra que:

$$\frac{P_1 - P_2}{\gamma} = \left(\frac{\gamma_m}{\gamma_{H_2O}} - 1 \right) h \quad (6)$$

Entonces en la ecuación (5):

$$Q = CA_2 \sqrt{\frac{2g(\gamma_m/\gamma_{H_2O} - 1)h}{1 - (A_2/A_1)^2}} \quad (7)$$

La ecuación (7) nos permite determinar experimentalmente el caudal del agua, donde:



γ_m : peso específico del mercurio

γ_{H_2O} : peso específico del agua

h : Diferencia de altura de presión entre la sección 1 y sección 2.

3.2.2. Método para determinar experimentalmente la altura manométrica o efectiva de una bomba

La altura manométrica o altura efectiva (H_m) que proporciona la bomba, es la altura teórica disminuida en las pérdidas interiores que se generan en la bomba durante su funcionamiento.

Experimentalmente la altura manométrica se puede determinar analizando a la bomba misma, siempre y cuando esté funcionando, siendo necesario lecturas de presiones de los manómetros a la entrada y salida de la bomba y realizando la medición del caudal que circula en el sistema hidráulico para calcular las velocidades necesarias. En nuestro trabajo de investigación emplearemos el método considerando la instalación hidráulica que diseñaremos para el proyecto en sí, con el objetivo de seleccionar la potencia de la bomba apropiada para el módulo de laboratorio que se diseñará en el proyecto de tesis.

Para analizar el método para determinar la altura manométrica efectiva de la bomba, consideraremos el esquema de la instalación que tendrá el módulo didáctico de laboratorio que se muestra en la siguiente figura:

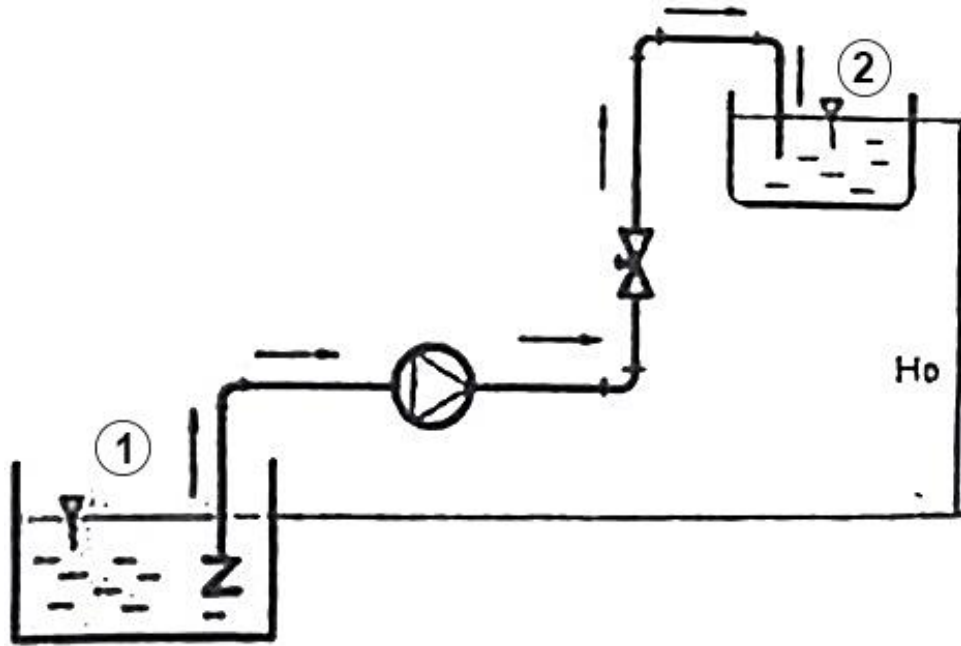


Figura 31: Esquema de la instalación hidráulica del módulo de laboratorio.

Elaborado por el equipo de trabajo.

En la figura anterior aplicamos la ecuación de Bernoulli entre los puntos 1 y 2, obteniendo:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 - h_{pex} + H_m = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2 \quad (8)$$

Donde: h_{pex} : pérdidas exteriores a la bomba.

P_1 y P_2 : presiones en los depósitos de aspiración o impulsión,
como están a la presión atmosférica $P_1 = P_2 = 0$

$\frac{v_1^2}{2g}$ y $\frac{v_2^2}{2g}$: tienden a cero, porque las áreas de los depósitos de aspiración e impulsión son muy grandes.

Simplificando la ecuación (8):

$$\frac{P_1}{\gamma} + 0 + Z_1 - h_{pex} + H_m = \frac{P_2}{\gamma} + 0 + Z_2$$



Despejando la altura manométrica (H_m):

$$H_m = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + Z_2 - Z_1 + h_{pex} \quad (9)$$

Donde:

h_{pex} : pérdida total exterior a la bomba (pérdidas primarias y secundarias en la instalación hidráulica)

Analizando la ecuación (9) para su aplicación es necesario tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Es necesario conocer las características del sistema hidráulico, respecto a las tuberías: longitud y material, y accesorios; también el caudal porque las pérdidas están en función de él.
- Los depósitos de aspiración e impulsión generalmente están expuestos a la atmósfera por lo que:

$$\frac{P_2 - P_1}{\gamma} = 0$$

- Para comprar una bomba se debe proporcionar al vendedor el caudal y la altura manométrica, lo que implica estudiar la instalación hidráulica y aplicar convenientemente la ecuación (9), para una buena selección de la bomba.

3.2.3. Método para determinar experimentalmente la curva característica de una bomba

Las bombas hidráulicas son máquinas empleadas para impulsar el agua, transforman la energía mecánica en momentum, produciendo una diferencia de presión



sobre el agua para que fluya.

Para el proceso de selección de una bomba es necesario disponer de su curva característica para analizar el comportamiento de la bomba, es un gráfico que, en el eje de las ordenadas, eje Y, se observa la altura manométrica que es capaz de impulsar la bomba y; en el eje de las abscisas, eje X, se observa el caudal de operación.

Cuando se carece de la curva característica de la bomba, es factible graficarla experimentalmente, para lo cual empleamos los métodos de determinación experimental de un caudal y su respectiva altura manométrica o efectiva.

Los cálculos de las pérdidas de carga se realizan con la Ecuación de Darcy:

$$h_p = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (10)$$

El coeficiente adimensional f , se determinará utilizando el Diagrama de Moody y para las pérdidas de carga en dispositivos o singularidades las tablas y monogramas respectivos.

Para determinar la curva característica de la bomba el procedimiento experimental es el siguiente:

El procedimiento se realizará en el módulo de laboratorio diseñado.

- Se procederá a arrancar la bomba y esperar unos minutos para que se establezca el funcionamiento de la bomba.
- Se verificará que los instrumentos de medición estén funcionando correctamente.
- Luego se regulará el flujo hasta un caudal mínimo.

- Para la determinación del caudal se procederá a leer la diferencia de altura de presión en el manómetro diferencial del venturímetro.
- Posteriormente para el mismo caudal se procederá a tomar los datos experimentales necesarios para determinar la altura manométrica respectiva para dicho caudal.
- Se procederá a repetir para diferentes caudales los pasos anteriores, incrementándose los caudales aproximadamente de 2 L/min.
- Graficar la curva característica de la bomba, empleando un aproximado de 8 puntos (Q, H_m).

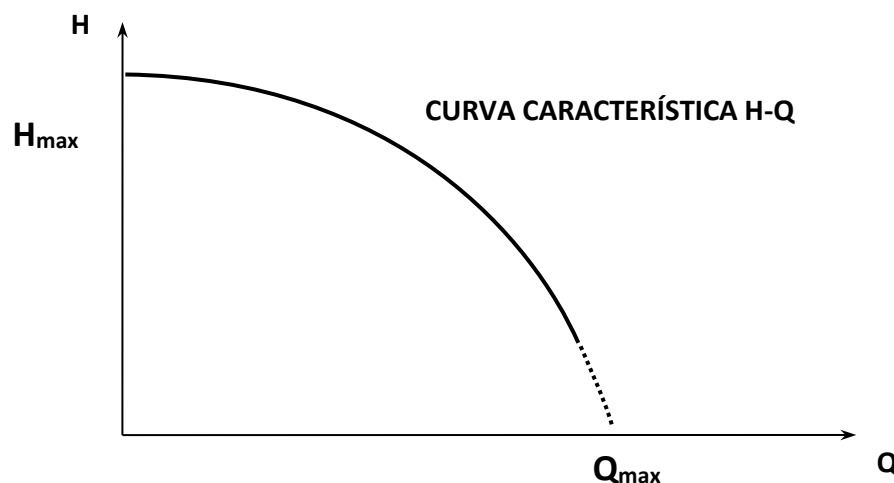


Figura 32: Curva característica de una bomba.

Elaborado por el equipo de trabajo.

3.2.4. Potencia de una bomba

En un sistema hidráulico de bombeo, la potencia para operar la bomba no es igual a la potencia transmitida al fluido, que constituye la potencia útil en la realidad.

La potencia útil que se transmite al agua para tener un caudal (Q) y una altura



manométrica (H) se determina por la expresión:

$$P_u = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$$

Donde:

P_u , potencia del agua, en W.

Q , caudal de agua que circula por la bomba, en m³/s

H , altura manométrica del agua, en Kg/m³

ρ , densidad del agua, en Kg/m³

g , aceleración de la gravedad, en m/s²

El peso específico (γ) es igual a $\rho \cdot g$, entonces:

$$P_u = \gamma \cdot Q \cdot H$$

Donde:

γ , peso específico del agua, en N/m³

En un sistema de bombeo, la bomba es accionada por un motor eléctrico o de combustión montado al eje de la bomba, por lo tanto, la potencia consumida (P_e) es mayor que la potencia útil (P_u) porque se tiene que considerar pérdidas de los elementos mecánicos que operan.



Figura 33: Motobomba eléctrica
Elaborado por el equipo de trabajo



En la figura anterior, potencia en el eje de la bomba (P_b) que proporcionará el caudal (Q) y la altura manométrica (H):

$$P_b(\text{HP}) = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{274 \cdot \eta_H \cdot \eta_V}$$

Donde:

Q , caudal en m^3/h

H , altura manométrica en m.

γ , peso específico del agua en Kg/dm^3

η_H , eficiencia hidráulica

η_V , eficiencia volumétrica

Considerando las pérdidas anteriores:

$$P_u = P_b \cdot \eta_V \cdot \eta_H$$

La potencia eléctrica consumida de la red (P_e) es el consumo a considerar en el diseño del sistema hidráulico y, se determina de la siguiente manera:

- Motores monofásicos

$$P_e(\text{KW}) = \frac{U \cdot I \cdot \cos \phi}{1000}$$

- Motores trifásicos

$$P_e(\text{KW}) = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \phi}{1000}$$

Donde:



U , tensión eléctrica, en voltios (V)

I , corriente, en amperios (A)

$\cos \phi$, factor de potencia

Pero la potencia del motor eléctrico (P_m) a la salida del eje es menor que P_e , por pérdidas mecánicas, entonces:

$$P_m(KW) = P_e \cdot \eta_M$$

donde (η_M) es el rendimiento mecánico.

3.2.5. Cavitación

En el diseño de un sistema hidráulico de bombeo se tiene que considerar que en la operación de la bomba no se presente la cavitación.

La cavitación se presenta si la presión del agua antes de ingresar al rotor sea menor a la correspondientes a la presión del vapor del agua. Este fenómeno produce la formación de burbujas que se condensan en forma rápida y violenta e instantes después la presión aumenta catastróficamente, produciendo daños mecánicos que debe ser evitados.

Para analizar la cavitación de una bomba se debe conocer la carga neta positiva de succión ($NPSH$) que se dispone y la requerida.

Net Positive Suction Head ($NPSH$) es un concepto que define la diferencia existente entre la presión del agua en el eje del rotor y la presión del vapor de agua a la temperatura del ambiente en la que opera la bomba.

- **$NPSH$ disponible ($NPSH_d$)**

Es un parámetro hidráulico que tiene la instalación que no depende de la bomba



que se utiliza. Aplicando la ecuación de la conservación de la energía entre la superficie libre del líquido y el punto de aspiración:

$$NPSH_d = \frac{(10 \cdot P_a)}{\gamma} - H_a - P_{ca} - \frac{(10 \cdot P_v)}{\gamma}$$

donde:

P_a , presión atmosférica en depósito de aspiración, en Kg/cm²

H_a , altura geométrica de aspiración, en m.

P_{ca} , pérdida de carga en aspiración, en m.

P_v , presión del vapor de agua, en Kg/dm³

La presión atmosférica (P_a) a cierta altitud se puede determinar por:

$$P_a(m) = 10,33 - \frac{\text{altitud (m)}}{900}$$

- ***NPSH* disponible ($NPSH_r$)**

Es un parámetro técnico que proporciona el fabricante de la bomba, se define por la expresión:

$$NPSH_r = H_z + \frac{v_a^2}{2g}$$

donde:

H_z , presión mínima en entrada del rodete, en m.

v_a , velocidad de agua al entrar en la bomba, en m/s

$\frac{v_a^2}{2g}$, presión o altura dinámica, en m.

Para evitar la cavitación es necesario determinar estos parámetros para que la



bomba opere en forma correcta. Y así evitar picaduras en los álabes, vibraciones y ruidos producidos por las burbujas que originan picos de presión.

Para evitar los problemas de cavitación, debe cumplirse que:

$$NPSH_d \geq NPSH_r + 0,5 m$$



CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADOS

En el desarrollo del proceso del diseño del módulo de laboratorio para determinar experimentalmente los parámetros de funcionamiento de una bomba hidráulica centrífuga, consideramos en principio la formulación del planteamiento del problema, en la que se analizó que los módulos de laboratorio de venta en el mercado no tienen las características que permitan una adecuada enseñanza y aprendizaje; por lo que se decidió diseñar un módulo de laboratorio didáctico y pedagógico acorde a los esquemas teóricos de la bibliografía actual sobre el tema de las bombas, fundamental para elevar el nivel académico a través de un proceso de enseñanza que compatibilice la teoría con la parte experimental para el logro de las competencias de los estudiantes.

4.1.1. Ingeniería del diseño del sistema hidráulico del módulo de laboratorio

Para diseñar el sistema hidráulico, se consideró la disponibilidad de la infraestructura del laboratorio que determinó las características de la arquitectura física del sistema hidráulico, teniendo presente los esquemas teóricos de estas instalaciones, y guiándonos como marco referencial el esquema de la figura siguiente:

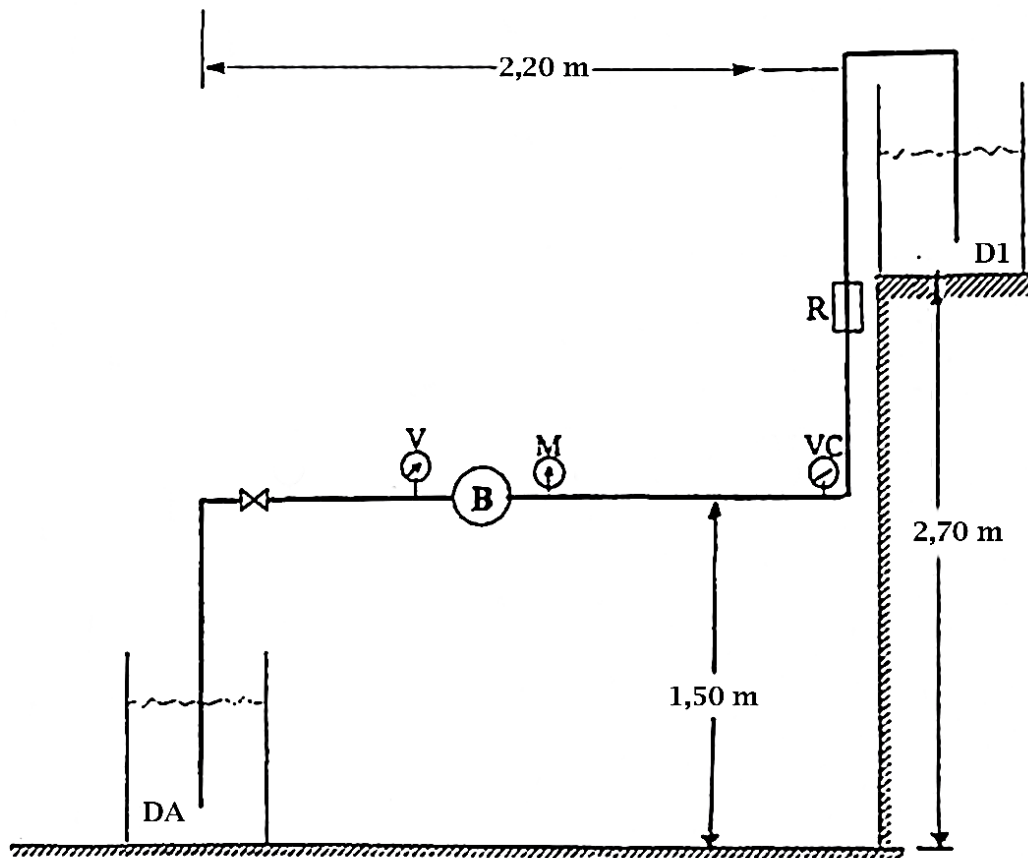


Figura 34: Esquema referencial del sistema hidráulico para el diseño
Elaborado por el equipo de trabajo.

Donde:

DA : depósito de aspiración

V: vacuómetro

B: bomba

M: manómetro

VC: válvula de compuerta

R: rotámetro

D1: depósito de impulsión

En el esquema se puede apreciar los dispositivos hidráulicos del módulo a diseñar,
cuyas características técnicas son:



- El depósito de aspiración (DA) y el depósito de impulsión (DI) tendrán una base circular de diámetro igual a 0,58 m y una altura de 1 m, con una capacidad de 0,264 m³ o 264 L; cuya ubicación se muestra en el esquema de la figura.
- Un vacuómetro (V) para medir la presión de aspiración de la bomba que es negativa, es decir menor que la presión atmosférica, se utilizará vacuómetro bañado en glicerina por ser más preciso y confiable.
- Un manómetro (M) para medir la presión de impulsión de la bomba que es positiva, de igual manera se seleccionará uno bañado en glicerina por ser más preciso y confiable.
- Un medidor de caudal llamado Rotámetro ® que por ser de lectura directa es más conveniente para la experimentación, se instalará en la tubería de impulsión del circuito hidráulico de la bomba.
- Una válvula de compuerta (VC) necesaria para controlar el caudal del agua que impulsa la bomba por las tuberías del circuito hidráulico.
- Las tuberías de PVC del circuito hidráulico, cuyo montaje será el adecuado para el funcionamiento del circuito hidráulico.

4.1.1.1. Selección del diámetro de la tubería

La selección del diámetro de la tubería es importante para evitar las pérdidas de carga por la fricción del fluido del agua con las superficies interiores de las tuberías del circuito hidráulico, pero debe tenerse en cuenta el criterio técnico-económico de la instalación porque a mayor diámetro el costo de la tubería es mayor.

Pero la selección del diámetro óptimo de las tuberías debe cumplir las

recomendaciones técnicas que establecen que las velocidades máximas del agua en las tuberías deben ser de 1,8 m/s en la tubería de aspiración y de 2,5 m/s en la tubería de impulsión. Velocidades menores a 0,5 m/s generan dificultades de sedimentación y superiores a 5 m/s generan problemas abrasivos en las superficies interiores de las tuberías que disminuyen su vida útil.

En la expresión matemática del caudal de agua que fluye por la tubería es:

$$Q = v \cdot A \quad (4.1)$$

donde:

v, velocidad del agua

A, área interna de la tubería es igual a $\pi D^2/4$

D, diámetro interior

Reemplazando y operando en (4.1):

$$V = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (4.2)$$

Para determinar el diámetro óptimo utilizando la ecuación (4.2) se realizó pruebas experimentales iterativas. Considerando primero un diámetro de 3/4 pulgada y para el caudal las especificaciones técnicas de una motobomba MEBA de 1/2 HP de potencia, con una altura máxima de 32 m con un caudal de 35 L/min. Después de pruebas experimentales y cálculos respecto al diámetro y caudal, que satisfagan las recomendaciones técnicas de velocidad, se decidió que en el módulo a diseñar el diámetro de la tubería de PVC² sería de una pulgada con un caudal de diseño de 30 L/min.

² Mott, R. (2018). Mecánica de fluidos aplicada (pp. 549). México. Editorial Prentice Hall Hispanoamericana, S.A.



En la tubería de PVC de 1 pulgada de diámetro, los diámetros exterior e interior son:

$$D_{ext}(1") = 33,4 \text{ mm}$$

$$D_{int}(1") = 26,2 \text{ mm} = 0,0262 \text{ m}$$

también:

$$Q = 30L/min = 5,0 \times 10^{-4} \text{ m}^3/s$$

Calculando la velocidad:

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

$$v = \frac{5,0 \times 10^{-4} \text{ m}^3/s}{\frac{\pi}{4} (0,0262 \text{ m})^2}$$

$$v = 0,93 \frac{m}{s}$$

Velocidad adecuada tanto para la tubería de aspiración e impulsión, considerando las recomendaciones técnicas de velocidades máximas. Por lo tanto, el diámetro de la tubería de PVC de todo el circuito hidráulico será de 1 pulgada, para la conformidad del diseño.

4.1.1.2. Determinación de la expresión para el cálculo de la altura manométrica

En el diseño y cálculo de un sistema hidráulico de bombeo, el cálculo de la altura manométrica (H) es importante que es la energía ganada por el agua y la cual debe ser entregada por la bomba, representa la resistencia que debe vencer el agua en el circuito hidráulico.

Experimentalmente la altura manométrica la determinamos aplicando la ecuación de Bernoulli entre los puntos 1 y 2 de las superficies del agua en los depósitos de aspiración e impulsión, en el esquema siguiente del sistema hidráulico:

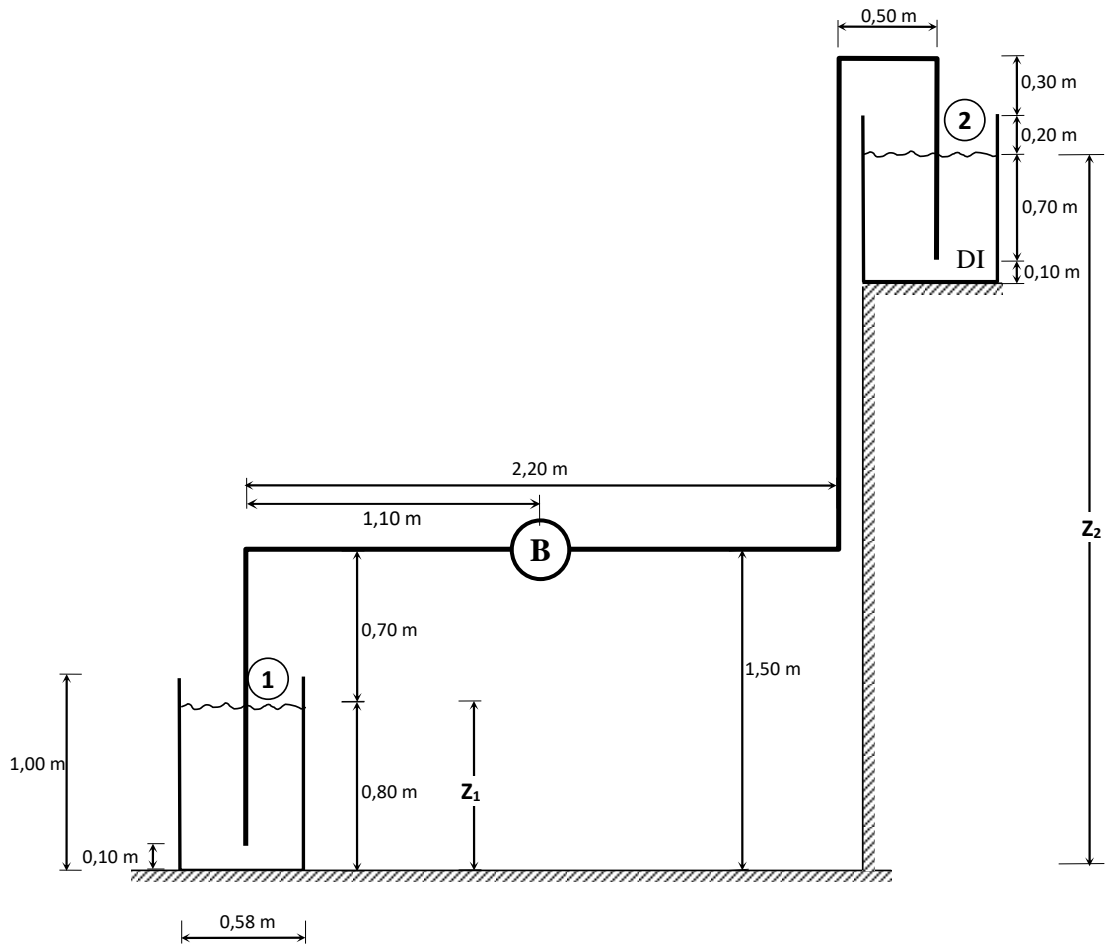


Figura 35: Esquema del circuito hidráulico para determinar la altura manométrica (H)

Elaborado por el equipo de trabajo

Aplicando Bernoulli:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 + H - h_p - h_s = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2$$

Despejando H :

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + (Z_2 - Z_1) + h_p + h_s \quad (4.3)$$

- $(P_2 - P_1)/\gamma$: como los puntos 1 y 2 de aspiración están en contacto con la atmósfera las presiones P_2 y P_1 son iguales, por consiguiente, este término es igual a cero.
- $v_2^2 - v_1^2/2g$: término que también es igual a cero por que las velocidades en las superficies 1 y 2 son despreciables.
- $Z_2 - Z_1$: altura geodésica o altura geométrica que el agua debe vencer, para calcularla se suma la altura de aspiración (h_p) medida desde el nivel de agua mínimo hasta el nivel donde se ubica el eje de la bomba y, la altura de impulsión (h_s) medida desde el nivel donde se ubica el eje de la bomba hasta el nivel del agua máximo que se tiene en la instalación hidráulica. En la figura siguiente se determinan las dos alturas

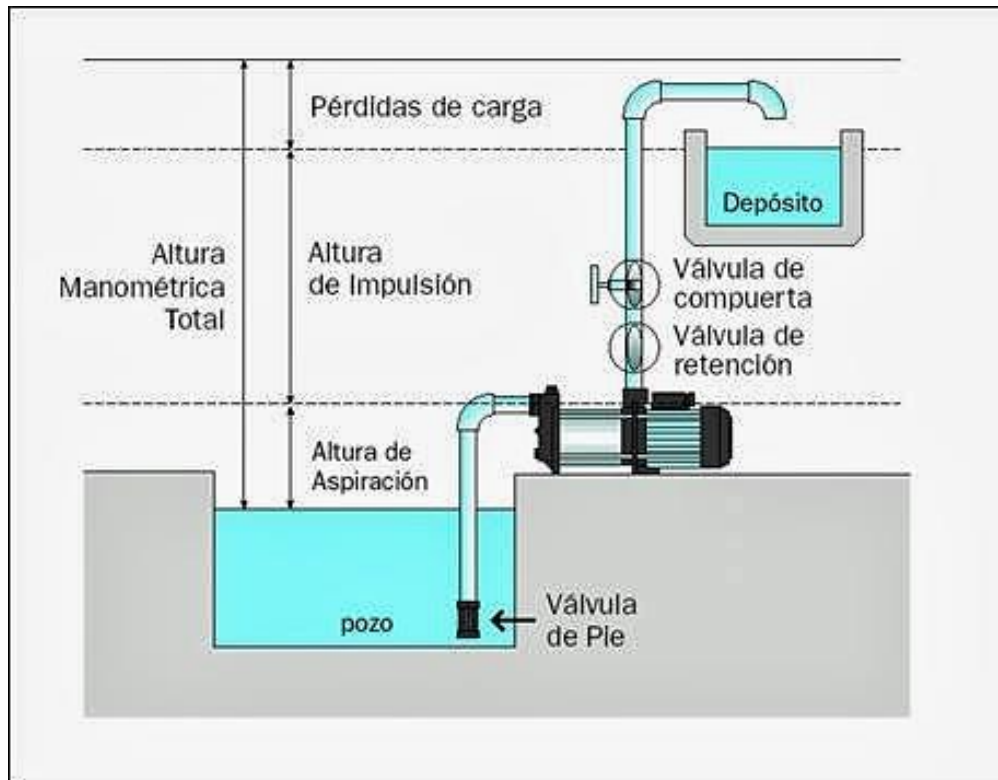


Figura 36: Alturas de aspiración e impulsión de una instalación hidráulica.

Fuente: <https://www.google.com/imgres?imgurl=http://1.bp.blogspot.com/>

En el módulo que se diseñó la altura geodésica ($Z_2 - Z_1$) se calculó analizando la Figura 4.2, donde la altura de aspiración es igual a 0,70 m y la altura de impulsión es igual a 2,00 m. Por consiguiente, la altura geodésica o geométrica será igual a:

$$(Z_2 - Z_1) = 0,70 + 2,00$$

$$(Z_2 - Z_1) = 2,70 \text{ m}$$

Las pérdidas primarias o pérdidas de carga se generan por la fricción o rozamiento del flujo de agua por las tuberías y fricción entre partículas del agua.

Para el cálculo de pérdidas primarias utilizaremos la ecuación conocida de Darcy – Weisbach:

$$h_p = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g} \quad (4.4)$$



Donde: h_p : pérdidas primarias

f : coeficiente de pérdidas primarias

L : longitud de la tubería

D : diámetro interno de la tubería

v : velocidad del agua

g : aceleración de la gravedad

- **Cálculo de la longitud (L)**

Para el cálculo de la longitud de la tubería (L) recurrimos al esquema de la Figura 4.2, donde sumamos las longitudes de las tuberías del sistema hidráulico:

$$L = 1,40 + 2,20 + 0,50 + 1,20$$

$$L = 5,30 \text{ m}$$

- **Cálculo del diámetro interno (D)**

En el acápite 4.1.1 se realizó la selección del diámetro de la tubería considerando criterios técnico-económicos y recomendación técnicas respecto a las velocidades máximas que deben tener las tuberías de aspiración e impulsión:

- Tuberías de aspiración : 1,8 m/s

- Tuberías de impulsión: 2,5 m/s

También se consideró el caudal necesario de acuerdo a la necesidad del módulo a diseñar, las características y disponibilidad del laboratorio de la escuela Profesional, que se estableció en $Q = 30 \text{ L/min}$.

Estableciéndose un diámetro de tubería igual a 1 pulgada y su correspondiente



diámetro interior

$$D = 26,2 \text{ mm} = 0,0262 \text{ m}$$

- **Cálculo de la velocidad del agua (v)**

Considerando criterios técnico-económicos y recomendaciones técnicas sobre velocidades máximas en las tuberías de aspiración e impulsión se consideró para el cálculo:

$$D = 0,0262 \text{ m}$$

$$Q = 30 \frac{L}{min} = 5,00 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}$$

Y aplicando la ecuación de continuidad:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{5,00 \times 10^{-4} \frac{m^3}{s}}{\frac{\pi}{4} (0,0262 \text{ m})^2}$$

$$v = 0,93 \text{ m/s}$$

Velocidad que cumple las recomendaciones técnicas, respecto a las velocidades máximas; por lo que se decidió como criterio técnico de diseño que el diámetro de ambas tuberías sería de 1 pulgada. Por lo tanto, se considerará que la velocidad para el cálculo de pérdidas es igual a:

$$v = 0,93 \text{ m/s}$$

- **Aceleración de la gravedad**

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



4.1.1.3. Determinación del coeficiente de pérdidas primarias (f)

Para la determinación del coeficiente de pérdidas primarias (f) se empleará el Diagrama de Moody, que requiere para su utilización el cálculo de la rugosidad relativa (ϵ/D) y el número de Reynolds (R):

- Cálculo de la rugosidad relativa (ϵ/D):

ϵ ³: rugosidad absoluta de tubería PVC = 0,0015 mm

D : diámetro interno de la tubería = 26,2 mm.

Cálculo de la rugosidad relativa:

$$\frac{\epsilon}{D} = \frac{0,0015 \text{ mm}}{26,2 \text{ mm}} = 0,00005 \text{ (adimensional)}$$

- Cálculo del número de Reynolds (R):

$$R = \frac{v \cdot D}{\nu}$$

Donde: v : velocidad del agua = 0,93 m/s

D : diámetro interno de la tubería PVC

$$D = 0,0262 \text{ m}$$

ν : viscosidad cinemática del agua a 10°C, temperatura ambiente
del laboratorio

$$\nu = 1,30 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$$

Reemplazando en la ecuación de Reynolds:

³ Rugosidad Absoluta Materiales Tuberías | PDF (scribd.com)



$$R = \frac{\left(0,93 \frac{m}{s}\right) \cdot (0,0262 m)}{1,30 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s}}$$

$$R = 0,01874 \times 10^{-6}$$

$$R = 2 \times 10^{-4} \text{ (adimensional)}$$

Con los valores calculados de la rugosidad relativa de la tubería PVC y el número de Reynolds, determinamos en el diagrama de Moody el coeficiente de pérdidas primarias (f), como se observa en el diagrama siguiente:

$$\frac{\varepsilon}{D} = 0,00005$$

$$R = 2 \times 10^{-4}$$

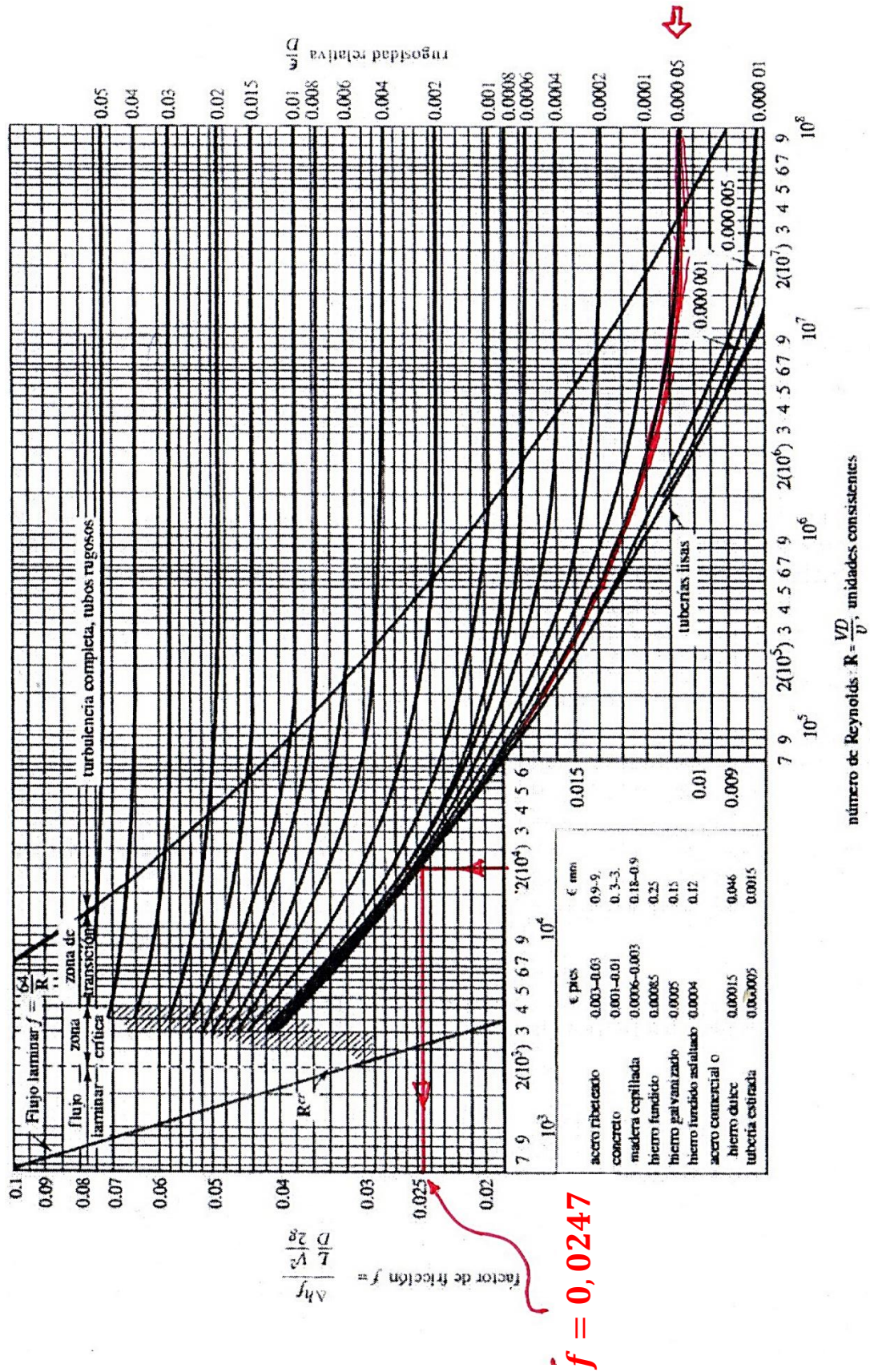


Figura 37: Determinación del coeficiente de fricción primaria (f) en el diagrama de Moody

Elaborado por el equipo de trabajo



Como se aprecia en el diagrama, un valor para el coeficiente:

$$f = 0,0247$$

Reemplazando los valores calculados en la ecuación (4.4) de las pérdidas primarias:

$$h_p = f \frac{L v^2}{D 2g}$$

$$h_p = (0,0247) \frac{5,30}{0,0262} \frac{(0,93)^2}{2(9,81)}$$

$$h_p = 0,22026 \text{ m}$$

4.1.1.4. Determinación de las pérdidas secundarias

Estas pérdidas se originan en la fricción producida por el flujo de agua por las válvulas, codos y otros accesorios hidráulicos que traen como consecuencia la pérdida de carga en el sistema de bombeo.

Usualmente la expresión para el cálculo de las pérdidas secundarias es la siguiente:

$$h_s = (\Sigma K) \frac{V^2}{2g} \quad (4.7)$$

Donde:

ΣK = La sumatoria de todos los coeficientes de los accesorios en la instalación hidráulica del módulo a diseñar.

V = velocidad de diseño del flujo de agua.

g = aceleración de la gravedad.

Para calcular la sumatoria de todos los coeficientes de pérdidas secundarias de los accesorios hidráulicos se empleará la siguiente tabla:

Accesorios		Diámetro nominal												
		1/2	3/4	1	1 1/4	1 1/2	2	2 1/2-3	4	6	8-10	12-16	18-24	
L/D		Valores de K												
Válv.de compuerta(abierta)	8	0.22	0.2	0.18	0.18	0.15	0.15	0.14	0.14	0.12	0.11	0.1	0.1	
Válv.de globo(abierta)	340	9.2	8.5	7.8	7.5	7.1	6.5	6.1	5.8	5.1	4.8	4.4	4.1	
Válv.de retención horizontal(check)	100	2.7	2.5	2.3	2.2	2.1	1.9	1.8	1.7	1.5	1.4	1.3	1.2	
Válv.de retención horizontal oscilatoria(check)	50	1.4	1.3	1.2	1.1	1.1	1.0	0.9	0.9	0.75	0.7	0.65	0.6	
Válv.de pie de disco(de huso)con colador	420	11.3	10.5	9.7	9.3	8.8	8.0	7.6	7.1	6.3	5.9	5.5	5.0	
Válv.de pie de disco con bisagra	75	2	1.9	1.7	1.7	1.7	1.4	1.4	1.3	1.1	1.1	1.0	0.9	
Codos estándar	90°	30	0.81	0.75	0.69	0.66	0.63	0.57	0.54	0.51	0.45	0.42	0.39	0.36
	45°	16	0.43	0.4	0.37	0.35	0.34	0.3	0.29	0.27	0.24	0.22	0.21	0.19
	90° radio largo	16	0.43	0.4	0.37	0.35	0.34	0.3	0.29	0.27	0.24	0.22	0.21	0.19
	180°	50	1.35	1.25	1.15	1.10	1.05	0.95	0.9	0.85	0.75	0.7	0.65	0.6
Curvas de 90°	20	0.54	0.5	0.46	0.44	0.42	0.38	0.36	0.34	0.3	0.28	0.26	0.24	
T en línea (con derivación en la línea principal y lateral cerrada)	20	0.54	0.5	0.46	0.44	0.42	0.38	0.36	0.34	0.3	0.28	0.26	0.24	
T en línea (con circulación por derivación)	60	1.62	1.5	1.38	1.32	1.26	1.14	1.08	1.02	0.9	0.84	0.78	0.72	

$$\text{Longitud equivalente} = L/D \times D = n^{\circ}D \times D$$

Figura 38: Coeficiente de pérdidas para diferentes accesorios.

Fuente: Cameron Hydraulic Data

En base al esquema de la Figura 38 tabularemos los accesorios instalados en la instalación hidráulica del módulo a diseñar:

Tabla 1: Cálculo de la ΣK de los coeficientes de las pérdidas de accesorios

ACCESORIOS	Cantidad	Valor de K	
		Unitario	Total
Válvula de pie	1	9,70	9,70
Válvula de globo	1	7,80	7,80
Válvula de compuerta	1	0,18	0,18
Válvula cheek	1	2,30	2,30
Codo de 90°	4	0,69	2,76
Colador o canastilla	1	1,30	1,30
Entrada brusca de tubería al depósito	1	0,50	0,50
TOTAL ΣK			24,54

Elaborado por el equipo de trabajo



Reemplazando en la ecuación 4.7:

Donde:

$$\Sigma K = 24,54$$

$$v = 0,93 \text{ m/s}$$

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

$$h_s = (24,54) \frac{(0,93 \text{ m/s})^2}{2(9,81 \text{ m/s}^2)}$$

$$h_s = 1,08179 \text{ m}$$

4.1.1.5. Cálculo de la altura manométrica (H)

En la ecuación (4.3):

$$H = \underbrace{\frac{P_2 - P_1}{\gamma}}_{\text{cero}} + \underbrace{\frac{v_2^2 - v_1^2}{2g}}_{\text{cero}} + (Z_2 - Z_1) + h_p + h_s$$

Entonces:

$$H = (Z_2 - Z_1) + h_p + h_s \quad (4.8)$$

Donde los tres términos se calcularon y sus valores son:

$$Z_2 - Z_1 = 2,70 \text{ m}$$

$$h_p = 0,22 \text{ m}$$

$$h_s = 1,08 \text{ m}$$

Reemplazando:

$$H = 2,70 + 0,22 + 1,08$$

$$H = 4,00 \text{ m}$$

4.1.2. Cálculo de la Potencia de la bomba

La potencia útil (P_U) que se transfiere al agua se calcula por la ecuación:

$$P_U = \gamma \cdot Q \cdot H \quad (4.9)$$

Donde:

P_U : potencia transmitida al agua, en W

γ : peso específico del agua a 10°C = 9810 N/m³

Q : Caudal del agua, en m³/s = 5,00 × 10⁻⁴ m³/s

H : altura manométrica, en m = 4,00 m

Reemplazando en la ecuación 4.9:

$$P_U = 9810 \frac{\text{N}}{\text{m}^3} \cdot 5,00 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 4,00 \text{ m}$$

$$P_U = 19,62 \text{ W}$$

P_U , representa la potencia que generaría el agua al pasar por la bomba. Pero la bomba es accionada por un motor eléctrico instalado en el eje de la bomba, entonces la potencia que acciona el equipo de bombeo es mayor que P_U , porque se considera las pérdidas y eficiencias de los diversos dispositivos de la máquina. Entonces la potencia en el eje de la bomba se calcula por:

$$P_{\text{eje}} = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{\eta_H \cdot \eta_V} \quad (4.10)$$

Donde, η_H es la eficiencia hidráulica que considera las pérdidas por la fricción

⁴ Moot, R. (2019). Mecánica de fluidos aplicada. Edit. Prentice Hall.



del agua contra las superficies de la bomba, rodamientos y válvulas y, es proporcionada por la fábrica de la bomba, para bombas pequeñas su rango está entre 0,85 hasta 0,88; η_V es la eficiencia volumétrica que considera pérdidas por fugas de agua en el interior de la bomba, también es proporcionada por la fábrica y, que varía entre 0,89 hasta 0,92 para bombas pequeñas.

Por condiciones de diseño, consideramos:

$$\eta_H = 0,86 \quad \text{y} \quad \eta_V = 0,90$$

Reemplazando en la ecuación 4.10:

$$P_{eje} = \frac{(9810) \cdot (5,00 \times 10^{-4}) 4}{(0,86)(0,90)}$$

$$P_{eje} = 25,35 \text{ W}$$

Finalmente, considerando la eficiencia mecánica (η_m) para considerar las pérdidas mecánicas por fricción en los rodamientos de los ejes, pérdidas en los elementos de transmisión y mando; la potencia de la bomba (P_b) sería igual a:

$$P_b = \frac{P_{eje}}{\eta_m} \quad (4.11)$$

Operando y considerando $\eta_m = 0,85$ para bombas pequeñas:

$$P_b = \frac{25,35}{0,85}$$

$$P_b = 29,82 \text{ W}$$

Por consiguiente, seleccionamos una motobomba eléctrica marca MEBA de 1/2 HP de potencia, disponible en el mercado regional del país.

4.1.3. Verificación del problema de cavitación

La cavitación consiste en la formación de burbujas de vapor de agua en el interior del flujo que se bombea, se genera en la tubería de aspiración a la entrada del rodete de la bomba donde la presión es mínima. Se origina cuando la presión del fluido de agua se hace menor que su presión de saturación a la temperatura del agua en el interior de la bomba. Para que la bomba del módulo diseñado funcione en forma correcta sin problemas de cavitación debe cumplirse que la altura neta positiva de aspiración (Net Positive Suction Head) disponible $NPSH_d$ de la instalación hidráulica sea mayor que el $NPSH_r$ requerido de la bomba, debemos verificar:

$$NPSH_d \geq NPSH_r + 0,5 \text{ m} \quad (4.12)$$

4.1.3.1. Cálculo de la $NPSH_d$ disponible en la instalación del módulo diseñado

La expresión para su cálculo es la siguiente:

$$NPSH_d = \frac{10 \cdot P_{at}}{\gamma} - H_a - P_{ca} - \frac{10 \cdot P_v}{\gamma} \quad (4.13)$$

Donde:

P_{at} = presión atmosférica (Kg/cm^2)

H_a = altura geométrica de aspiración (m)

P_{ca} = pérdida de carga en el tramo de aspiración (m)

P_v = presión de vapor de agua a 10°C (Kg/cm^2)

γ = peso específico del agua a 10°C (Kg/dm^3)

- **Determinación de P_{at}**

Se midió la presión atmosférica en el Barómetro de Sifón del Laboratorio de Física de la FICA – UNAP, como se observa en la figura siguiente:

$$P_{at} = 486 \text{ mm Hg}$$



Figura 39: Lectura de la presión atmosférica

Elaborado por el equipo de trabajo

- **Determinación de H_a**

La altura geométrica de aspiración (H_a) la determinamos en la figura 4.2, de donde obtenemos:

$$H_a = 0,70 \text{ m}$$

- **Determinación de P_{ca}**

La pérdida de carga generada en la trayectoria de la aspiración (P_{ca}), la que está constituida por pérdidas primarias y secundarias. En la tubería de aspiración



existen:

- Longitud: $1,40 + 1,10 = 2,59$ m
- Válvula de pie: 1 unidad
- Codo a 90° : 1 unidad

Pérdidas primarias: se calculará con la ecuación:

$$h_p = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Donde, todos los parámetros ya se calcularon, solo variará $L = 2,50$ m, sus valores

son:

$$f = 0,0247$$

$$D = 0,0262 \text{ m}$$

$$v = 0,93 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

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

Reemplazando:

$$h_p = (0,0247) \cdot \frac{2,50}{0,0262} \cdot \frac{(0,93)^2}{2(9,81)}$$

$$h_p = 0,10390 \text{ m}$$

Pérdidas secundarias: Se calculará con la expresión:

$$h_s = (\Sigma K) \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Donde:



$$v = 0,93 \frac{m}{s}$$

$$g = 9,81 m/s^2$$

$$\Sigma K = \text{Válvula de pie} + \text{Codo de } 90^\circ$$

$$\Sigma K = 9,70 + 0,69 = 10,39$$

Reemplazando en la ecuación 4.7:

$$h_s = (10,39) \cdot \frac{(0,93)^2}{2(9,81)}$$

$$h_s = 0,45802 m$$

Por consiguiente:

$$P_{ca} = h_p + h_s = 0,10390 + 0,45802$$

$$P_{ca} = 0,56192 m$$

- **Determinación de P_v y γ**

La determinación de la presión del vapor de agua (P_v) y del peso específico del agua (γ) a una temperatura de 10°C que es la aproximada del laboratorio, la obtenemos de las tablas de instalaciones hidráulicas, obteniendo:

$$P_v = 0,0125 Kg/cm^2$$

$$\gamma = 0,9996 Kg/dm^3$$

Reemplazando los valores de los parámetros calculados en la ecuación (4.13):

$$NPSH_d = \frac{10(0,6607)}{0,9996} - 0,70 - 0,56192 - \frac{10(0,0125)}{0,9996}$$

$$NPSH_d = 6,60964 - 0,70 - 0,56192 - 0,12505$$

$$NPSH_d = 5,22267 \text{ m}$$

4.1.3.2. Cálculo de la $NPSH_r$ requerido

Por las características del módulo diseñado donde la instalación hidráulica es pequeña, lo que influye en las características de parámetros importantes como la altura manométrica, longitud y diámetro de las tuberías, velocidad, caudal, potencia de la bomba.

Para la determinación del $NPSH_r$ requerido por la bomba, emplearemos el siguiente gráfico; dicho parámetro depende fundamentalmente del caudal que se bombea; en nuestro módulo diseñado el caudal (Q) es $30 \text{ L/min} = 5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$.

Para emplear el gráfico, el caudal lo expresamos en $Q = 1,8 \text{ m}^3/\text{h}$, lo ubicamos en el eje de las abscisas, trazamos la perpendicular hasta que intercepte la curva y trazando la horizontal hacia la izquierda, leemos la $NPSH_r$ en la ordenada:

$$NPSH_r = 2,5 \text{ m}$$

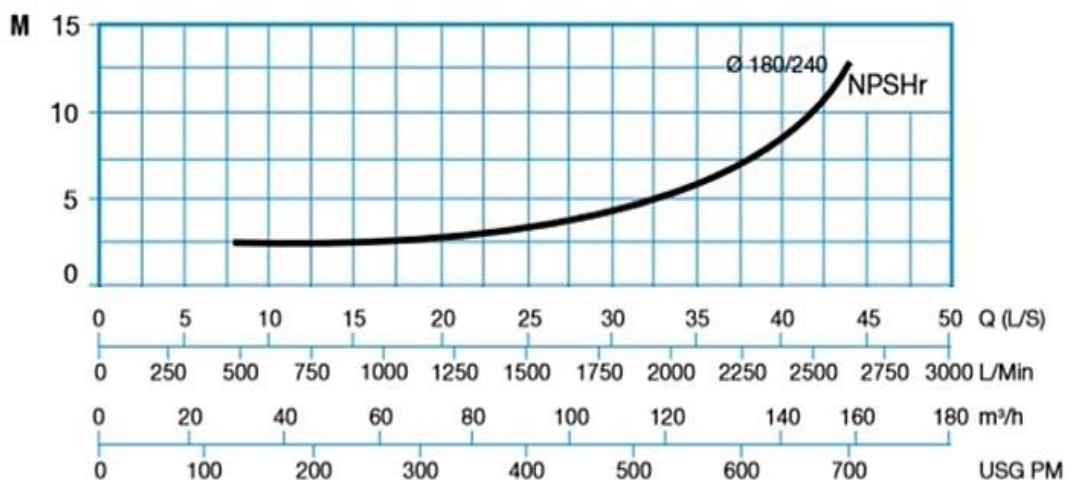


Figura 40: Determinación del $NPSH_r$

Fuente: <https://www.iagua.es/blogs/miguel-angel-monge-redondo/>



Verificando la expresión (4.12):

$$NPSH_d \geq NPSH_r + 0,5 m$$

Si la bomba del módulo diseñado funcionará en forma normal y que no se presentará el problema de la cavitación, reemplazamos los parámetros calculados:

$$5,22267 m \geq 2,5 m + 0,5 m$$

$$5,22267 m \geq 3 m$$

Como se cumple la condición para que no se presente cavitación; entonces concluimos que en la instalación hidráulica diseñada no se originará la cavitación durante su funcionamiento.

4.1.4. Procedimiento Experimental para Graficar Curva Característica H vs. Q

Para graficar la curva del fabricante debemos calcular la altura manométrica (H) en la bomba en funcionamiento del módulo diseñado para lo cual una vez prendida la bomba esperamos unos minutos para que el funcionamiento de la bomba sea estable; luego se procedió a realizar pruebas preliminares de ensayo para tomar las lecturas del rotámetro; vacuómetro y manómetro; accionando la válvula de compuerta se variará el caudal, para tener 8 caudales diferentes para los cuales se tendrá que determinar para cada caudal su correspondiente altura manométrica. La curva del fabricante tiene por abscisas los caudales y en las ordenadas la altura manométrica.

Para determinar experimentalmente aplicamos la ecuación de Bernoulli entre los puntos 1 y 2 del gráfico.

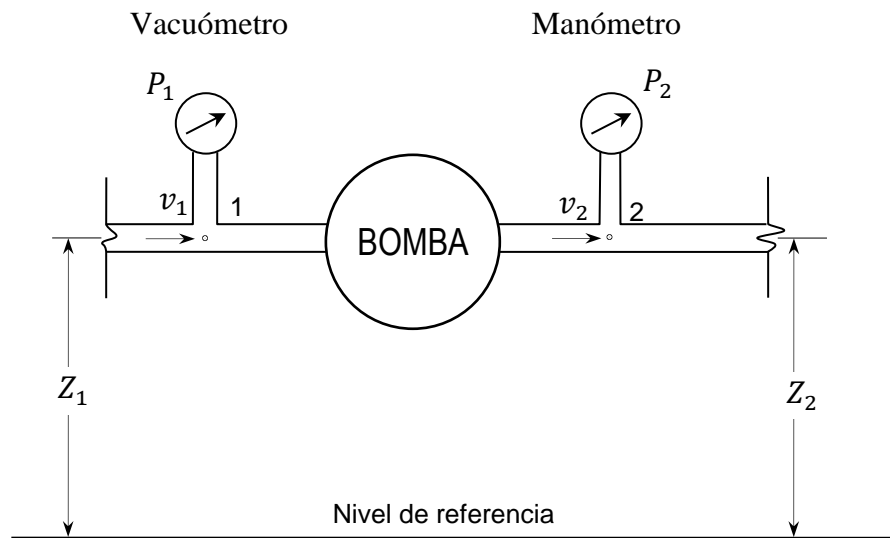


Figura 41: Esquema de la bomba con los instrumentos de presión.

Elaborado por el equipo de trabajo

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre los puntos 1 y 2:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 + H = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2$$

Despejando la altura manométrica:

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + Z_2 - Z_1$$

En la ecuación:

- $Z_2 - Z_1 = 0$, porque los puntos 1 y 2 tienen alturas iguales, $Z_1 = Z_2$.
- $\frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} = 0$, porque las velocidades de los puntos 1 y 2 son iguales $v_1^2 = v_2^2$,

al tener las tuberías de aspiración e impulsión igual diámetro.

Por consiguiente:

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} \quad (4.14)$$

Donde:

P_2 , presión en el manómetro.

P_1 , presión en el vacuómetro, suele ser negativa.

γ , peso específico del agua a la temperatura del laboratorio.

Entonces, la altura manométrica es igual a:

$$H = \frac{P_2 + P_1}{\gamma} \quad (4.15)$$

(+): significa la suma de los valores absolutos de las presiones.

Las lecturas experimentales que se tomaron en el módulo diseñado, para calcular las 8 alturas manométricas correspondientes a los 8 caudales se tabulan en la siguiente tabla:

Tabla 2: Datos experimentales medidos en los instrumentos del módulo diseñado.

N°	CAUDAL	VACUÓMETRO	MANÓMETRO
	Q (L/min)	P_1 (bar)	P_2 (bar)
1	11,70	-0,350	1,000
2	10,80	-0,330	1,100
3	10,00	-0,390	1,230
4	8,90	-0,260	1,600
5	8,10	-0,240	1,800
6	7,40	-0,175	2,000
7	5,30	-0,125	2,200
8	2,50	-0,020	2,580

Elaborado por el equipo de trabajo

Empleando los datos experimentales de las presiones, calcularemos la altura



manométrica para cada caudal, considerando el peso específico del agua a 10°C temperatura del laboratorio, $\gamma = 9810 \text{ N/m}^3$ (1 bar = 10^5 N/m^2).

$$H_1 = \frac{(1,000 + 0,350) \times 10^5 \text{ N/m}^2}{9810 \text{ N/m}^3}$$

$$H_1 = 13,76 \text{ m}$$

- Punto 2:

$$H_2 = \frac{(1,100 + 0,330) \times 10^5 \text{ N/m}^2}{9810 \text{ N/m}^3}$$

$$H_2 = 14,58 \text{ m}$$

- Punto 3:

$$H_3 = \frac{(1,230 + 0,300) \times 10^5 \text{ N/m}^2}{9810 \text{ N/m}^3}$$

$$H_3 = 15,60 \text{ m}$$

- Punto 4:

$$H_4 = \frac{(1,600 + 0,260) \times 10^5 \text{ N/m}^2}{9810 \text{ N/m}^3}$$

$$H_4 = 18,96 \text{ m}$$

- Punto 5:

$$H_5 = \frac{(1,800 + 0,240) \times 10^5 \text{ N/m}^2}{9810 \text{ N/m}^3}$$

$$H_5 = 20,80 \text{ m}$$

- Punto 6:



$$H_6 = \frac{(2,000 + 0,175) \times 10^5 \text{ N/m}^2}{9810 \text{ N/m}^3}$$

$$H_6 = 22,17 \text{ m}$$

- Punto 7:

$$H_7 = \frac{(2,200 + 0,125) \times 10^5 \text{ N/m}^2}{9810 \text{ N/m}^3}$$

$$H_7 = 23,70 \text{ m}$$

- Punto 8:

$$H_8 = \frac{(2,580 + 0,020) \times 10^5 \text{ N/m}^2}{9810 \text{ N/m}^3}$$

$$H_8 = 26,50 \text{ m}$$

Tabulando los parámetros calculados para graficar la curva del fabricante o curva característica.

Tabla 3: Datos experimentales del caudal (Q) y la altura manométrica (H).

Nº	Caudal Q (L/min)	Altura Manométrica P_1 (bar)
1	11,70	13,76
2	10,80	14,58
3	10,00	15,60
4	8,90	18,96
5	8,10	20,80
6	7,40	22,17
7	5,30	23,70
8	2,50	26,50

Elaborado por el equipo de trabajo

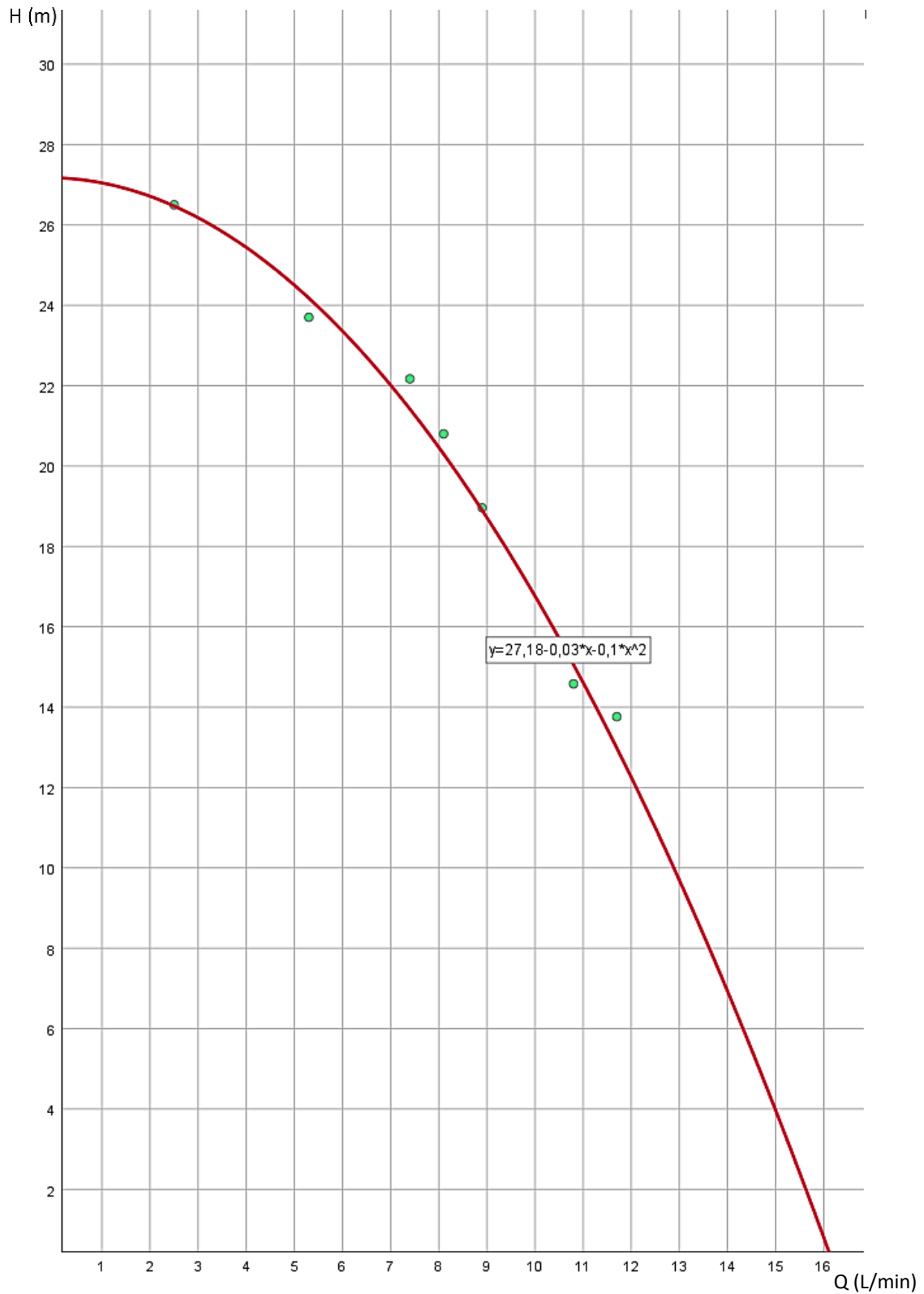


Figura 42: Curva Característica H vs. Q

Elaborado por el equipo de trabajo.



4.1.5. Curva de Homología

Para graficar la curva de homología que es una curva teórica relacionaremos los puntos de semejanza en el ensayo experimental de la bomba hidráulica a una diferente revolución por minuto, aplicando las leyes de semejanza de las bombas hidráulicas.

Primera Ley: Los caudales (Q) de la bomba son directamente proporcionales a las revoluciones por minuto (N).

$$\frac{Q_1}{Q_0} = \frac{N_i}{N_0}$$

Segunda Ley: Las alturas manométricas (H) son directamente proporcionales a los cuadrados de las revoluciones por minuto (N).

$$\frac{H_1}{H_0} = \left(\frac{N_i}{N_0}\right)^2$$

Tercera Ley: Las potencias efectivas (P) de la bomba son directamente proporcionales a los cubos de las revoluciones por minuto (N).

$$\frac{P_1}{P_0} = \left(\frac{N_i}{N_0}\right)^3$$

Aplicando las leyes de semejanza de las bombas, consideramos los caudales (Q_0) y alturas manométricas (H_0) de los ensayos experimentales realizados a 3450 RPM revoluciones por minuto, obtendremos la curva de homología a 2875 RPM revoluciones por minuto. Operando con las leyes obtenemos:



Tabla 4: Caudales (Q_i) y alturas manométricas (H_i) para graficar la curva de homología

N°	ENSAYO EXPERIMENTAL $N_o = 3450$ RPM		TEÓRICO $N_i = 2875$ RPM	
	Q_o (L/min)	H_o (m)	Q_i (L/min)	H_i (m)
1	11,70	13,76	9,75	9,56
2	10,80	14,58	8,99	10,12
3	10,00	15,60	8,33	10,83
4	8,90	18,96	7,42	13,17
5	8,10	20,80	6,75	14,44
6	7,40	22,17	6,17	15,40
7	5,30	23,70	4,42	16,46
8	2,50	26,50	2,08	18,40

Elaborado por el equipo de trabajo

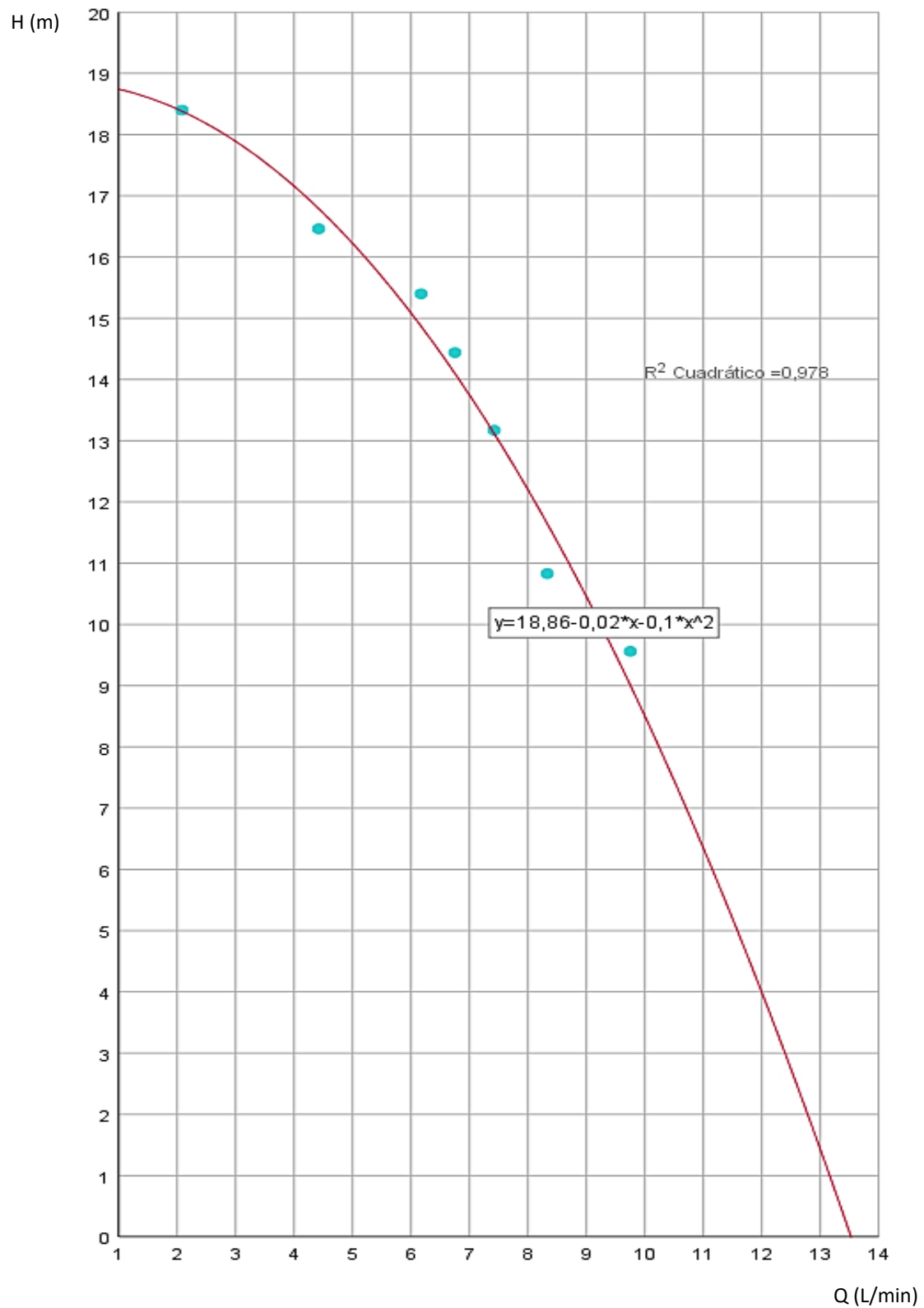


Figura 43:Curva de Homología
Elaborado por el equipo de trabajo.

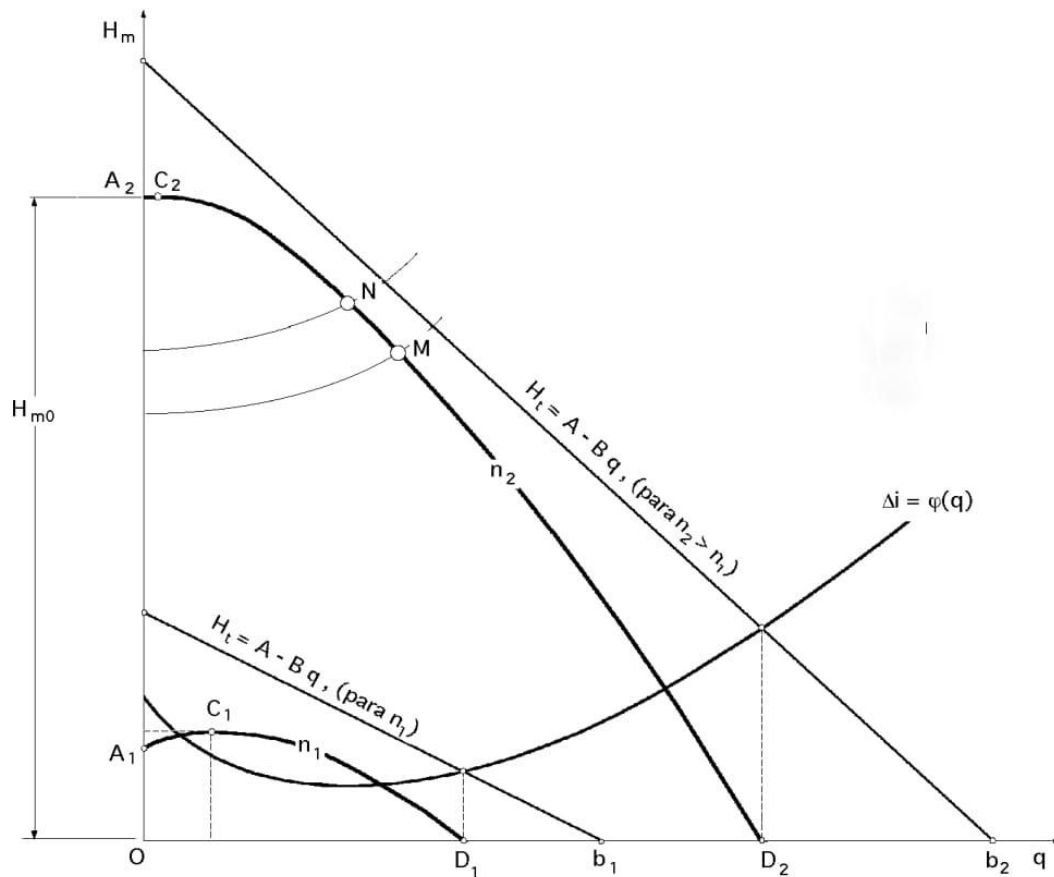


Figura 44: Curva del Fabricante y Curva del Sistema

Elaborado por el equipo de trabajo.

4.2. DISCUSIÓN

Con respecto al diseño del diámetro de las tuberías en instalaciones hidráulicas de mayor dimensión, es posible que los diámetros de las tuberías de aspiración e impulsión sean diferentes por criterios y consideraciones de diseño. En el caso particular del diseño del módulo, siendo el sistema hidráulico muy pequeño con respecto a los sistemas de instalaciones hidráulicas reales; se diseñó considerando que se tendría un solo diámetro de 1 pulgada para todas las tuberías, de aspiración e impulsión; respaldados en recomendaciones técnicas de velocidades máximas del agua circulando por las tuberías de aspiración e impulsión:



- Tubería de aspiración: $v_{\max} = 1,8 \text{ m/s}$
- Tubería de impulsión: $v_{\max} = 2,5 \text{ m/s}$

Nuestra velocidad de diseño, considerando criterios de diseño, como el caudal asumido teniendo en cuenta las necesidades y disponibilidades hidráulicas del módulo diseñado fue de $v = 0,93 \text{ m/s}$; velocidad que cumple o es aceptable respecto a las dos velocidades máximas recomendadas, fundamento que sustenta el criterio de diseño de considerar el mismo diámetro tanto para la tubería de aspiración como para la tubería de impulsión.

En la determinación de la altura manométrica del módulo diseñado, que es la altura útil que proporciona la bomba para que el sistema de bombeo funcione eficientemente, teóricamente se define como la altura de Euler, menos las pérdidas que se generan en el interior de la máquina o sea la bomba. En el diseño de la altura manométrica del módulo de laboratorio, no se pudo aplicar el método de aplicar la ecuación de Bernoulli analizando a la bomba misma de la instalación hidráulica, porque el método es aplicado cuando la bomba está funcionando, lo cual en nuestro proyecto de diseño es imposible porque la bomba se seleccionará posteriormente considerando como dato experimental para ello, la altura manométrica. Razón por la cual se optó por el criterio metodológico de diseño de aplicar la ecuación de Bernoulli analizando a la instalación de bombeo íntegra o completa, con el objetivo de seleccionar la bomba óptima para el módulo diseñado. Al aplicar Bernoulli considerando de manera adecuada para el diseño los puntos de aplicación 1 y 2 en las superficies de agua de los depósitos de aspiración e impulsión nos permitió calcular la altura manométrica en forma apropiada y simple porque al aplicar la ecuación de Bernoulli y despejar la altura manométrica, en su ecuación se eliminan varios términos; como el término referido a las presiones ($P_2 -$

$P_1)/\gamma$ se anula porque como los depósitos de aspiración están abiertos y en contacto directo con la atmósfera sus presiones son iguales y por consiguiente el término de presiones es cero. De igual manera el término de velocidades $(v_2^2 - v_1^2)/2g$, al considerar adecuadamente los puntos 1 y 2 para aplicar la ecuación de Bernoulli, éste término se desprecia, porque las velocidades de las superficies de agua de las áreas de los depósitos de aspiración e impulsión son muy grandes, lo que determina que $v_1^2/2g$ y $v_2^2/2g$ son muy pequeñas que pueden despreciarse desde el punto de vista de la ingeniería, por lo que también el término de velocidades se desprecia en la ecuación de la altura manométrica, sin afectar la exactitud de su cálculo. Por lo que el cálculo de la altura manométrica se resume al cálculo de la altura geodésica $(Z_2 - Z_1)$ que no presenta dificultad por ser la suma de las alturas de aspiración e impresión que se determinan de la arquitectura geométrica de la instalación hidráulica diseñada y; el otro término a calcular se refiere a la pérdida de carga que se generan en las tuberías y accesorios del módulo diseñado, cálculos que tienen procedimientos de cálculos conocidos que se refieren a las pérdidas primarias (h_p) por fricción del agua contra las paredes interiores de las tuberías y a las pérdidas secundarias (h_s) por fricción en los accesorios de la instalación como codos, válvula de globo, válvula de compuerta, manómetro, vacuómetro, etc.

$$H = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + (Z_2 - Z_1) + h_p + h_s$$

cero cero

Entonces:

$$H = \text{altura manométrica} = (Z_2 - Z_1) + h_p + h_s$$



4.2.1. Influencia de la Altitud en el funcionamiento del Módulo Diseñado

La altitud geográfica con respecto al nivel del mar influye significativamente conforme se incrementa en el funcionamiento de máquinas y dispositivos mecánicos y eléctricos. La altitud es un parámetro climatológico que determina la disminución de la presión atmosférica conforme va incrementándose, lo cual determina que la densidad del aire también disminuya.

En la investigación se analizará cómo influye la altitud en el funcionamiento del módulo diseñado, debido a los dos aspectos que determina la disminución de la presión atmosférica y la densidad del aire en función de la altitud geográfica.

La altitud de Puno de 3827 metros sobre el nivel del mar influyó en la presión atmosférica, parámetro climatológico importante el cual se midió experimentalmente en el Laboratorio de Física de la Escuela Profesional de Físico Matemáticas de la universidad, se utilizó un barómetro tipo Fortín marca Leybold de Alemania, cuya determinación experimental se detalla en el ítem 4.1.3.1.

La medida de la presión atmosférica fue de 486 mm Hg.

Es importante agregar que por recomendación experimental la presión atmosférica disminuyó aproximadamente 10% por cada 1000 metros de altitud.

a) Influencia en el motor eléctrico del módulo del laboratorio

El motor eléctrico del módulo es la parte fundamental del módulo porque su potencia determina el funcionamiento del módulo.

La Asociación Nacional de Fabricantes de Equipos Electrónicos (NEMA) de



Estados Unidos establecen las normas técnicas para diseñar y fabricar motores eléctricos para operar a una temperatura ambiental menor a 40°C y a una altitud menor que 1000 metros. Lógicamente la altitud de 3827 metros, excede esos valores y en la selección de la potencia del motor se deben hacer las correcciones necesarias para asegurar la potencia necesaria en la altitud para el funcionamiento eficiente del motor eléctrico. Para una presión atmosférica de 486 mm Hg, la disminución aproximada de la densidad del aire aplicando la Ecuación Universal de los gases de Clapeyron:

$$PV = nRT$$

Operando la densidad del aire en Puno se puede calcular por:

$$\rho_{aire} = \frac{P}{gRT}$$

Donde:

$$\rho = \text{densidad del aire en Kg/m}^3$$

$$P = \text{presión atmosférica en N/m}^2$$

$$P = 486 \text{ mm Hg} = 64791,91 \text{ N/m}^2$$

$$g = \text{aceleración de la gravedad, } 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$T = \text{temperatura, en } ^\circ\text{K; } 10^\circ\text{C (283}^\circ\text{K)}$$

Reemplazando datos en la ecuación anterior:

$$\rho_{aire} = \frac{64791,91 \frac{N}{m^2}}{9,81 \frac{m}{s^2} \times 29,27 \frac{m}{K} \times 283^\circ K}$$

$$\rho_{aire} = 0,797 \frac{Kg}{m^3}$$



La densidad del aire al nivel del mar es de $1,225 \text{ Kg/m}^3$; calculando el porcentaje de disminución del aire en Puno con respecto al nivel del mar es de 34,94%.

Estos dos parámetros climatológicos que son menores a los establecidos al nivel del mar, determinan que en sí la altitud de Puno, influye en el funcionamiento del motor eléctrico de dos maneras que deben ser tema de investigación futura:

1. Sobre el enfriamiento o refrigeración, el motor eléctrico genera calor por pérdidas de fricción, efecto Joule, en los núcleos, etc.; calor que debe ser transferido al ambiente, pero como el aire tiene menor densidad la masa de aire para la refrigeración será menor, lo que determina una refrigeración deficiente del motor que disminuye la potencia a generar.
2. Sobre el aislamiento, el material eléctrico de la bobina pierde sus características como dieléctrico y opera como conductor, como consecuencia de la disminución de la rigidez dieléctrica que depende de la presión atmosférica que al disminuir por la altitud de Puno, provoca la disminución de la rigidez dieléctrica del motor eléctrico.

Para compensar la pérdida de potencia por altitud, utilizamos la tabla de la empresa Siemens de confiabilidad garantizada.

Considerando las condiciones ambientales de temperatura ambiental de 15°C y altitud a Puno de 3827 metros, lo cual dándonos un margen de seguridad consideramos 4000 metros.

Tabla 5: Factor de reducción para variaciones de altura y temperatura de instalación

Altura s.n.m (mts)	<30°C	Temperatura ambiente				56°C a 60°C
		30°C a 40°C	41°C a 45°C	46°C a 50°C	51°C a 55°C	
0	1,07	1,00	0,96	0,92	0,87	0,82
1500	1,04	0,97	0,93	0,89	0,84	0,79
2000	1,00	0,94	0,90	0,86	0,82	0,77
2500	0,96	0,90	0,86	0,83	0,78	0,74
3000	0,92	0,86	0,82	0,79	0,75	0,70
3500	0,88	0,82	0,79	0,75	0,71	0,67
4000	0,82	0,77	0,74	0,71	0,68	0,63

Fuente: www.motores.siemens.com

De la tabla 5 obtenemos un factor de reducción de la potencia para una altura de 4000 metros y temperatura ambiente de 15°C:

$$\text{Factor} : 0,82$$

En el diseño del módulo, se determinó una potencia del motor eléctrico en el ítem 4.1.2, obteniendo una potencia de

$$P_b = 29,82 \text{ W}$$

Por consiguiente, el derrateo o compensación de la potencia necesaria que debe tener el motor eléctrico es de:

$$P_b = \frac{29,82}{0,82} = 36,36 \text{ W}$$

$$P_b = 36,36 \text{ W} = 0,036 \text{ KW}$$

Entonces el módulo de la bomba hidráulica no tendrá problema al funcionar

porque considerando los efectos de la altitud es necesario una potencia para el motor eléctrico de 0,036 KW y, por disponibilidad de motobombas en el mercado el módulo tiene un motor eléctrico de 0,37 KW (0,5 HP), potencia del motor eléctrico superior a la potencia requerida en la instalación hidráulica del módulo.

b) Influencia en el problema de cavitación del módulo

La expresión que analizamos en el ítem 4.1.3 para verificar si en el módulo se presentaría o no el fenómeno de la cavitación:

$$NPSH_d \geq NPSH_r + 0,5m$$

La analizaremos considerando si es influenciada por parámetros que tienen relación con la altitud:

Donde:

$$NPSH_d = \frac{10 \cdot P_{at}}{\gamma} - H_a - P_{ca} - \frac{10 \cdot P_v}{\gamma}$$

Observamos que el único parámetro presión atmosférica (P_{at}) es influenciado por la altitud, pero en los cálculos se utilizó el valor de 486 mm Hg (0,6607 Kg/dm²) determinado experimentalmente para la altitud de Puno. La altura geométrica de aspiración (H_a), la pérdida de carga de aspiración (P_{ca}), la presión del vapor de agua a 10°C (P_v) y el peso específico del agua (γ) no son influenciados por la altitud.

Por consiguiente el $NPSH_d$ disponible considerando la altitud es el mismo que se calculó, es decir:

$$NPSH_d = 6,60964 - 0,70 - 0,56192 - 0,12505$$

$$NPSH_d = 5,22267 m$$



Donde $NPSH_r$ requerido en la instalación hidráulica es determinado gráficamente en función del caudal $Q = 30 \text{ L/min} = 1,8 \text{ m}^3/\text{h}$ que lógicamente no depende de la altitud de Puno, por consiguiente el $NPSH_r$ requerido es determinado en el ítem 4.1.3.2:

$$NPSH_r = 2,5 \text{ m}$$

Entonces la expresión para que no se produzca la cavitación se verifica:

$$NPSH_d \geq NPSH_r + 0,5 \text{ m}$$

$$5,22267 \text{ m} \geq 2,5 \text{ m} + 0,5 \text{ m}$$

$$5,22267 \text{ m} \geq 3 \text{ m}$$

Interpretándose que en la instalación hidráulica del módulo no se producirá cavitación, considerándose la influencia de la altitud de Puno.



V. CONCLUSIONES

En la investigación experimental de la tesis se cumplieron satisfactoriamente los objetivos propuestos, que fueron las guías que nos encaminaron a desarrollar el trabajo con éxito.

1. Se diseñó el módulo de laboratorio para determinar los parámetros de funcionamiento de una bomba hidráulica centrífuga, con la arquitectura física similar a los esquemas teóricos de una instalación de bombeo, criterio de diseño importante que influyó al obtener un módulo didáctico que determinará que en el proceso pedagógico de enseñanza aprendizaje de los estudiantes, se logre adquirir las competencias respectivas al complementarse la experimentación o práctica con la teoría, enseñanza integral fundamental en la ingeniería.
2. En la construcción o montaje del módulo diseñado, se consideraron aspectos técnicos de disponibilidad de espacio físico y seguridad durante el funcionamiento del módulo. En lo referente a la instalación hidráulica del módulo se realizó el montaje de acuerdo a los manuales y catálogos de instrumentos de medición, bomba y accesorios hidráulicos, operaciones realizadas por un técnico en hidráulica ayudado por una persona con experiencia en gasfitería.
3. Se determinaron en forma experimental los principales parámetros de funcionamiento de la bomba hidráulica centrífuga, la determinación de la altura manométrica experimentalmente se calculó considerando todo el sistema hidráulico de bombeo, lo que involucró calcular, la altura geodésica, la altura de aspiración, la altura de impulsión y las pérdidas primarias y secundarias por fricción del agua por tuberías y accesorios. Se calculó la potencia necesaria del sistema de bombeo, considerando los criterios necesarios para tener en cuenta las



pérdidas y eficiencias de los elementos de la instalación hidráulica. Se graficó en forma conveniente la curva del fabricante o curva característica cuyo análisis nos permite comprender el comportamiento de la bomba; para lo cual se midieron varios caudales y, para cada uno se calculó su respectiva altura manométrica considerando para ello a la bomba operando y, midiendo las presiones del vacuómetro y manómetro; los puntos experimentales de la curva H-Q se ajustaron con computadora para obtener la ecuación de la curva del fabricante.

El parámetro de funcionamiento de la altura neta positiva de aspiración (***NPSH***) de una bomba es relevante para que bomba opere sin cavitación, la que causa daños muy graves en los mecanismos e la máquina; para que este fenómeno no se presente se calculó el ***NPSH_d*** disponible y el ***NPSH_r***, requerido y se verificó el cumplimiento de la relación:

$$\mathbf{NPSH_d \geq NPSH_r + 0,5 m}$$



VI. RECOMENDACIONES

1. En base a las conclusiones que se han logrado en el desarrollo de la investigación experimental, se recomienda que los criterios de diseño empleados en el módulo sean replicados en las universidades para diseñar módulos didácticos que se adecuen a las necesidades de los procesos pedagógicos de enseñanza – aprendizaje de cada temática en la ingeniería, para que la formación académica de los estudiantes sea integral y, se complementen los aspectos teóricos y experimentales lo cual es importante en Ingeniería.
2. La construcción y montaje del módulo de laboratorio, permitirá que se planifiquen ensayos técnicos experimentales para los cursos de mecánica de fluidos, diseño de elementos de máquinas, turbomáquinas y laboratorios de ingeniería mecánica; lo que contribuirá a la capacitación de los estudiantes y docentes en los aspectos de diseño mecánico e investigación formativa, en los cuales la universidad peruana está incidiendo en la actualidad.
3. Finalmente se recomienda emular el trabajo experimental emprendido en la tesis, como diseñar módulos didácticos de laboratorios que se presten a las necesidades de enseñanza de la especialidad en ingeniería de cada docente; puesto que en la Escuela Profesional se cuenta con materia de estudio una variedad de sistemas eléctricos y sistemas de automatización.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alfaro, C. (2013). Metodología de Investigación Científica Aplicado a la Ingeniería. Instituto De Investigación De La Facultad De Ingeniería Eléctrica Y Electrónica, 53(9), 1689-1699.
http://www.unac.edu.pe/documentos/organizacion/vri/cdcitra/Informes_Finales_Investigacion/IF_ABRIL_2012/IF_ALFARO RODRIGUEZ_FIEE.pdf
- Ardila, A., Rodriguez, C., & Gomez, R. (2019). Diseño y construcción de un banco de bombas centrifugas.
- Arviza, J., & Balbastre, I. (2020). El proyecto como pilar del aprendizaje en ingeniería agronómica. 157-165.
- Bernal, C. (2010). Metodología de la Investigación. In Prentice hall.
- Budynas, R., & Keith, J. (2012). Diseño en Ingeniería Mecánica.
- Cajo, S., & López. (2012). Diseño y Construcción de un Banco de Pruebas para la Determinación de la Eficiencia de Bombas Centrifugas Domiciliarias. 151.
- Castillo, J. (2021). Optimización básica del rodete de una bomba centrífuga de 500 vatios mediante dinámica de fluidos computacional. Tesis, Universidad Antonio Nariño, Tunja, Colombia.
- Castro, J. & Paredes, I. (2004). Implementación de un módulo de bombas radiales. Tesis, EPIME, Universidad Nacional del Altiplano de Puno.
- Cohen, N., & Gomez, G. (n.d.). Metodología de la Investigación. In 2018 (Vol. 59).
- Gálvez, V. & Torres, W. (2020). Influencia de la rugosidad y material del impulsor sobre



la altura, potencia y rendimiento de una bomba centrífuga. Tesis, Universidad César Vallejo, Trujillo, Perú.

Graciano, J. (2019). Caracterización de una bomba centrífuga operando como turbina, utilizando técnicas de simulación computacional de fluidos. Tesis, Instituto Tecnológico Metropolitano, Medellín, Colombia.

Hernandez, R. (n.d.). Metodología de la investigación (Vol. 59).

Huapaya, C., & Ginocchio, J. (2017). Guía de investigación en Ciencias e Ingeniería (Vol. 1).

Leiva, L., & Ucharico, R. (2015). Diseño y Construcción de un Módulo de Ensayo de Bombas en Serie-Paralelo para determinar la curva característica de operación- Fim-Uncp. In Universidad Nacional Del Centro Del Centro De Posgrado.

Lizarraga, J. (2017). Mejora tecnológica para el aumento de vida útil en bombas centrífugas. Tesis, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Perú.

Mataix, C. (1986). Ingeniería - Claudio Mataix - Mecánica de Fluidos y Maquinas Hidráulicas. Pdf.

Melo, O., López, L., & Melo, S. (2020). Diseño de Experimentos Métodos y Aplicaciones. In Diseño de Experimentos Métodos y Aplicaciones. <https://doi.org/10.36385/fcbog-4-0>

Moncada, Y. (2021). Laboratorio para el estudio de bombas centrífugas para la universidad Antonio Nariño sede Cúcuta. Uan.Edu.Co.

Mott, R. L. (2006). Medición de flujo. In Mecánica de fluidos (pp. 479-482).



- Ortiz, M. (2016). Laboratorio Bombas centrífugas. Grupo Energía Alternativa- Universidad de Antioquia, 13.
- Paredes, C. (2019). Diseño y Construcción de un Módulo de Bombas Centrífugas e Implementación de Guías Prácticas Para el Estudio de sus Principales Características.
- Quispe, A., & Maquera, J. (2019). Diseño y construcción de un módulo de laboratorio para el análisis de los parámetros de una bomba centrífuga de 1HP como turbina. 178.
http://tesis.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/10591/Quispe_Alfredo_Maquera_Juan.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Ruiz, J. (2019). “Diseño e implementación de un prototipo de modulo didáctico de caudal para medir su influencia en el aprendizaje de la instrumentación y control industrial” Ingeniero Mecatrónico.
- Suarez, E. (2019). Estudio de mantenimiento preventivo de bombas centrífugas para distribución de agua potable, que pueda ser realizado en bancos de pruebas confiables. Tesis, Universidad Autónoma San Francisco, Arequipa, Perú.
- Vargas, S. (2016). Estudio del fenómeno de la cavitación en una bomba centrífuga de 1 hp y su influencia en los parámetros de rendimiento energético en la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica. Tesis, universidad Técnica de Ambato, Ecuador.



ANEXOS

ANEXO 1

GUÍA DE LABORATORIO N° 1

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA ALTURA MANOMÉTRICA DE UNA BOMBA HIDRÁULICA CENTRÍFUGA

A. OBJETIVO

Determinar experimentalmente la altura manométrica (H_m) de una bomba hidráulica.

B. EQUIPO

Módulo para el estudio del comportamiento de una bomba hidráulica:

- Bomba hidráulica
- Manómetro
- Vacuómetro
- Válvula de compuerta de impulsión
- Rotámetro

C. PROCEDIMIENTO

1. Comprobar que hay agua en los depósitos.
2. Abrir completamente la válvula de compuerta de impulsión.
3. Arrancar la bomba.
4. Cerrar lentamente la válvula de compuerta y fijar el caudal.
5. Anotar lecturas del manómetro, vacuómetro y rotámetro.
6. Repetir los pasos 4 y 5; ocho veces.
7. Antes de apagar la bomba, dejar circular el agua al menos 1 minuto.

D. TEORÍA

Aplicando la ecuación de Bernoulli entre el vacuómetro (1) y el manómetro (2) se determinará la altura manométrica (H_m) de la bomba:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{v_1^2}{2g} + Z_1 + H_m = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{v_2^2}{2g} + Z_2$$

Despejando:

$$H_m = \frac{P_2 - P_1}{\gamma} + \frac{v_2^2 - v_1^2}{2g} + Z_2 - Z_1 \quad (I)$$



Considerando que los puntos: (1) y (2) estarán a la misma altura: $Z_1 = Z_2$; entonces $Z_2 - Z_1 = 0$, y que los diámetros de las tuberías de impulsión y operación serán del mismo diámetro: $v_1 = v_2$; entonces $v_2^2 - v_1^2 = 0$.

Por consiguiente, la ecuación (I):

$$H_m = \frac{P_2 - P_1}{\gamma}$$

donde: P_2 : lectura del manómetro

P_1 : lectura del vacuómetro

γ : peso específico del agua

E. DATOS EXPERIMENTALES

LECTURAS	VACUÓMETRO	MANÓMETRO	ROTÁMETRO
	P_1 (bar)	P_2 (bar)	Q (L/h)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			



ANEXO 2

GUÍA DE LABORATORIO N° 2

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DEL FABRICANTE DE UNA BOMBA HIDRÁULICA CENTRÍFUGA

A. OBJETIVO

Graficar la curva característica H-Q de una bomba hidráulica.

B. EQUIPO

Módulo para el estudio del comportamiento de una bomba hidráulica:

- Bomba hidráulica
- Manómetro
- Vacuómetro
- Rotámetro
- Válvula de compuerta de impulsión
- Depósitos de agua

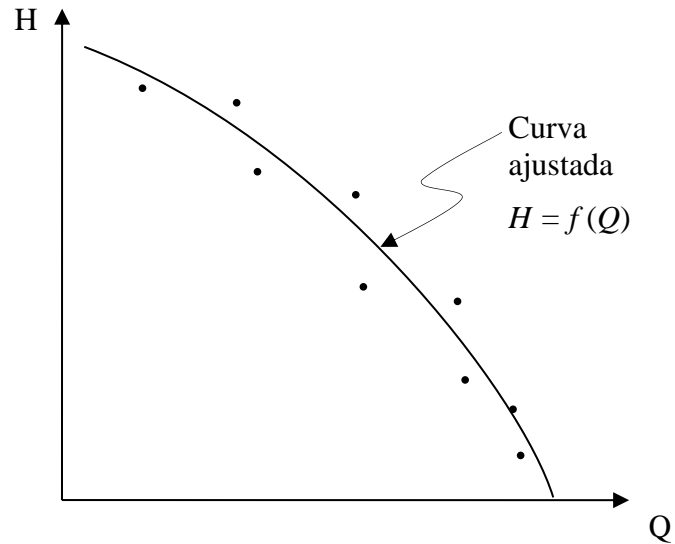
C. PROCEDIMIENTO

1. Comprobar que hay agua en los depósitos.
2. Abrir completamente la válvula de compuerta de impulsión.
3. Arrancar la bomba.
4. Cerrar lentamente la válvula de compuerta y fijar el caudal.
5. Anotar lecturas del manómetro, vacuómetro y rotámetro.
6. Repetir los pasos 4 y 5; ocho veces.
7. Antes de apagar la bomba, dejar circular el agua al menos 1 minuto.

D. TEORÍA

La curva característica H-Q de una bomba hidráulica es aquellas donde se puede analizar al comportamiento de una bomba, es decir, al graficar la curva característica, esta nos servirá para predecir la altura manométrica para un caudal específico y viceversa.

Experimentalmente obtendremos 8 puntos que tendrán la tendencia parabólica que teóricamente se sabe que tendrá la curva.



Para determinar la función matemática de la curva: $H = f(Q)$, los 8 puntos determinados experimentalmente, se tendrá que ajustar con la ayuda de la computadora (EXCEL, MATLAB) para determinar su función matemática respectiva.

E. DATOS EXPERIMENTALES

LECTURAS	VACUÓMETRO	MANÓMETRO	ROTÁMETRO
	P ₁ (bar)	P ₂ (bar)	Q (L/h)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			

F. RESULTADOS

LECTURAS	Q (m ³ /S)	H (m)
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		



ANEXO 3

GUÍA DE LABORATORIO N° 3

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS PÉRDIDAS PRIMARIAS Y SECUNDARIAS DE UNA INSTALACIÓN HIDRÁULICA DE UNA BOMBA HIDRÁULICA CENTRÍFUGA

A. OBJETIVO

Graficar la curva del sistema de una bomba hidráulica.

B. EQUIPO

Módulo para el estudio del comportamiento de una bomba hidráulica:

- Bomba hidráulica
- Manómetro
- Vacuómetro
- Rotámetro
- Válvula de compuerta de impulsión
- Codo 90°
- Válvula de alcachofa
- Venturímetro
- Tubería de fierro galvanizado
- Uniones universales de fierro galvanizado
- Depósitos de agua

C. PROCEDIMIENTO

1. Comprobar que hay agua en los depósitos.
2. Abrir completamente la válvula de compuerta de impulsión.
3. Arrancar la bomba.
4. Cerrar lentamente la válvula de compuerta y fijar el caudal.
5. Anotar lecturas del manómetro, vacuómetro y rotámetro.
6. Repetir los pasos 4 y 5; ocho veces.
7. Antes de apagar la bomba, dejar circular el agua al menos 1 minuto.

D. TEORÍA

La curva del sistema de una bomba es aquellas cuyas ordenadas para graficar la curva del sistema de tuberías de una bomba es necesario determinar las pérdidas primarias y secundarias en el sistema de bombeo del módulo.



Las pérdidas primarias se deben a las pérdidas de energía que experimenta el fluido debido a la fricción contra las paredes internas de la tubería, se determina a través de la ecuación de Darcy.

$$h_p = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{v^2}{2g}$$

donde: L : longitud de la tubería (m)
 D : diámetro de la tubería (m)
 v : velocidad de flujo promedio (m/s)
 f : factor de fricción (sin dimensiones)

El factor de fricción se determinará en el diagrama de Moody, para lo cual se determinará el número de Reynolds y la rugosidad de la pared de la tubería.

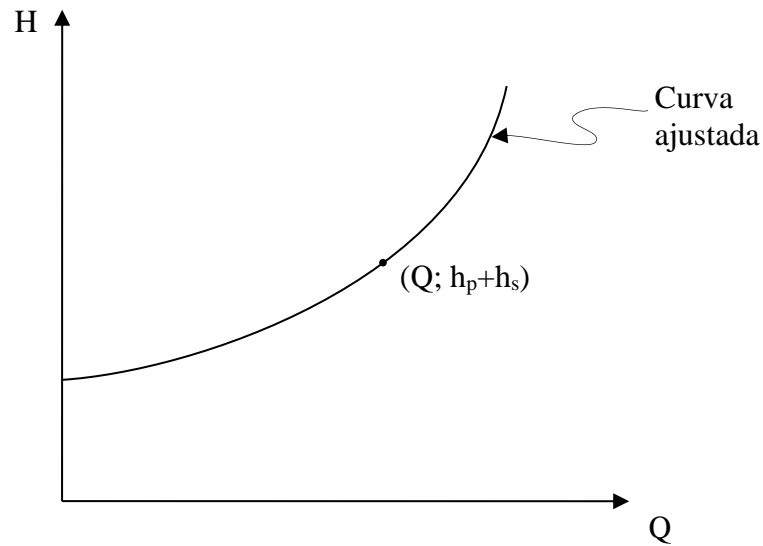
Para cada caudal se determinará su correspondiente velocidad ($V = Q/A$) y número de Reynolds ($Re = V \cdot D/\nu$); los otros parámetros permanecen constantes.

Las pérdidas secundarias se deben a la pérdida de energía, que experimenta el fluido debido al cambio de dirección o cuando la trayectoria de flujo se encuentra obstruida por dispositivos hidráulicos como válvulas, codos, etc. Se determinará por la siguiente ecuación:

$$h_s = K \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Donde K es el coeficiente de pérdidas de energía de cada dispositivo hidráulico, que se obtiene de los catálogos respectivos.

La curva del sistema de la bomba tendrá las siguientes coordenadas.



h_0 : altura geodésica del sistema de bombas

E. DATOS EXPERIMENTALES

LECTURAS	ROTÁMETRO
	Q (L/h)
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	

F. RESULTADOS

LECTURAS	Q (m ³ /S)	v (m/S)	h _p (m)	h _s (m)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				



ANEXO 4

GUÍA DE LABORATORIO N° 4

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE LA POTENCIA DE UNA BOMBA HIDRÁULICA CENTRÍFUGA

A. OBJETIVO

Graficar la potencia de la bomba que impulsará el sistema de bombeo.

B. EQUIPO

Módulo para el estudio del comportamiento de una bomba hidráulica:

- Bomba hidráulica
- Manómetro
- Vacuómetro
- Rotámetro
- Válvula de compuerta de impulsión
- Depósitos de agua

C. PROCEDIMIENTO

1. Comprobar que hay agua en los depósitos.
2. Abrir completamente la válvula de compuerta de impulsión.
3. Arrancar la bomba.
4. Cerrar lentamente la válvula de compuerta y fijar el caudal.
5. Anotar lecturas del manómetro, vacuómetro y rotámetro.
6. Repetir los pasos 4 y 5; ocho veces.
7. Antes de apagar la bomba, dejar circular el agua al menos 1 minuto.

D. TEORÍA

La potencia de la bomba que impulsará el agua a través del sistema de bomba (tuberías y dispositivos hidráulicos) deberá ser calculado experimentalmente, porque al comprar la bomba se ha de especificar el caudal y la altura manométrica que nos permitirán calcular la potencia de la bomba.

$$P = \frac{\gamma QH}{76}$$

Donde:

γ : peso específico del agua en Kgf/m³

Q : Caudal en m³/s

H : altura manométrica en m



P : Potencia en HP

E. DATOS EXPERIMENTALES

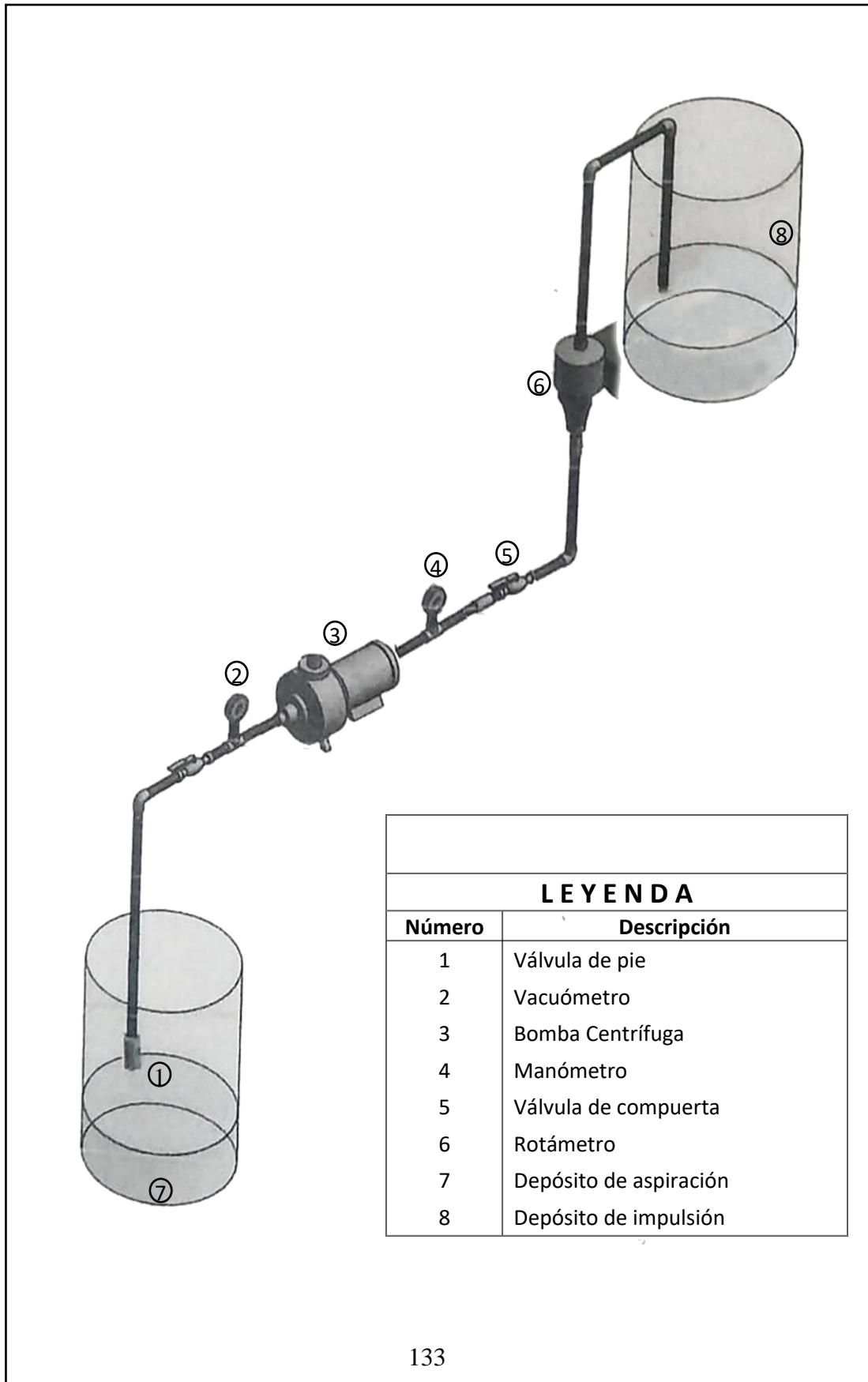
LECTURAS	VACUÓMETRO	MANÓMETRO	ROTÁMETRO
	P_1 (bar)	P_2 (bar)	Q (L/h)
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			

F. RESULTADOS

LECTURAS	Q (m^3/S)	H (m)	γ (Kgf/m^3)	P (HP)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

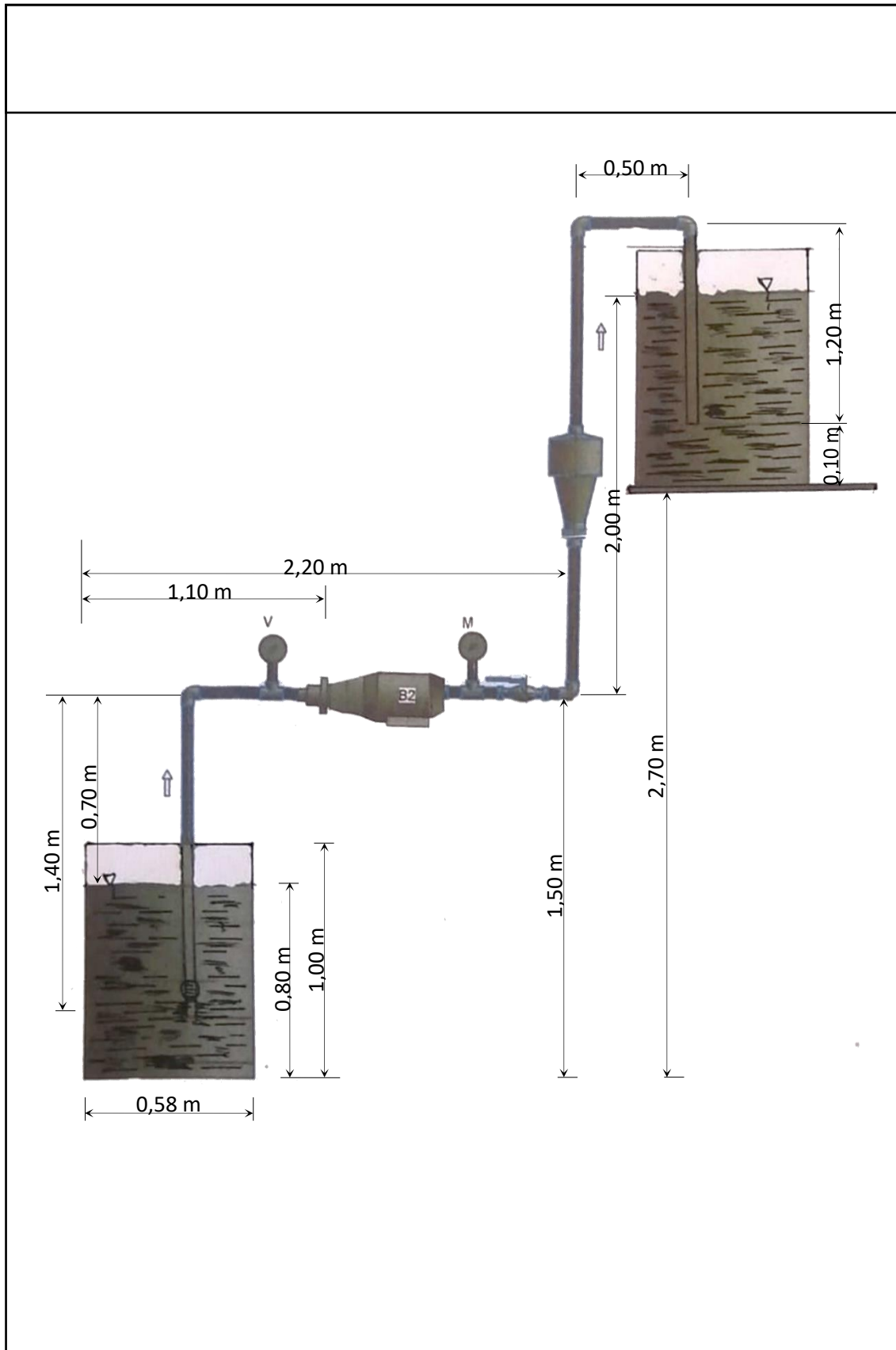
ANEXO 5

DIBUJO ISOMÉTRICO DE LA INSTALACIÓN HIDRÁULICA DE BOMBEO DEL MÓDULO DISEÑADO



ANEXO 6

DIMENSIONES DE LA INSTALACIÓN HIDRÁULICA DEL MÓDULO DISEÑADO



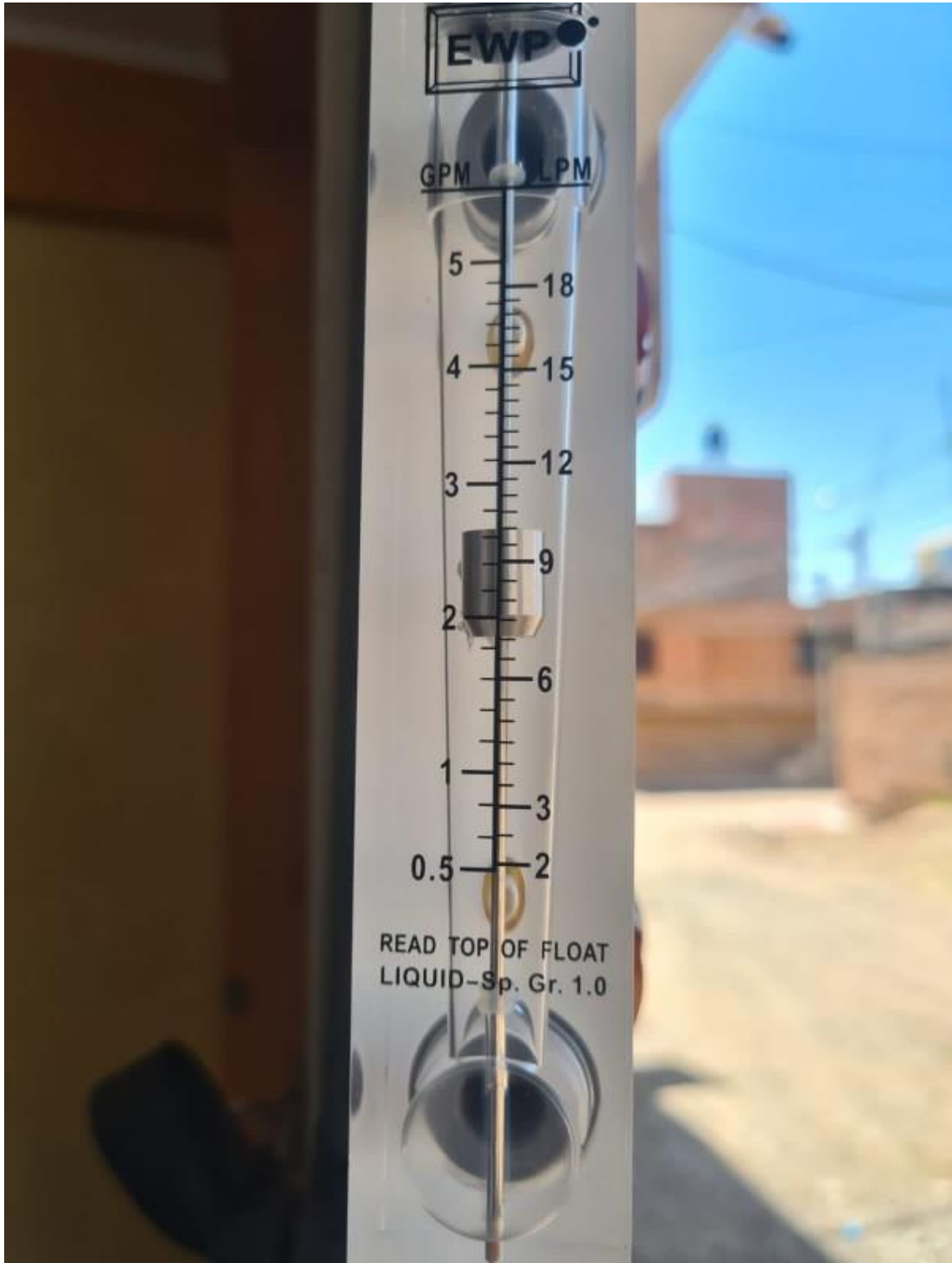


ANEXO 7 CONSTRUCCIÓN DEL MÓDULO



ANEXO 8

FUNCIONAMIENTO DEL ROTÁMETRO





ANEXO 9

MODULO Y SUS ACCESORIOS





DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo, **Johny Javier Bruna Torres**, identificado con DNI N° 45550134 y **Dennis Condori Cahuana** identificado DNI N° 45422117, en nuestra condición de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MODULO DE LABORATORIO PARA LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DE UNA BOMBA HIDRÁULICA CENTRIFUGA Y GRAFICAR SU CURVA CARACTERÍSTICA H vs . Q”

Es un tema original.

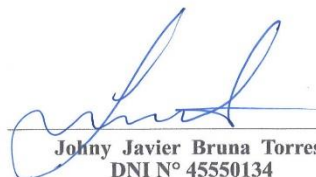
Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.


En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno, 11 de Septiembre del 2023


Johny Javier Bruna Torres
DNI N° 45550134



Huella


Dennis Condori Cahuana
DNI N° 45422117



Huella



AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo **Johny Javier Bruna Torres**, identificado con DNI N° 45550134 y **Dennis Condori Cahuana**, identificado con DNI N° 45422117, en nuestra condición en mi de egresado de:

Escuela Profesional, Programa de Segunda Especialidad, Programa de Maestría o Doctorado

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA ELÉCTRICA

informo que he elaborado el/la Tesis o Trabajo de Investigación denominada:

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN MODULO DE LABORATORIO PARA LA DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DE UNA BOMBA HIDRÁULICA CENTRIFUGA Y GRAFICAR SU CURVA CARACTERÍSTICA H VS. Q”

para la obtención de Grado, Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

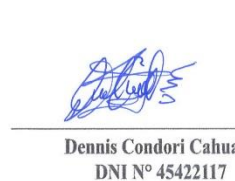
En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno, 11 de Septiembre del 2023


Johny Javier Bruna Torres
DNI N° 45550134



Huella


Dennis Condori Cahuana
DNI N° 45422117



Huella