



UNIVERSIDAD DE
COSTA RICA

FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN
SISTEMA HIDRÁULICO CON FINES
DIDÁCTICOS PARA UN LABORATORIO
UNIVERSITARIO DE MÁQUINAS
HIDRÁULICAS.

Trabajo final de graduación sometido a la consideración de la

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

como parte de los requisitos
para aspirar al título y grado de

LICENCIATURA EN INGENIERÍA MECÁNICA

Adrián Fallas Sandí A31921

Ciudad Universitaria Rodrigo Facio
Marzo de 2022

Hoja de tribunal

Este proyecto de graduación fue aceptado por la Comisión de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Costa Rica, como requisito parcial para optar por el grado y título de Licenciatura en Ingeniería Mecánica.



Director de la Unidad Académica
Dr. Pietro Scaglioni Solano
Director Escuela de Ingeniería Mecánica



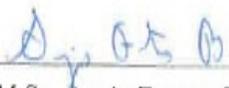
Asesor director
M.Sc. Juan Gabriel Monge Gapper
Escuela de Ingeniería Mecánica



Asesor interno
Lic. Daniel Murillo García
Escuela de Ingeniería Mecánica



Asesor externo
Lic. Alejandro Jiménez Arias
MicroVention Medical



Docente curso IM-0418
M.Sc. Sergio Ferreto Brenes
Escuela de Ingeniería Mecánica



Ponente
Adrián Fallas Sandí

Índice general

Índice de ilustraciones	vi
Resumen	vii
Abstract	vii
1. Introducción	1
1.1. Descripción general	1
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos	2
1.3. Justificación	3
1.4. Antecedentes	3
1.5. Metodología general	4
1.6. Alcance y limitaciones	5
2. Marco teórico	6
2.1. Turbinas hidráulicas	6
2.1.1. Potencia hidráulica	6
2.1.2. Turbinas Francis	7
2.1.3. Turbinas Pelton	9
2.1.4. Parámetros adimensionales de turbinas	11
2.2. Bombas centrífugas	12
2.2.1. Geometría de rotores centrífugos	12
2.2.2. Ecuación de conservación	14
2.2.3. Cabeza de succión neta positiva	15
2.3. Carga dinámica total	16
2.3.1. Curvas de la bomba	19
2.3.2. Succión y descarga	23
2.4. Parámetros adimensionales	27
2.4.1. Conexión en serie	29
2.4.2. Conexión en paralelo	30
2.5. Tuberías y accesorios	32
2.5.1. Criterios de selección	32
2.5.2. Accesorios	33
2.5.3. Pérdidas de energía por fricción	34
2.6. Instrumentación	38
2.6.1. Flujómetros	38
2.6.2. Manometría	40

2.6.3. Variables eléctricas	41
3. Diagnóstico y equipamiento	43
3.1. Docencia	43
3.2. Inventario	48
3.2.1. Turbinas	48
3.2.2. Bombas centrífugas	50
3.2.3. Accesorios y tubería existente	51
3.2.4. Módulos didácticos	52
3.2.5. Equipos comerciales	58
4. Sistema de bombas centrífugas	63
4.1. Diseño	63
4.2. Materiales	71
4.3. Construcción	73
4.4. Funcionamiento	77
4.4.1. Explicación del funcionamiento del sistema	77
4.4.2. Manipulación de válvulas	80
4.5. Resultados	81
4.5.1. Cabeza dinámica total (TDH)	81
4.5.2. Cabeza de succión neta positiva (NPSH)	85
4.5.3. Sistema en serie	87
4.5.4. Sistema en paralelo	89
5. Guías de laboratorio	92
5.1. Turbina Pelton	92
5.2. Turbina Francis	98
5.3. NPSH	104
5.4. TDH	109
5.5. Sistema en serie	113
5.6. Sistema en paralelo	117
6. Conclusiones	121
7. Recomendaciones	124
A. Anexo I: Ficha técnica de las bombas centrífugas	128
B. Anexo II: Diagrama del diseño del sistema de tuberías	132

Índice de figuras

2.1. Una turbina de reacción de eje vertical (Cengel, Cimbala, 2006)	8
2.2. Entrada del agua a los alabes. (Zamora, Viedma, 2016).	9
2.3. Turbina de impulsión tipo Pelton. a) Vista lateral, marco de referencia absoluto, y b) vista de una sección transversal, del inyector y una cuchara. (Cengel, Cimbala, 2006).	10
2.4. Variables principales empleadas para el análisis dimensional de una turbina. (Cengel, Cimbala, 2006).	11
2.5. a) Alabes inclinados hacia atras. b) Alabes radiales. c) Alabes inclinados hacia adelante. (Cengel,Cimbala, 2006).	12
2.6. Vistas frontal y lateral de un bomba centrífuga. (Cengel, Cimbala, 2006). . . .	13
2.7. Volumen de control (sombreado) que se usa para analizar la cantidad de movimiento angular del flujo en una bomba centrífuga. (Cengel, Cimbala, 2006). . .	14
2.8. Elementos básicos de un sistema de bombeo. (Zamora, Viedma, 2016).	16
2.9. Ejemplo de un sistema de bombeo, en donde se debe de subir un fluido. (Cengel, Cimbala, 2006).	18
2.10. Curva de rendimiento de una bomba centrífuga, carga (TDH) vs caudal. (Cengel, Cimbala, 2006).	19
2.11. Curva de rendimiento de una bomba centrífuga, carga vs caudal. (Cengel, Cimbala, 2006).	20
2.12. Curva de rendimiento de una bomba centrífuga, carga vs caudal y curva de eficiencia. (Zamora, Viedma, 2016).	20
2.13. Curva de rendimiento de una bomba centrífuga para diversos rodetes y sus respectivas curvas de eficiencia. (Mott, 2006).	21
2.14. Curvas de rendimiento de la bomba centrífuga que se usará para el proyecto. (Goulds Pumps, 2009).	22
2.15. Ejemplos de una succión negativa y positiva. (Mott, 2006).	24
2.16. Altura mínima de succión. (Goulds Pumps, 2021).	25
2.17. Ejemplo de una tubería de descarga. (Mott, 2006).	26
2.18. Análisis dimensional de una bomba . (Cengel, Cimbala, 2006).	27
2.19. Curvas para bombas en serie. (Cengel, Cimbala, 2006).	29
2.20. Curvas para bombas en paralelo. (Cengel, Cimbala, 2006).	31
2.21. Imagen del flujómetro de tipo rotámetro. (Fuente propia).	38
2.22. Imagen del flujómetro de resorte opuesto. (Fuente propia).	39
2.23. Imagen del flujómetro de tipo turbina. (Fuente propia).	39
2.24. Imagen de los manómetros utilizados. (Fuente propia).	40
2.25. Imagen de un Mano-vacuómetro. (Fuente propia).	40

2.26. Imagen del interruptor trifásico. (Fuente propia).	41
2.27. Imagen del panel. (Fuente propia).	41
2.28. Imagen del variador de frecuencia. (Fuente propia).	42
3.1. Turbina Francis. Fuente: Gunt Hamburg, 2016.	48
3.2. Turbina Pelton. Fuente: Gunt Hamburg, 2016.	49
3.3. Imagen de instrumentos reutilizables. (Fuente propia).	51
3.4. Imagen de estructura, tanques, panel y variador. (Fuente propia).	51
3.5. Módulo básico. (Fuente: Gunt Hamburg, 2016).	52
3.6. Equipo para crear y estudiar vórtices. (Fuente: Gunt Hamburg, 2016).	53
3.7. Descarga horizontal por orificios. (Fuente: Gunt Hamburg, 2016).	53
3.8. Descarga vertical por orificios. (Fuente: Gunt Hamburg, 2016).	54
3.9. Pérdidas en tuberías. (Fuente: Gunt Hamburg, 2016).	54
3.10. Medición de caudal. (Fuente: Gunt Hamburg, 2016).	55
3.11. Ensayo de Osborne Reynolds. (Fuente: Gunt Hamburg, 2016).	55
3.12. Túnel de viento. (Fuente: Propia, 2021).	56
3.13. Anemómetro. (Fuente: Propia, 2021).	56
3.14. Viscosímetro. (Fuente: Propia, 2021).	57
3.15. Bomba centrífuga marca GUNT. (Fuente: Gunt Hamburg, 2018).	58
3.16. Bomba centrífuga sobre la base HM 150. (Fuente: Gunt Hamburg, 2018).	58
3.17. Módulo en paralelo y serie sobre la base HM 150. (Fuente: Gunt Hamburg, 2014).	59
3.18. Banco de bombas en serie y paralelo. (Fuente: Edibon, 2017).	59
3.19. Banco de bombas centrífugas. (Fuente: Pignat, 2022).	60
3.20. Banco de prueba de bombas centrífugas. (Fuente: Veneta, 2022).	61
4.1. Diagrama de diseño. (Fuente propia).	66
4.2. Diseño de banco para bombas centrífugas. (Fuente propia).	73
4.3. Base para bombas centrífugas. (Fuente propia).	74
4.4. Sistema presentado. (Fuente propia).	75
4.5. Soportería del sistema. (Fuente propia).	76
4.6. Sistema de válvulas. (Fuente propia).	78
4.7. Sistema de válvulas. (Fuente propia).	79
4.8. Curva de TDH. (Fuente propia).	83
4.9. Curva de potencia. (Fuente propia).	84
4.10. Curvas NPSH práctico y requerido. (Fuente propia).	86
4.11. Gráfica TDH sistema en serie. (Fuente propia).	88
4.12. Gráfica del sistema en paralelo. (Fuente propia).	90
5.1. Turbina Pelton, HM 150.19. Fuente: Gunt Hamburg.	93
5.2. Turbina Pelton, HM 150.19. Fuente: Gunt Hamburg.	94
5.3. Módulo básico, HM 150. Fuente: Gunt Hamburg.	94
5.4. Tacómetro. Fuente: Gunt Hamburg.	95
5.5. Módulo básico, HM 150. Fuente: Gunt Hamburg.	98
5.6. Turbina Francis, HM 150.20. Fuente: Gunt Hamburg.	99
5.7. Tacómetro. Fuente: Gunt Hamburg.	99
5.8. Turbina Francis. Fuente: Gunt Hamburg.	100
5.9. Sistema de válvulas. Fuente: Propia.	104

A.1. Especificaciones técnicas de la bombas centrífugas. (Goulds Pumps, 2009).	129
A.2. Curvas de operación. (Goulds Pumps, 2009).	130
A.3. Dimensiones de las bombas centrífugas. (Goulds Pumps, 2009).	131
B.1. Diagrama del diseño de sistema de tuberías. (Fuente propia).	133
B.2. Acercamiento a las bombas en el diagrama. (Fuente propia).	134

Resumen

Se propuso diseñar en su componente técnica, pedagógica y física una serie de prácticas de laboratorio para complementar el currículo del curso universitario de Máquinas Hidráulicas a cargo de la Escuela de Ingeniería Mecánica. Se aprovecharon para el efecto, los equipos existentes en el actual recinto y se propusieron además, equipos menores para suplir aquellos temas para los que no hay experiencia aplicada a la fecha. El principal aporte material de este trabajo fue el diseño, comprobación, construcción y redacción de cada una de las prácticas de laboratorio. Se destaca que el equipo diseñado y construido es original, pues fué creado específicamente para responder a los objetivos del curso, además su diseño utiliza materiales disponibles en el mercado nacional permitiendo al estudiante entender más acerca de la construcción. Este sistema presenta alta semejanza con la realidad pues utiliza tanques de almacenamiento claramente separados entre sí, conectados por tuberías. Además se redactan guías de laboratorio de acuerdo con los objetivos del curso y el equipo disponible.

Abstract

It was proposed to design in its technical, pedagogical and physical component a series of laboratory practices to complement the curriculum of the university course on Hydraulic Machines in charge of the School of Mechanical Engineering. For this purpose, the existing teams in the current venue were used and, in addition, smaller teams were proposed to supply those issues for which there is no applied experience to date. The main material contribution of this work was the design, verification, construction and writing of each of the laboratory practices. It is highlighted that the equipment designed and built is original, since it was created specifically to respond to the objectives of the course, in addition its design uses materials available in the national market allowing the student to understand more about the construction. This system is highly similar to reality as it uses storage tanks clearly separated from each other, connected by pipes. In addition, laboratory guides are written according to the objectives of the course and the available equipment.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Descripción general

Ante la necesidad de un sistema de bombas centrífugas funcional, surge la necesidad de diseñarlo y construirlo con el propósito de utilizarlo para el curso de máquinas hidráulicas de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UCR sede Rodrigo Facio, por lo cual se realizó lo siguiente:

Se elaboró un inventario de todos los materiales que había en dicho laboratorio. Se realizó un diseño preliminar de un equipo de bombas para el cual se pueda calcular el TDH, NPSH de cada bomba, así como utilizar el sistema en serie y en paralelo, por lo cual se discutió el diseño con el docente del curso de máquinas hidráulicas con quien se acordaron ajustes, derivando en correcciones y luego de otros ajustes se llegó a un diseño final que cumplía con las necesidades académicas y los objetivos del programa del curso. Luego, de acuerdo a las dimensiones del laboratorio de fluidos, se realizó un plano de planta para distribuir todos los equipos allí presentes. Luego se cotizó los materiales necesarios y se procedió a su compra con fondos de la Escuela de Ingeniería Mecánica, con el fin de poder entregar una solución de bajo costo se procedió a reutilizar algunos componentes del antiguo laboratorio. Se procedió a iniciar el ensamble según el diseño, al mismo tiempo se coordinó las acciones necesarias para el debido funcionamiento tales como instalación trifásica para las bombas, conexión de las bombas a la caja de control del variador de frecuencia, esto con los departamentos de mantenimiento y maquinaria de la Facultad de Ingeniería de la UCR. En paralelo a estas acciones se fueron redactando las prácticas de laboratorio. Una vez habilitada la conexión eléctrica y finalizada la construcción del sistema de bombas centrífugas se procedió a probarlas, se verificó que el sistema funcionaba correctamente de acuerdo al diseño, por lo cual se procedió a aplicar todas las guías de laboratorio y con los datos obtenidos (mediciones en manómetros, vacuómetros, flujómetros, voltaje, corriente) se realizaron las gráficas indicadas en las guías de laboratorio, todo acorde al diseño y de manera correcta.

El propósito de este proyecto es dotar al Laboratorio de Fluidos de un sistema de bombas centrífugas ajustado a los requerimientos del curso de Máquinas Hidráulicas, según la teoría vista en clase. Se diseñó de manera que este sistema ofrezca amplia gama de posibilidades a la hora de impartir prácticas de laboratorio. También se redactan guías de laboratorio que pueden ser realizadas con este equipo, estas corresponden a los temas de mayor importancia que se desarrollan durante el curso.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Elaborar y comprobar el diseño físico de los equipos y los protocolos de ejecución para prácticas de laboratorio del área de máquinas hidráulicas.

Proporcionar a la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Costa Rica el diseño y la puesta en marcha de un sistema hidráulico capaz de proveer al estudiante la experiencia práctica óptima que complementa el conocimiento teórico del curso Máquinas Hidráulicas. Además, proporcionar las correspondientes guías de laboratorio específicamente elaboradas para el sistema mecánico previamente diseñado, las cuales garanticen una experiencia académica óptima para el estudiante durante su formación académica en dicho laboratorio.

1.2.2. Objetivos específicos

- Identificar los tópicos centrales del curso los cuales deberán ser cubiertos posteriormente por el sistema a diseñar y las prácticas del laboratorio. Los mismos deberán de estar alineados con la carta al estudiante para dicho curso.
- Diseñar un sistema que incorpore las tuberías, accesorios, máquinas hidráulicas y cualquier otro requerido para que el estudiante ponga en práctica los tópicos centrales del curso. Se deberá de proveer las justificaciones técnicas para los componentes seleccionados, utilizando las buenas prácticas de ingeniería y estándares de la industria..
- Seleccionar según la disponibilidad del mercado los componentes mecánicos necesarios para construir el sistema. Si la disponibilidad en el mercado no permite conseguir alguno de los elementos seleccionados, se deberá de actualizar los cálculos y el diseño previo para que contemple los nuevos componentes..
- Construir y poner en marcha el sistema mecánico diseñado previamente. La ubicación de este será el espacio designado al laboratorio de máquinas hidráulicas de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Costa Rica en la Sede Rodrigo Facio. Conexiones eléctricas y anclajes mecánicos deberán de ser implementados utilizando las buenas prácticas de ingeniería y atendiendo los lineamientos de facilidades del edificio ubicado dentro del campus de la universidad. Botones de paro de emergencia, así como cualquier otro requerimiento que garantice la seguridad del estudiante deberá de ser implementado.
- Elaborar los planos mecánicos del sistema hidráulico seleccionado. Se deberá incluir lista de materiales, equipos y diagramas del ensamble. Los diagramas deberán de contar con la nomenclatura estándar para sistemas hidráulicos y deberán de incluir toda la información pertinente al sistema implementado.
- Elaborar una guía de laboratorio que permita al profesor y al estudiante poner en práctica todos los conocimientos teóricos del curso en el sistema mecánico previamente diseñado y construido. La guía deberá contener el paso a paso de cómo ejecutar las prácticas, así como las precauciones y plantillas para realizar los reportes de laboratorio correspondientes.

1.3. Justificación

Durante los años 2018, 2019 y 2020 el laboratorio de máquinas hidráulicas no estuvo en uso, pues el sistema fue desarmado, las tuberías fueron cortadas y parte de la estructura perdió funcionalidad. Implementar su debido diseño, construcción y redacción de prácticas, permitirá a estudiantes de años venideros poder experimentar de manera directa todo lo previamente analizado de manera teórica en el aula. La Escuela de Ingeniería Mecánica en su afán de alcanzar siempre la excelencia académica y los más altos estándares de tecnología y pedagogía requiere de laboratorios con equipo representativo para los sistemas actuales de la industria así como un laboratorio con la capacidad de proveer al estudiante prácticas efectivas que pongan a prueba los conocimientos teóricos.

Las asignaturas relacionadas con fluidos y aspectos relacionados a estos se componen de un análisis teórico llevado a cabo en el aula y de un análisis práctico llevado a cabo en un laboratorio diseñado con dicho propósito. Actualmente la facultad de Ingeniería de la UCR, sede Rodrigo Facio cuenta con instalaciones de muy reciente construcción, ubicadas en la Ciudad de la Investigación en San Pedro de Montes de Oca. Dentro de dicho espacio la Escuela de Ingeniería Mecánica cuenta con aulas, taller y laboratorios amplios y con diseños modernos. Sin embargo cuando la escuela se mudó en 2018 desde el edificio antiguo al actual, los equipos de laboratorio fueron desarmados, perdiendo su funcionalidad. Además, no se cuenta con planos ni con el diseño anterior, del cual hay reportes verbales de un mal funcionamiento, por lo cual es necesario iniciar desde un principio con un nuevo diseño. Este proyecto pretende rediseñar el sistema de bombas centrífugas, para de esta manera crear las prácticas acorde con el equipo.

1.4. Antecedentes

En el primer ciclo lectivo del año 2018 la facultad de Ingeniería de la UCR sede Rodrigo Facio, se mudó a las nuevas instalaciones (edificio de aulas, talleres, laboratorios) ubicadas en la ciudad de la investigación. Durante décadas previas la facultad de ingeniería se ubicó dentro de la sede Rodrigo Facio, la escuela de Ingeniería Mecánica tenía su taller y laboratorios funcionando. Durante el año 2017 debido al cambio de instalaciones, se debió desarmar todos los equipos, componentes, documentos y demás objetos pertenecientes a la Escuela, estos fueron empacados y luego enviados a las nuevas instalaciones. Ya en el nuevo edificio, durante el año 2018 se desempacó y ordenó el material, en sus respectivos destinos. Debido a que el sistema de máquinas hidráulicas fue desarmado, perdió su funcionalidad por lo cual no se podía impartir el laboratorio práctico correspondiente. Cabe mencionar que no habían planos de sistema o algún diseño, por lo cual es necesario crear el diseño desde un inicio, aprovechando este aspecto para mejorar el equipo de laboratorio según las necesidades didácticas correspondientes.

En el año 2021 la Escuela de Ingeniería Mecánica adquiere un moderno y apto equipo de laboratorio orientado al área de fluidos, este equipo que se menciona vendrá a fortalecer la posibilidad de impartir prácticas de laboratorio, junto con el equipo que se plantea diseñar e implementar mediante este trabajo final de graduación.

1.5. Metodología general

Con la intención de habilitar el laboratorio de máquinas hidráulicas de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la UCR, a continuación se muestra un cronograma que describe los pasos y tareas pertinentes para la puesta en marcha.

- Realizar un inventario de los equipos disponibles dentro del laboratorio.
- Obtener los manuales de uso y de servicio básico de los equipos de laboratorio inventariados.
- Llevar a cabo una prueba puntual del funcionamiento de los equipos que así lo permitan.
- Entrevistar a los docentes de los cursos de fluidos para determinar los temas de sus cursos que consideran que requieren práctica de laboratorio.
- Elaborar una lista de potenciales prácticas de laboratorios que se podrían llevar a cabo con el equipo disponible.
- Proponer un conjunto de ensambles para el equipamiento requerido para la ejecución satisfactoria de las prácticas de laboratorio propuestas.
- Someter a revisión la lista de prácticas de laboratorios y los equipos y ensambles asociados a una comisión evaluadora designada por la Escuela de Ingeniería Mecánica.
- Elaborar diagramas de construcción y una lista de materiales requeridos para la implementación funcional de las prácticas de laboratorio.
- Gestionar la reparación y puesta a punto de las bombas centrífugas para su uso en el banco de pruebas.
- Gestionar la instalación de la acometida eléctrica requerida para la operación satisfactoria de las bombas que pertenecen al banco de pruebas
- Ensamblar la plataforma estructural y poner en marcha los equipos asociados al banco de pruebas de bombas y turbinas.
- Redactar las guías de laboratorio correspondientes a las prácticas directamente asociadas a los cursos que tengan en su contenido curricular el tema de máquinas hidráulicas.
- Ejecutar las guías de laboratorio y corroborar su correcto diseño.
- Elaborar una guía audiovisual demostrativa para la operación básica del sistema de bombas en serie y paralelo.

1.6. Alcance y limitaciones

Mediante este proyecto se pretende poner en funcionamiento el equipo necesario para impartir los laboratorios del curso de Máquinas Hidráulicas, en caso de necesitar algún material para cumplir dicho propósito se gestionará por medio de la escuela de Ingeniería Mecánica su adquisición, sin embargo se reutilizarán los componentes tales como válvulas, flujómetros, manómetros, pertenecientes a equipos ahora fuera de funcionamiento, lo anterior con el fin de brindar un solución económica a tal proyecto. Se desea al finalizar el proyecto contar con un equipo debidamente instalado y con guías de laboratorio acorde.

Se indica que se tiene conocimiento de que el sistema internacional (SI) es el sistema de unidades oficial en Costa Rica. Sin embargo en este documento se utilizará también un sistema alterno, a razón de que las fichas técnicas de las bombas centrífugas están en este sistema, además otros instrumentos de medición presentan este sistema de unidades alterno. Con la finalidad de trabajar con las fichas técnicas originales del fabricante, aspecto muy importante en la práctica al emplear equipo técnico, es que se mostrarán datos de un sistema de unidades alterno. Se agrega además que el país tiene gran influencia del mercado estadounidense, por lo cual mucho del equipo centrifugo muestra sus datos de fabricante en el sistema inglés, como es el caso del equipo utilizado en este documento, por lo cual se desea mantener este aspecto con el fin de ajustarse a la realidad del mercado.

Otro aspecto importante a resaltar es que para este diseño y los respectivos laboratorios a realizar, el fluido empleado será agua. Cabe indicar que en caso de utilizar otro tipo de fluido se deberá tomar en cuenta la densidad de este y realizar los ajustes necesarios. Además los datos de presión indicados corresponden a la presión absoluta.

En cuanto a las prácticas de NPSH, se indica que la curva a graficar como parte de los resultados de funcionamiento, será el NPSH disponible del sistema práctico, dicha gráfica será comparada con el NPSH requerido del fabricante. De esta manera se podrá determinar en laboratorio cuando se presenta la cavitación y luego al graficar los datos medidos se podrá corroborar que las curvas muestren dicho comportamiento. Es importante aclarar que no se graficará el NPSH disponible del diseño, pues se requiere de una bomba sumergible para poder variar el caudal que ingresa al sistema, con la cual no se cuenta.

Capítulo 2

Marco teórico

Por medio de este capítulo se presentan las bases teóricas tomadas en cuenta para realizar el diseño, construcción y redacción de guías, para el laboratorio de máquinas hidráulicas. Se explican conceptos, se presentan ecuaciones, tablas, figuras con información referente al tema de interés.

2.1. Turbinas hidráulicas

2.1.1. Potencia hidráulica

La energía puede encontrarse en diferentes manifestaciones, tales como: química, eléctrica, mecánica, potencial, cinética por ejemplo. Cuando el recurso hídrico (agua) se encuentra en las alturas como lo son las montañas buscará la forma de ir al mar, esto debido a que contiene una cantidad de energía potencial que la impulsa a moverse. Una vez que la energía potencial del líquido es suficiente para provocar el movimiento esta se convertirá en cinética al bajar hacia el mar. En este punto es cuando la ingeniería aprovecha este fenómeno de la naturaleza para tomar partida, pues por medio de máquinas diseñadas para tomar esa energía presente en el agua, se realizan obras de construcción para captar, almacenar y conducir el recurso hídrico hasta donde están estas máquinas llamadas turbinas, las cuales toman la energía del líquido y la transforman en energía mecánica que luego por medio de un generador eléctrico se producirá energía eléctrica de calidad, la cual estará lista para su debida utilización.

Las caídas de masas de agua, producidas por los desniveles existentes en los cauces por donde estas aguas discurren, han sido utilizadas desde la antigüedad para producir energía mecánica por medio de ruedas de paletas y de cajones que, aunque eran artefactos rudimentarios, tenían aplicaciones tales como elevar agua de riego o mover molinos de grano (Zamora, Viedma, 2016).

Actualmente, el aprovechamiento de la energía hidráulica disponible en los saltos de agua mediante turbinas en las centrales hidroeléctricas constituye un importante recurso para la producción de energía eléctrica, y una de las principales aplicaciones de la maquinaria hidráulica. Podría decirse que esta es la forma más conocida de aprovechamiento de la energía hidráulica. La energía hidráulica convencional se ha relacionado tradicionalmente con la energía potencial disponible en un salto o desnivel entre masas de agua. La denominación Energía Hidroeléctrica se asocia entonces a la obtención de energía mecánica en un sistema rodete-eje, aprovechada en un generador eléctrico (Zamora, Viedma, 2016).

En las máquinas hidráulicas, particularmente en aquellas en las que el intercambio de energía tiene lugar en un elemento giratorio llamado rodete (turbo máquinas), el flujo es en general a altos números de Reynolds. El número de Reynolds es el parámetro adimensional que relaciona los efectos convectivos y difusivos, de modo que por encima de un cierto valor crítico, puede decirse que el flujo pasa de laminar a turbulento. Las máquinas motoras extraen energía mecánica del fluido, como ocurre con las turbinas hidráulicas, las turbinas de vapor, las turbinas de gas y las aeroturbinas (Zamora, Viedma, 2016).

Si el recurso hídrico posee energía y el humano por medio de turbinas toma parte de esta energía convirtiéndola en energía mecánica, para luego por medio de un generador producir energía eléctrica, entonces surge la pregunta respecto a cuanta energía se puede obtener de una determinada masa de agua en ciertas condiciones específicas. Para lo que son aprovechamientos hídricos, la potencia en la turbina se puede hallar por medio de la siguiente ecuación.

$$Potencia = \eta\gamma QH \quad (2.1)$$

Donde:

η : es la eficiencia de la turbina.

γ : es el peso específico del fluido (N/m^3).

Q : es el caudal (m^3/s).

H : la diferencia de altura aprovechable (m).

2.1.2. Turbinas Francis

Las turbinas son dispositivos que producen energía porque extraen la energía del fluido y transforman la mayor parte de esa energía a una forma de energía mecánica, casi siempre mediante una flecha rotatoria. El fluido en la descarga de la turbina experimenta una pérdida de energía, por lo general en forma de pérdida de presión (Cengel, Cimbala, 2006).

La turbina Francis es del tipo radial, de manera que el agua entra en los alabes de forma radial, al referirse a radial se desea indicar el radio de un círculo por ejemplo. Se utiliza la energía estática del agua y es utilizada para saltos (caídas de agua) de entre 30 y 550 metros, con caudales de 10 a 200 metros cúbicos por segundo, este tipo de turbina es empleada por lo general para grandes caudales antes que para grandes saltos. Está compuesta por la carcaza; el distribuidor; el rodete; el desfogue; y el sistema de regulación.

La *carcaza* es un ducto alimentador, circular de diámetro decreciente, que rodea el rotor, alimentando el agua necesaria para la operación de la turbina. Generalmente es de lámina de acero.

El *rodete* está conformado por los alabes, los cuales están soportados por un plato perpendicular al eje de la máquina, de ese plato arrancan siguiendo la dirección radial, tomando en forma progresiva un alabeo y abriéndose hacia la dirección radial, presentando una forma abocanada, tanto más acentuada cuanto mayor sea la acción axial exigida a la turbina. Los alabes se sujetan al final a un anillo para dar la debida rigidez al conjunto.

El *distribuidor* lo constituyen una serie de alabes directores móviles en forma de persiana circular, que rodea el rotor. La orientación de estos alabes se puede modificar con la ayuda de un servomotor, lo que permite imponer al fluido la dirección de ataque exigida por el rodete móvil y además regular el caudal de acuerdo con la potencia pedida por la turbina desde un valor máximo a un valor cero en posición cerrada. Un servomotor se encarga de mover

en forma simultánea el grupo de alabes del distribuidor regido por el gobernador del grupo turbina generador que regula la velocidad de giro del eje.

El *desfogue* es un tubo por donde el agua luego de haber entregado una gran cantidad de energía al rodete, es expulsada del sistema, cabe agregar que al haber perdido mucha energía el desfogue es una salida lenta de agua (comparada con la entrada) para luego dirigirse por una canal y volver al río. Da salida al agua y al mismo tiempo produce una ganancia estática hasta el valor de presión atmosférica. Se logra así una presión más baja a la atmosférica y por lo tanto un gradiente de presión dinámica más alta a través del rodete. Este trayecto se explica en la figura 2.1, en la que una turbina de reacción llena una voluta con agua arremolinada que impulsa al rotor. Para aplicaciones de hidroturbinas, el eje es por lo común vertical. Se muestran las vistas superior y lateral, incluidas las aspas guía fijas y las aspas guía ajustables.

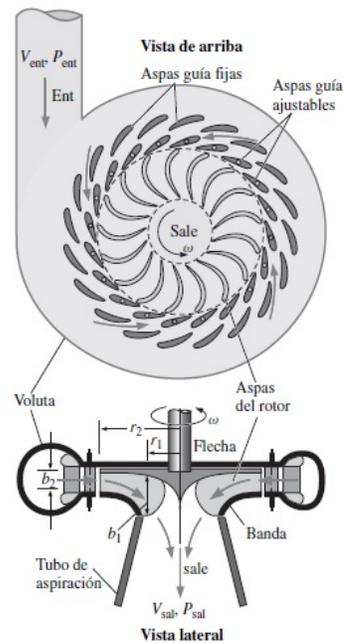


Figura 2.1: Una turbina de reacción de eje vertical (Cengel, Cimbala, 2006)

2.1.3. Turbinas Pelton

Las Pelton son turbinas de acción de tipo tangencial, el termino tangencial se refiere a que el chorro de agua hace impacto de manera tangencial (al círculo) en los alabes del rodete, que en este caso son cucharas de forma elipsoidal con una arista central, dispuestas en la periferia de la rueda.

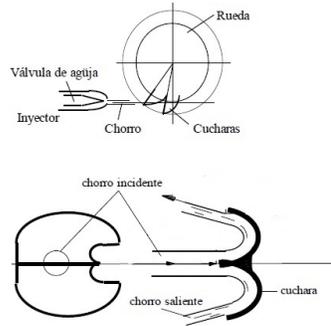


Figura 2.2: Entrada del agua a los alabes. (Zamora, Viedma, 2016).

Las turbinas Pelton se utilizan para grandes saltos de agua, de más de cien metros. Utiliza la energía cinética del agua, esta es dirigida por medio de tuberías hacia la turbina, la energía cinética del agua se genera a través de uno o varios inyectores de sección circular colocadas al final de la tubería de presión, el caudal es regulado mediante agujas de cierre instaladas en los inyectores.

El rendimiento de la turbina se relaciona con la velocidad del rodete y la del chorro de agua, de manera que el agua empujará al rodete para que este se mueva a la velocidad del chorro. Los inyectores lanzan el agua en una dirección para impactar las cucharas, al ocurrir esto el agua cambiará de dirección, para poder realizar este cambio el agua impactará en la cuchara, mediante acción y reacción ocurrirá que el chorro cambiará su dirección, ocasionando el impulso en el rodete para girar. Sin embargo y de acuerdo a la figura 2.2 la mayor cantidad de energía que podría dar el chorro a las cucharas es si el agua cambiará totalmente su dirección, eso es que se devolviera, de esa manera la reacción en el rodete sería máxima, pero esto no podría ocurrir pues de suceder los dos chorro que se devuelven en las cucharas chocarían con las cucharas siguiente frenando el rodete, por lo cual existirá un ángulo de salida del chorro que permita al agua de reacción no interferir con el sistema.

En una turbina Pelton, el coeficiente de pérdidas en la cuchara tiene normalmente valores entre 0,06 y 0,1 %. Las pérdidas en el inyector representan en torno al 2-4 % de la potencia total. En estas condiciones, el rendimiento hidráulico suele tener valores entre 0,9 y 0,93 (Zamora, Viedma, 2016).

En una instalación de turbinado con turbinas Pelton, es posible disponer de varias ruedas en paralelo, y a su vez, que cada rueda trabaje con varios chorros. El diseño se establece de forma unitaria, es decir, referido a lo que se obtiene por un chorro sobre una rueda. De esta manera, se hallará la potencia total de la central multiplicando la potencia unitaria por el número de chorros y por el número de ruedas (Zamora, Viedma, 2016).

Las partes de una turbina Pelton son las siguientes:

- Colector espiral: recoge y lleva el agua hacia el inyector.
- Válvula de cierre: Impide el paso del fluido.
- Sistema de frenado hidráulico: El agua, proyectada a gran velocidad sobre la zona convexa (la parte trasera de las cucharas) de los álabes, favorece el rápido frenado del rodete, cuando las circunstancias lo exigen.
- Deflector: desvía el chorro fuera de la rueda cuando la turbina se queda violentamente sin carga por alguna avería en el sistema de generación y distribución de energía eléctrica al que da servicio la turbina.
- Inyector: Alimenta, regula (caudal) y orienta el agua hacia los álabes.
- Rodete: esta pieza hace contacto directo con el chorro de agua, el cual la hace girar provocando el movimiento de rotación, está compuesto por cucharas.
- Servomotores de control de deflectores: controlar la posición de los deflectores según convenga.

En este tipo de turbina, la flecha de la turbina gira cuando el fluido de alta velocidad de uno o más chorros incide en las cucharas montadas en el rodete.

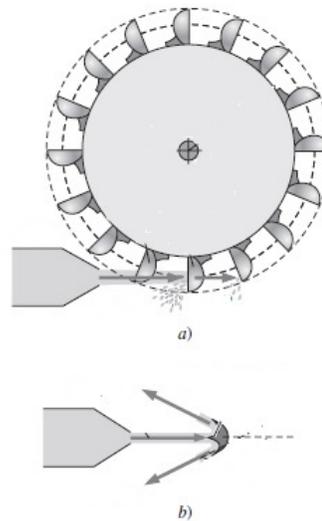


Figura 2.3: Turbina de impulsión tipo Pelton. a) Vista lateral, marco de referencia absoluto, y b) vista de una sección transversal, del inyector y una cuchara. (Cengel, Cimbala, 2006).

2.1.4. Parámetros adimensionales de turbinas

Una magnitud adimensional es una cantidad sin una dimensión física asociada, siendo por tanto un número puro que permite describir una característica física sin dimensión ni unidad de expresión explícita. Las magnitudes adimensionales se definen a menudo como productos, razones o relaciones de cantidades que si tienen dimensiones, pero cuyas dimensiones se cancelan cuando sus potencias se multiplican.

Las magnitudes adimensionales se definirán por medio de la variables que se mencionan a continuación: La gravedad multiplicada por la carga hidrostática neta (gH), gasto volumétrico (\dot{V}), diámetro de las aspas del rotor (D), velocidad rotacional del rotor (ω), la potencia al freno producida (bhp) y la densidad del fluido (ρ), como se ilustra en la figura.

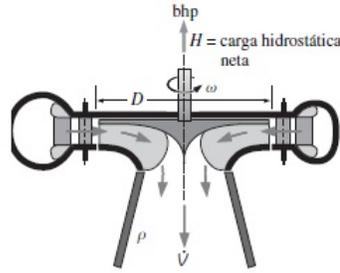


Figura 2.4: Variables principales empleadas para el análisis dimensional de una turbina. (Cengel, Cimbala, 2006).

Parámetros adimensionales de turbina (Cengel, Cimbala, 2006):

$$\Pi_i = f(g, H, D, \rho, \omega, \dot{V}, bhp) \quad (2.2)$$

C_H = Coeficiente de carga hidrostática

$$C_H = \frac{g * H}{\omega^2 * D^2} \quad (2.3)$$

C_P = Coeficiente de potencia

$$C_P = \frac{bhp}{\rho * \omega^3 * D^5} \quad (2.4)$$

C_Q = Coeficiente de capacidad

$$C_Q = \frac{\dot{V}}{\omega * D^3} \quad (2.5)$$

$\eta_{turbina}$ = Coeficiente de potencia

$$\eta_{turbina} = \frac{bhp}{\rho * g * H * \dot{V}} \quad (2.6)$$

Cuando se grafican las curvas de rendimiento de la turbina se usa C_P . Los parámetros C_H y C_Q son funciones de C_P . De manera que:

$$\eta_{turbina} = \frac{C_P}{C_Q * C_H} \quad (2.7)$$

Velocidad específica de las turbinas:

Se define la velocidad específica de la turbina (N_{St}), a saber, en términos de C_P y C_H :

$$N_{St} = \frac{(C_P)^{1/2}}{(C_H)^{5/4}} \quad (2.8)$$

Al sustituir las ecuaciones 2.2 y 2.3 en la ecuación 2.7 y despejar obtenemos:

$$N_{St} = \frac{\omega * (bhp)^{1/2}}{\rho^{1/2}(g * H)^{5/4}} \quad (2.9)$$

2.2. Bombas centrífugas

La palabra bomba es un término general que designa a cualquier máquina hidráulica que añade energía a un fluido, transfieren la mayor parte de esta energía mediante una flecha rotatoria. El incremento en la energía hidráulica se experimenta como un aumento en la presión del fluido (Cengel, Cimbala, 2006).

2.2.1. Geometría de rotores centrífugos

En la terminología de las bombas, todo el ensamble que gira y que consiste en la flecha, los álabes del impulsor, el núcleo y el refuerzo del impulsor se denomina rodete o rotor. El fluido entra de manera axial a través de la parte central hueca de la bomba (el ojo), después del cual el fluido enfrenta los álabes rotatorios, adquiere velocidad tangencial y radial por la transferencia de cantidad de movimiento por parte de los álabes, y adquiere velocidad radial adicional por las fuerzas llamadas centrífugas, que son en realidad falta de fuerzas centrípetas para sostener el movimiento circular. Los rotores pueden presentar distintos tipos de orientación en los alabes, ser abiertos o cerrados (Cengel, Cimbala, 2006).

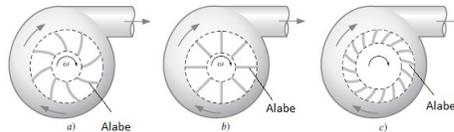


Figura 2.5: a) Alabes inclinados hacia atras. b) Alabes radiales. c) Alabes inclinados hacia adelante. (Cengel,Cimbala, 2006).

El flujo sale del rotor después de ganar tanto velocidad como presión cuando es lanzado radialmente hacia afuera del rotor hacia la voluta. La voluta es un difusor en forma de caracol cuyo objetivo es desacelerar el movimiento rápido del fluido que abandona los bordes posteriores de los álabes del rotor, debido a lo cual aumenta todavía más la presión del fluido, combina y dirige el flujo desde todos los pasajes entre los álabes hacia una salida común. Si el

flujo es estacionario en sus valores promedio, si es incompresible y si los diámetros de entrada y salida son iguales, la velocidad media del flujo en la salida es idéntica a la de la entrada. Por tanto, no es necesariamente la velocidad, sino la presión la que se incrementa desde la entrada hasta la salida a través de una bomba centrífuga.

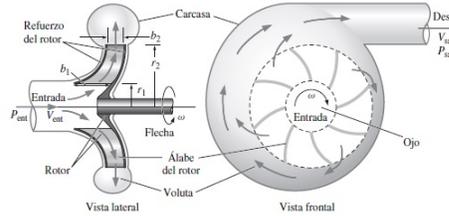


Figura 2.6: Vistas frontal y lateral de un bomba centrífuga. (Cengel, Cimbala, 2006).

Es común que sean motores eléctricos los que impulsan el eje de la bomba, este motor toma la potencia del suministro eléctrico del laboratorio y lo trasfiere por medio del eje al rodete. Ahora bien, la potencia se define como la rapidez a que se realiza un trabajo. En la mecánica de fluidos se modifica dicho enunciado y se considera que la potencia es la rapidez con que se transfiere la energía. La potencia que imprime la bomba al fluido se calcula con la siguiente ecuación. (Mott, 2006).

$$P = h * \gamma * Q \quad (2.10)$$

Donde: P es la potencia que se agrega al fluido (W); h es la carga dinámica total, TDH (m); γ es el peso específico del fluido (N/m^3); y Q es el caudal (m^3/s).

Respecto a la eficiencia de la bomba, se denota como la relación de la potencia transmitida por la bomba al fluido y la potencia que se suministra a la bomba. Debido a las pérdidas de energía por fricción mecánica en los componentes de la bomba, fricción del fluido y turbulencia excesiva en esta, no toda la potencia de entrada se transmite al fluido. Entonces, si se denota la eficiencia mecánica con el símbolo e_M , tenemos (Mott, 2006):

$$e_M = \frac{P_h}{P_{freno}} \quad (2.11)$$

Donde:

P_h : es la potencia hidráulica.

P_{freno} : es la potencia al freno, en el eje.

El valor de la eficiencia mecánica de las bombas no solo depende del diseño de estas, sino también de las condiciones en que operan, en particular de la carga total y del flujo volumétrico.

2.2.2. Ecuación de conservación

Para evaluar el momento de torsión en la flecha rotatoria para rotores centrífugos, se aplica la relación de la cantidad de movimiento angular para un volumen de control (Cengel, Cimbala, 2006).

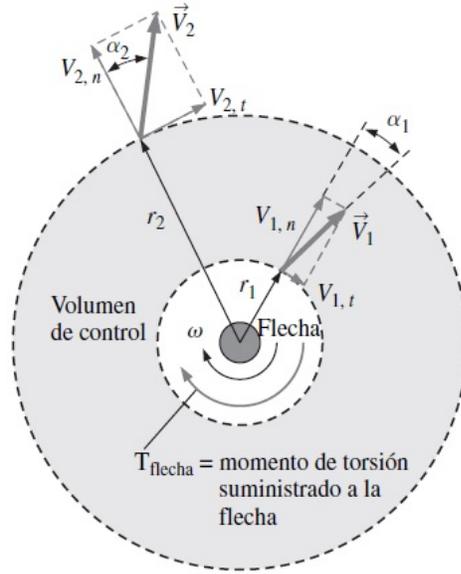


Figura 2.7: Volumen de control (sombreado) que se usa para analizar la cantidad de movimiento angular del flujo en una bomba centrífuga. (Cengel, Cimbala, 2006).

Se establece que el flujo entra al volumen de control con velocidad absoluta uniforme V_1 en toda la circunferencia de radio r_1 y sale con velocidad absoluta uniforme V_2 en toda la circunferencia de r_2 . Los ángulos α_1 y α_2 , que se definen como el ángulo de desviación del vector de la velocidad absoluta de la dirección normal en los radios r_1 y r_2 , respectivamente. Puesto que el momento de la cantidad de movimiento se define como el producto cruz $\vec{r} \times \vec{V}$, sólo las componentes tangenciales de V_1 y V_2 se relacionan con el momento de torsión de la flecha. Estos componentes se muestran como $V_{1,t}$ y $V_{2,t}$, en la figura 2.7. Se obtiene como resultado que el momento de torsión de la flecha es igual al cambio en el momento de la cantidad de movimiento desde la entrada hasta la salida, de acuerdo con la ecuación de Euler de la turbomáquina, (Cengel, Cimbala, 2006).

$$T_{flecha} = \rho \dot{V} (r_2 V_{2,t} - r_1 V_{1,t}) \quad (2.12)$$

2.2.3. Cabeza de succión neta positiva

Al trasegar fluidos es muy probable que la presión local dentro de la bomba caiga por abajo de la presión de vapor del líquido P_v (presión a la cual las fases líquida y vapor se encuentran en equilibrio), por lo cual se producen burbujas llenas de vapor, que reciben el nombre de burbujas de cavitación. Después de que se forman las burbujas de cavitación, esto del lado de la succión de la bomba, luego se transportan hacia el lado de descarga de la bomba donde la presión es mayor, lo cual ocasiona el colapso rápido de las mismas. Este colapso de las burbujas es indeseable porque ocasiona ruido, vibración, reduce la eficiencia, pero lo más importante es que daña los álabes del rotor. El colapso repetido de las burbujas cerca de la superficie de los álabes les ocasiona picaduras o erosión y con el paso del tiempo, les provoca fallas catastróficas (Cengel, Cimbala, 2006). Para evitar la cavitación, se debe de tener la certeza de que la presión local en cualquier punto de la bomba se mantiene por arriba de la presión de vapor. Esto pues la presión es lo más fácil de medir (o estimar) en la entrada de la bomba, los criterios de la cavitación se especifican siempre en la entrada de la bomba. Es acá donde surge el término NPSH (carga de succión neta positiva, por sus siglas en inglés), que se define como la diferencia entre la carga de presión de estancamiento en la entrada de la bomba y la carga de la presión de vapor, para la cual se utiliza la siguiente formula (Cengel, Cimbala, 2006):

$$NPSH = P_{atm} \pm \Delta H - P_{vap} - P_{fs} \quad (2.13)$$

Donde:

NPSH: denota la carga de succión neta positiva disponible, en metros columna de fluido (mcf).

P_{atm} : denota la presión atmosférica o la presión absoluta sobre el fluido (mcf).

ΔH : denota la diferencia de altura aprovechable (mcf), que puede ser positiva si está por encima del nivel de la bomba o negativa si está por debajo.

P_{vap} : denota la presión de vapor del fluido (mcf).

P_{fs} : denota las pérdidas de presión a causa de la tubería de succión (mcf).

En las fabricas se prueban las bombas en instalaciones diseñadas para dicho propósito, con el fin de verificar si se genera cavitación, hacen variar de una manera controlada el gasto volumétrico y la presión de entrada. Específicamente, a un caudal y a una temperatura del líquido determinados, la presión en la entrada de la bomba se reduce con lentitud hasta que la cavitación se presenta en algún lugar dentro de la bomba. El valor de NPSH se calcula por medio de la ecuación 2-13 y se registra a estas condiciones de operación. Este proceso se repite a distintos caudales, después el fabricante publica un parámetro de rendimiento llamado carga de succión neta positiva admisible que es la NPSH mínima necesaria para evitar la cavitación en la bomba (Cengel, Cimbala, 2006). Existe también el NPSH real, el cual se refiere al valor de la carga de succión neta positiva específica de las condiciones de succión de la bomba, también se calcula por medio de la ecuación 2-13, tomando en cuenta los valores respectivos de la condición real de funcionamiento, a esta carga se le llama NPSH disponible. Para que una bomba no sufra cavitación, la NPSH real o disponible debe ser mayor que NPSH admisible. El American National Standards Institute (ANSI) y el Hydraulic Institute (HI) emiten juntos estándares que especifican un margen mínimo de 10 % para la NPSH disponible sobre la NPSH admisible, en aplicaciones en donde las características del proceso o el fluido así lo ameriten, se pueden usar márgenes mayores para lo cual existen normas aplicables (Mott, 2006).

$$NPSH_{disponible} > 1,10 * NPSH_{admisible} \quad (2.14)$$

2.3. Carga dinámica total

El rendimiento de una bomba se caracteriza por su carga hidrostática neta TDH (carga dinámica total o cabeza dinámica total, traducción del inglés), que se define como el cambio en la carga hidrostática de Bernoulli entre la succión y la descarga de la bomba (Cengel, Cimbala, 2006):

$$TDH = \left(\frac{P}{\rho * g} + \frac{V^2}{2g} + Z \right)_{descarga} - \left(\frac{P}{\rho * g} + \frac{V^2}{2g} + Z \right)_{succion} \quad (2.15)$$

Donde:

TDH: denota la carga dinámica total (m).

P: denota la presión del fluido (Pa).

ρ : denota la densidad del fluido (kg/m^3).

g: denota la gravedad local (m/s^2).

V: denota la velocidad del fluido (m/s).

Z: denota la altura relativa a punto de referencia específico, que puede ser la bomba (m).

La dimensión de la carga hidrostática neta es longitud, y con frecuencia se menciona como altura de una columna equivalente de agua, hasta en el caso de una bomba que no bombea agua (Cengel, Cimbala, 2006).

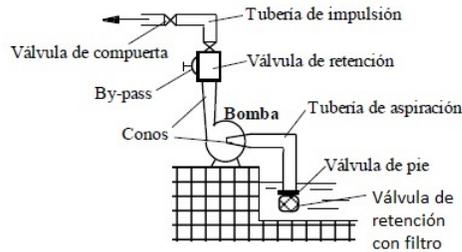


Figura 2.8: Elementos básicos de un sistema de bombeo. (Zamora, Viedma, 2016).

En la ecuación de Bernoulli (2-15) se contempla la diferencia de altura, presión y velocidad al realizar el balance de energía entre el sistema inicial y final, sin embargo es necesario contemplar las pérdidas de energía que se dan dentro de la tubería lo cual contribuye a la carga neta TDH. Esta carga tiene una componente estática (altura y presión) y otra dinámica (pérdidas y velocidad) (Cengel, Cimbala, 2006).

$$TDH = Estático + Dinámico \quad (2.16)$$

$$TDH = \Delta H + \Delta P + H_f + \frac{V^2}{2g} \quad (2.17)$$

Donde:

TDH: denota la carga dinámica total (m).

ΔH : denota el diferencial de altura (m).

ΔP : denota el diferencial de presión del fluido (m).

H_f : denota las pérdidas en tuberías (m).

V: denota la velocidad del fluido (m/s).

g: denota la gravedad local (m/s^2).

El TDH corresponde a la capacidad que tiene la bomba de darle energía al fluido en diferentes condiciones. De esta manera se consideran aportes de energía que debe de suministrar la bomba, el cambio de altura del fluido esto es de donde se toma el fluido y donde se deja, el cambio de presión del fluido esto es la presión (que puede ser la atmosférica) a la cual está el fluido y a la cual se deja, el cambio de velocidad del fluido y además todas las pérdidas de energía en tubería y accesorios que debe de compensar la bomba.

Por ejemplo, un fluido es desplazado de un nivel de referencia de cero metros hasta diez metros de altura esa energía que se utilizó para levantar el fluido 10m entra dentro del TDH. Luego el fluido estaba a presión atmosférica y luego de pasar por la bomba adquiere mayor presión, la energía que se tuvo que invertir para lograr ese cambio de presión en el fluido entra dentro del TDH. Si el fluido se encuentra en reposo (velocidad cero) y se descarga con cierta velocidad, esa energía entra en el TDH. Por último cuando el fluido avanza por la tubería y accesorios se producen pérdidas por fricción, esto es energía que se pierde la cual también entra en el TDH.

El TDH es característico de cada bomba, se relaciona con la potencia de consumo de la bomba, con el diseño de rodete, con las revoluciones por minuto a la que gira este. Por lo cual una bomba a la cual se le demanda transferir mucha energía (cambio de altura, presión, velocidad, pérdidas) al fluido, lo hará, sin embargo la cantidad de fluido simultaneo que moverá será inferior a si se le demandara menos energía. Entonces, si a una bomba se le demanda entregar mucha energía al fluido, esta lo hará pero entregará un caudal menor, ahora, si se le demanda entregar poca energía al fluido, esta lo hará moviendo un mayor caudal. Si a la bomba se le demanda trasferir el fluido una energía excesiva, esta no podrá lograr entregarlo, siendo así un caudal cero. Por otro lado si la energía a transferir es muy poca (mínima) entregará un caudal máximo y a partir de ahí no variará. En el caso de un motor trifásico, su potencia se calcula por medio de la siguiente ecuación (Moreno y Curbello, 2019):

$$P = \sqrt{3} * V * I * \cos(\varphi) \quad (2.18)$$

Donde:

P: denota la potencia (W).

V: denota el voltaje (V).

I: denota la corriente (A).

H_f : denota las pérdidas en tuberías (m).

$\cos(\varphi)$: es el factor de potencia, característico del motor.

Como es de esperar existe un TDH determinado al cual la bomba entregará un caudal específico, es por esto que al diseñar un sistema de bombeo se determina el caudal deseado, se calcula el TDH y luego se busca una bomba que cumpla con ambas condiciones. Las bombas tienen puntos de mayor eficiencia (donde sacan mayor provecho a la corriente eléctrica o energía que consume), esto ocurre para un TDH y caudal determinados (con ciertos márgenes). Por lo anterior es recomendado conocer el caudal deseado, calcular el TDH del sistema de bombeo luego buscar una bomba que tenga su mayor eficiencia cerca o en ese TDH y caudal. Esta idea se explicara con más detalle en la sección de curvas de la bomba.

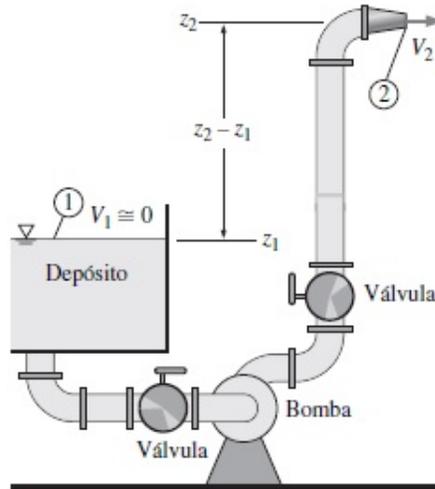


Figura 2.9: Ejemplo de un sistema de bombeo, en donde se debe de subir un fluido. (Cengel, Cimbala, 2006).

2.3.1. Curvas de la bomba

Como se indicó en la sección anterior, el TDH indica la cantidad de energía que la bomba debe de suministrar al fluido. Normalmente se conoce el caudal deseado para una aplicación, luego se calcula el TDH para dicho sistema de bombeo y con esos parámetros se puede elegir una bomba que trabaje en ese TDH entregando el caudal deseado, de una forma eficiente. A continuación se mostrará un ejemplo de una curva (básica) de una bomba en donde los parámetros son el TDH y el caudal entregado respectivo:

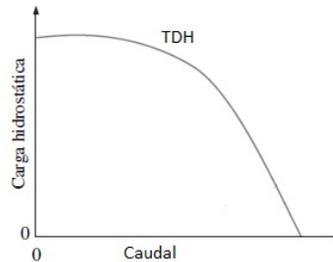


Figura 2.10: Curva de rendimiento de una bomba centrífuga, carga (TDH) vs caudal. (Cengel, Cimbala, 2006).

Se puede observar que para un TDH total determinado la bomba entregará un caudal específico y si se varía el TDH así variará el caudal. A manera de ejemplo, según la curva su bomba respectiva para un valor TDH determinado entregará un caudal asociado. Importante mencionar que para un TDH mayor al máximo en la curva, esta bomba no será una opción.

Otro aspecto importante de mencionar es que existe un punto de operación (TDH vs caudal) en donde la eficiencia es máxima (cuando mejor desempeño tiene la bomba) llamado punto de mayor eficiencia (PME), por lo cual se desea elegir una bomba con un punto de mayor eficiencia coincidente con nuestro caudal y TDH de diseño. Por esta razón se debe conocer el caudal requerido, calcular el TDH del sistema y luego elegir una bomba que dentro de su curva de rendimiento contenga dicho caudal y TDH coincidiendo entre ellos y por ese punto de intersección también coincida (o se aproxime) con el punto de mayor eficiencia, para el cual también existen curvas y estas se pueden sumar a la curva de rendimiento ya mencionada.

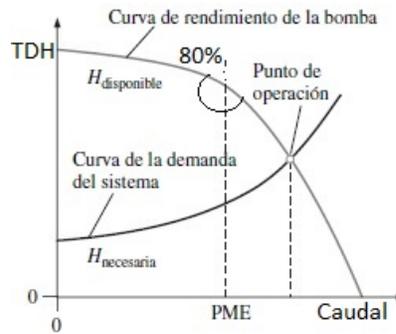


Figura 2.11: Curva de rendimiento de una bomba centrífuga, carga vs caudal. (Cengel, Cimbala, 2006).

En la figura 2.11 se puede observar como la curva de rendimiento de la bomba se interseca con la curva de la demanda del sistema, entonces en ese punto de intersección operará la bomba, de modo que suministrará el caudal correspondiente a ese punto. También se puede ver que el punto de mayor eficiencia se encuentra ligeramente a la izquierda del punto de operación por lo cual se puede inferir que el punto de operación no coincide exactamente con el PME, esto significa que la bomba no trabajará con su mayor eficiencia, sin embargo al encontrarse no tan lejos sucederá que la bomba trabajará con una eficiencia menor a la máxima posible pero aceptable, siempre y cuando se encuentre operando dentro de la zona aceptable de operación, la cual va de un 40 % del PME para la izquierda de este y un 20 % del PME a su derecha. Para acercar el punto de operación al PME se puede elegir otra bomba con esta característica o variar el diseño de bombeo para así poder modificar la curva de demanda para que interseque con la curva del sistema de la bomba en un punto más cercano al PME.

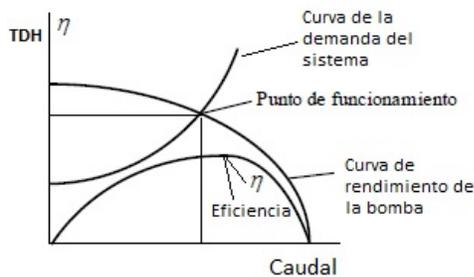


Figura 2.12: Curva de rendimiento de una bomba centrífuga, carga vs caudal y curva de eficiencia. (Zamora, Viedma, 2016).

En la figura 2.12 se muestran nuevamente las curvas de intersección de rendimiento de una bomba y la de la demanda del sistema, también se puede observar la curva de eficiencia (η). En donde se da la intersección entre la curva de la bomba y la curva de la demanda se hallará el punto de funcionamiento, el cual tendrá un valor asociado de eficiencia que se podrá tomar de la curva η , esa será la eficiencia de la bomba para ese respectivo punto de operación.

Existen diversas maneras de mostrar las curvas de una bomba, eso depende del estilo de fabricante o libro de texto consultado, sin embargo la información suministrada siempre es la misma, talvez graficada o expresada de diferentes formas o con diferentes unidades.

A continuación en la figura 2.13 se muestra un ejemplo en donde se da la curva de rendimiento de la bomba para diferentes diámetros de rodete, también se muestra la eficiencia.

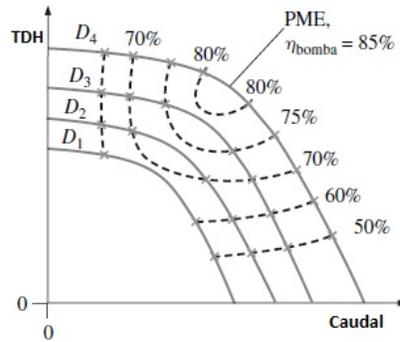


Figura 2.13: Curva de rendimiento de una bomba centrífuga para diversos rodetes y sus respectivas curvas de eficiencia. (Mott, 2006).

Ahora, en vista de que lo que se desea en este proyecto es diseñar y construir un sistema de bombeo con fines académicos, se procederá a mostrar las curvas características de la bomba que se utilizara para dichos fines.

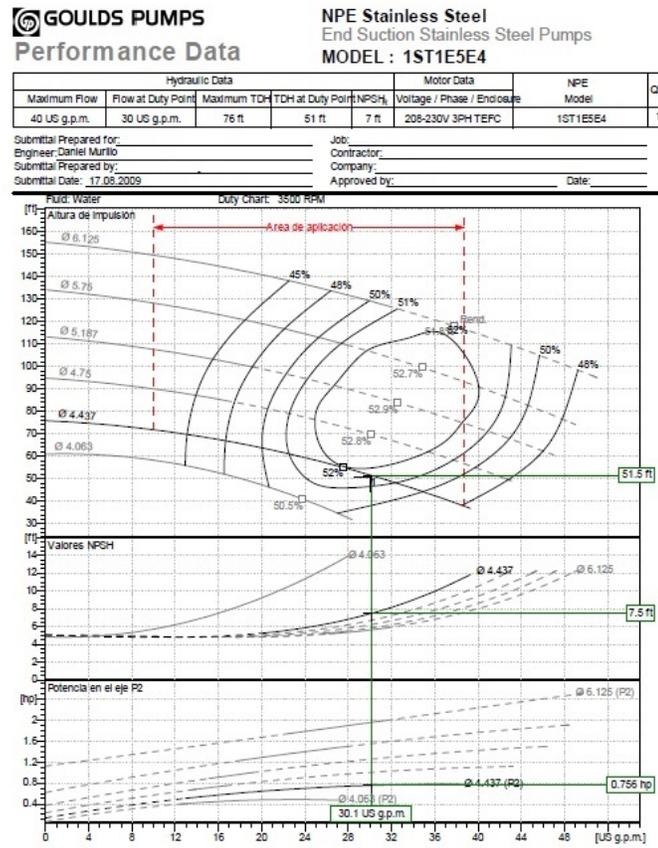


Figura 2.14: Curvas de rendimiento de la bomba centrífuga que se usará para el proyecto. (Goulds Pumps, 2009).

De la figura 2.14 se obtiene información tal como el diámetro del rodete (4.437 in), NPSH requerido (7 ft, al operar en PME), TDH máximo, eficiencia, revoluciones por minuto. En las curvas se pueden observar de primero las de rendimiento de la bomba (en pies) y eficiencia (cerca a 52 por ciento) para diferentes tamaños de rodetes especificando que el diámetro utilizado es el de 4.437 pulgadas. Luego se puede ver la curva de NPSH (en pies) y por último la de potencia (en caballos de fuerza). Todas las curvas antes mencionadas son unidas (o marcadas) por una línea de color verde, la cual indica el punto de operación, en el cual operará el equipo según las condiciones de diseño, también se podrá ver el NPSH requerido, la eficiencia y la potencia, para ese respectivo punto de operación.

2.3.2. Succión y descarga

El diseño de la tubería de succión debe ser meticuloso y requiere de cuidado ya que muchos de los problemas de funcionamiento de una bomba se pueden deber a condiciones inapropiadas en la succión. La línea de succión se refiere a todas las partes del sistema de flujo, desde la fuente del fluido a la entrada de la bomba. Debe tenerse mucho cuidado al diseñar la línea de succión, con el fin de garantizar una carga de succión neta positiva (NPSH) adecuada. Aspectos importantes en el diseño de la tubería son el tamaño de esta tubería, diseño de la toma de agua, el tanque de abastecimiento, accesorios en las tuberías.

La tubería de succión debe ser tan corta y recta como sea posible, se recomiendan velocidades del fluido en la succión entre 1.7 m/s y a 2.7 m/s (5.5 a 9 ft/s), a menos que las condiciones en la succión requieran otra velocidad (Hydraulic Institute, 2018). Las altas velocidades incrementan las pérdidas por fricción. El resultado de esta condición puede crear burbujas de aire y vapor. Se debe procurar evitar accesorios como codos o uniones en T pues estos incrementan las pérdidas de energía por fricción dentro de la tubería ocasionando una disminución en el NPSH disponible, comprometiendo así la correcta succión. En caso de ser necesario utilizar algún codo en la succión debe ser radio largo y prever un tramo de tubería recta de longitud mayor a 5D (cinco diámetros de la tubería) y menor a 10D entre el codo y la bomba, de lo contrario el ingreso del fluido al impulsor no será uniforme, las consecuencias son ruido y excesiva carga axial.

Cuando el fluido no sea limpio, debe instalarse una canasta en la entrada o en cualquier lugar del tubo de succión, con objeto de mantener las partículas no deseadas fuera de la bomba y del proceso en el que se distribuirá el fluido. Una válvula de pie en la entrada permite el libre flujo hacia la bomba, cuando la bomba se detiene, mantiene una columna de líquido sobre la bomba y elimina la necesidad de purgar la bomba cada vez que arranca. Si se emplea una válvula cerca de la bomba, es preferible que sea una válvula de compuerta, pues ofrece muy poca resistencia al flujo si está abierta por completo. El vástago de la válvula debe estar en posición horizontal para evitar la formación de bolsas de aire.

Aunque el tamaño del tubo para la línea de succión nunca debe ser más pequeño que la conexión de entrada sobre la bomba, puede ser algo mayor para reducir la velocidad de flujo y las pérdidas por fricción. La alineación de la tubería debe eliminar la posibilidad de que se formen burbujas o bolsas de aire en la línea de succión, porque esto haría que la bomba perdiera capacidad y tal vez el arranque. Las tuberías largas deben tener pendiente hacia arriba, en dirección de la bomba (cuando halla succión negativa y con la seguridad de que exista la posibilidad de que se presenten burbujas). Debe evitarse los codos en un plano horizontal. Si se requiriera un reductor, como por ejemplo en el caso de que la tubería tenga un diámetro mayor que la boca de succión de la bomba, se debe utilizar un reductor excéntrico entre los accesorios y la succión. Los reductores concéntricos sitúan parte de la línea de suministro sobre la entrada de la bomba, donde podría formarse una bolsa de aire.

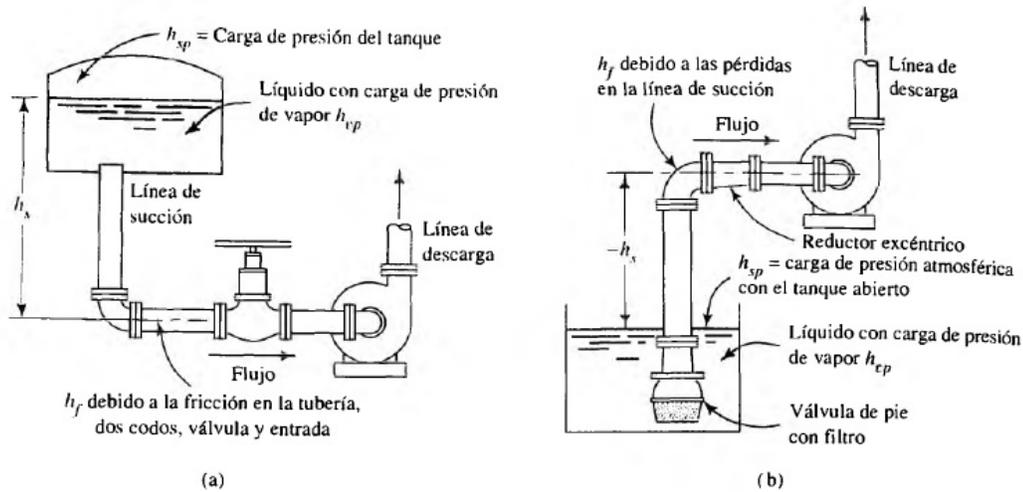


Figura 2.15: Ejemplos de una succión negativa y positiva. (Mott, 2006).

La figura 2.15 muestra dos métodos para proporcionar fluido a una bomba, en la parte (a) se ilustra la creación de una carga positiva, colocando la bomba abajo del depósito de abastecimiento que suministra. Esta ayuda para que se garantice una NPSH satisfactoria. Además, la bomba siempre iniciará con una columna de líquido al arrancar. En la figura parte (b) ocurre una condición de succión elevada porque la bomba debe obtener el líquido que está debajo de ella. Las bombas de desplazamiento positivo pueden elevar fluidos cerca de 8 m, sin embargo para la mayoría de bombas centrífugas, se debe iniciar de forma artificial, llenando la línea de succión con fluido. Esto se realiza con un suministro auxiliar de líquido durante el arranque o con la creación de un vacío sobre la carcasa de la bomba, lo que ocasiona que el fluido sea succionado desde la fuente. Entonces, la bomba en funcionamiento mantendrá el flujo. Existen bombas autocebantes, las cuales no necesitan de este procedimiento (hasta cierto punto) pues dentro de su diseño se contempla esta cantidad de fluido necesario para el arranque.

El tanque de abastecimiento se relaciona directamente con la succión de la bomba ya que este contribuye a determinar las condiciones en la succión y por lo tanto en el funcionamiento del equipo. Es imperativo que la turbulencia y la entrada de aire a la tubería de succión se reduzcan al mínimo, esto se logra controlando las condiciones del fluido en el tanque de abastecimiento. El aire entrando en la succión reduce la capacidad y la eficiencia de la bomba, además causa ruido, vibración y acelera la corrosión. La inadecuada posición de la línea de succión dentro del tanque puede causar excesiva turbulencia o vórtice.

La descarga libre del líquido sobre la superficie del tanque, ya sea encima o muy cerca de la succión, produce burbujas de aire que logran fácilmente su ingreso a la bomba. Todas las líneas de descarga al tanque deben estar sumergidas para evitar esta condición. En casos extremos de turbulencia se recomienda el uso de barreras para destruir las burbujas de aire e impedir su ingreso a la bomba.

La función de la estructura de toma en el tanque, es la de abastecer un flujo constante a la succión de la bomba. Un flujo no constante y turbulento puede afectar significativamente el desempeño de la bomba, reduciendo su capacidad e incrementando la vibración y el ruido. La idea de sumergir la línea de abastecimiento, toma en cuenta sólo uno de los aspectos que afectan la succión, aun cuando esta se lleve a cabo, existe la posibilidad de un vórtice.

Para determinar la altura mínima que debe de haber entre el nivel superior del tanque y la succión (entreda de fluido a la succión) se utilizará la siguiente imagen, con ayuda de la cual se puede calcular dicha altura mínima de succión. Se aclara de que en la figura 2.16, se conserva el sistema de unidades original en el que se realizó la publicación (Goulds Pumps, 2021), esto con el fin de transmitir la información de manera directa.

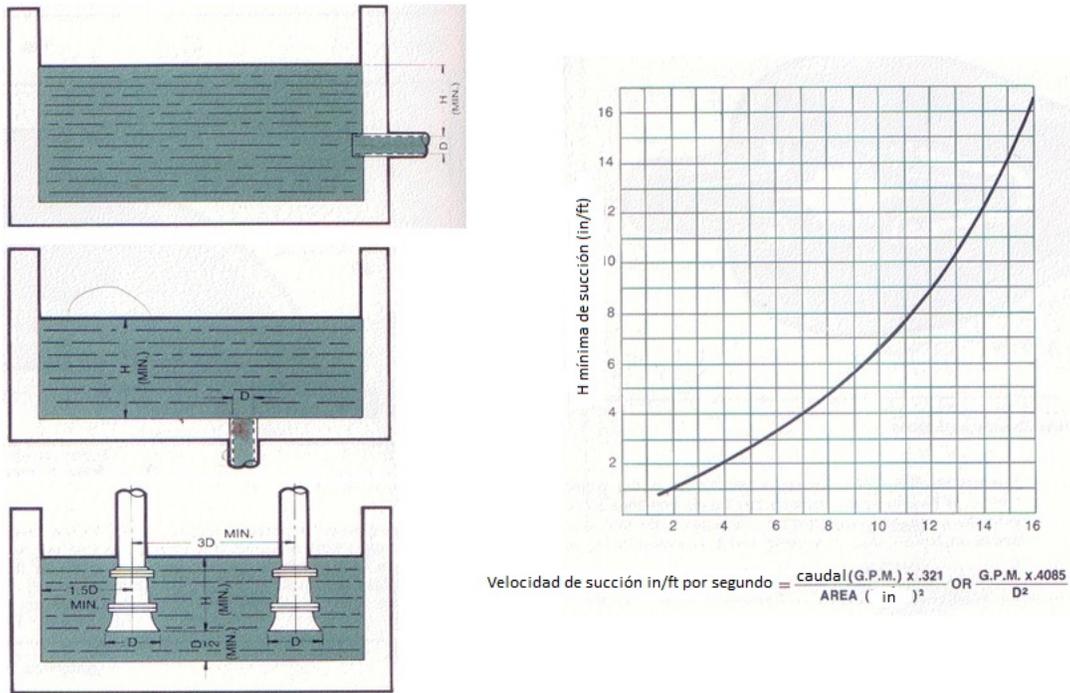


Figura 2.16: Altura mínima de succión. (Goulds Pumps, 2021).

De acuerdo con la velocidad de succión, con ayuda de la gráfica de la figura 2.16, se puede obtener la altura mínima de succión, la figura conserva el sistema de unidades original en que fue publicada. La velocidad de succión a la cual se trabaje responderá a criterios de diseño y aspectos relacionados con el sistema tales como caudal y área de la tubería de succión. De acuerdo con recomendaciones del Instituto Hidráulico (ANSI 9.8-2018) cuando se opere con caudales menores 315 litros por segundo (5000 gpm), la velocidad de succión deberá ser igual o menor a 2,7 metros por segundo (Hydraulic Institute, 2018).

El diseño y selección de las características de la tubería de descarga se definen principalmente con base en aspectos económicos, realizando una comparación entre costos de operación y de instalación.

En general, la línea de descarga debe ser tan corta y directa como sea posible, para minimizar la carga sobre la bomba. Los codos deben ser del tipo estándar o de radio largo, si fuera posible. Debe seleccionarse el tamaño de la tubería de acuerdo con la velocidad o las pérdidas por fricción permisibles. En general, con base en el ideal de minimizar las pérdidas de energía se recomienda tamaños grandes de tubería y velocidades bajas. No obstante, otras consideraciones acerca del costo y lo práctico de la instalación podrían llevar a seleccionar tuberías más pequeñas, con el resultado de velocidades más elevadas.

La línea de descarga debe contener una válvula cerca de la bomba para permitir que se dé servicio a esta o se reemplace. La válvula actúa con la que está en la línea succión para aislar la bomba. Por razones de resistencia baja, es preferible una válvula de mariposa. Si el flujo debe regularse durante el servicio, es mejor emplear una válvula de globo porque permite un estrangulamiento suave de la descarga. En efecto esto incrementa la carga del sistema y ocasiona que disminuya la entrega de la bomba. Como se observa en la figura 2.17, es posible agregar los elementos que se requiera a la línea de descarga. Una válvula de alivio de la presión, protegerá la bomba y al resto del equipo, en caso de un bloqueo del flujo o falla accidental de una válvula. Una válvula de retención (o válvula check) impide que el flujo regrese a la bomba cuando no este en funcionamiento. Debe colocarse una válvula de verificación entre la válvula de apagado y la bomba. Si se emplea una expansión para el puerto de descarga de la bomba, debe colocarse entre la válvula de verificación y la bomba. Podría ser necesario instalar una llave en la línea de descarga para un medidor con su válvula de apagado. Una válvula de muestreo permitiría extraer una cantidad pequeña de fluido para realizar pruebas sin interrumpir la operación.

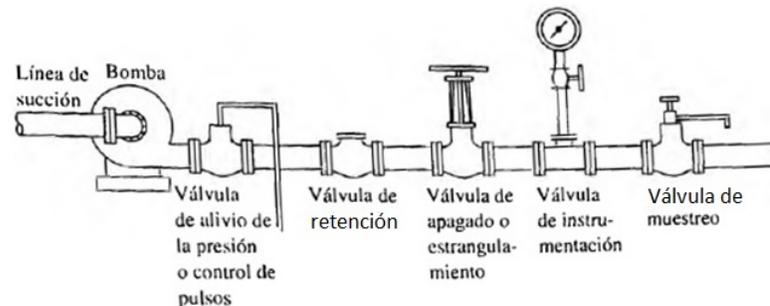
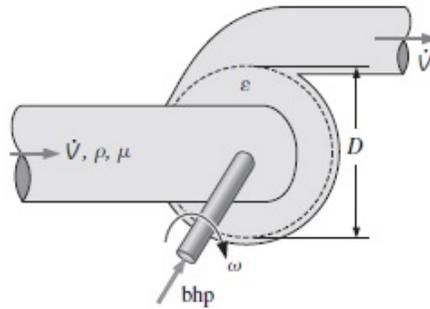


Figura 2.17: Ejemplo de una tubería de descarga. (Mott, 2006).

2.4. Parámetros adimensionales

Una magnitud adimensional es una cantidad sin una dimensión física asociada, siendo por tanto un número puro que permite describir una característica física sin dimensión ni unidad de expresión explícita. Las magnitudes adimensionales se definen a menudo como productos, razones o relaciones de cantidades que si tienen dimensiones, pero cuyas dimensiones se cancelan cuando sus potencias se multiplican.

Las magnitudes adimensionales se definirán por medio de la variables que se mencionan a continuación: La gravedad multiplicada por la carga hidrostática neta (gH), gasto volumétrico (\dot{V}), la potencia de freno de entrada (bhp), cierta longitud característica, por lo común el diámetro de las álabes del rotor (D), la altura de rugosidad de la superficie del álabe (ε), velocidad rotacional del rotor (ω), la densidad del fluido (ρ) y la viscosidad (μ). Lo anterior como se ilustra en la figura siguiente.



$$gH = f(\dot{V}, D, \varepsilon, \omega, \rho, \mu)$$

$$k = n - j = 7 - 3 = 4 \Pi \text{ esperadas.}$$

$$\Pi_1 = \frac{gH}{\omega^2 D^2} \quad \Pi_2 = \frac{\dot{V}}{\omega D^3}$$

$$\Pi_3 = \frac{\rho \omega D^2}{\mu} \quad \Pi_4 = \frac{\varepsilon}{D}$$

Figura 2.18: Análisis dimensional de una bomba . (Cengel, Cimbala, 2006).

Parámetros adimensionales de la bomba (Cengel, Cimbala, 2006):

$$\Pi_i = f(g, H, D, \varepsilon, \omega, \rho, \mu, \dot{V}) \quad (2.19)$$

Número de Reynolds

$$Re = \frac{\rho * \omega * D^2}{\mu} \quad (2.20)$$

C_H = Coeficiente de carga hidrostática

$$C_H = \frac{g * H}{\omega^2 * D^2} \quad (2.21)$$

C_Q = Coeficiente de capacidad

$$C_Q = \frac{\dot{V}}{\omega * D^3} \quad (2.22)$$

C_P = Coeficiente de potencia

$$C_P = \frac{bhp}{\rho * \omega^3 * D^5} \quad (2.23)$$

Cuando se bombean líquidos, la cavitación debe analizarse y se necesita otro parámetro adimensional relacionado con la carga de aspiración neta positiva necesaria. Por fortuna, se sustituye simplemente la $NPSH_{admissible}$ en vez de H en el análisis dimensional de coeficiente de carga hidrostática, debido a que tienen dimensiones idénticas (longitud). El resultado es el coeficiente de aspiración (Cengel, Cimbala, 2006):

$$C_{NPSH} = \frac{g * NPSH_{admissible}}{\omega^2 * D^2} \quad (2.24)$$

Respecto a la eficiencia de la bomba en una función de parámetros adimensionales tenemos lo siguiente (Cengel, Cimbala, 2006):

$$\eta_{bomba} = \frac{C_Q * C_H}{C_P} \quad (2.25)$$

Otro parámetro adimensional útil, conocido como velocidad específica de la bomba (N_{Sp}) se forma mediante una combinación de parámetros C_Q y C_H (Cengel, Cimbala, 2006):

$$N_{Sp} = \frac{C_Q^{1/2}}{C_H^{3/4}} \quad (2.26)$$

La velocidad específica de la bomba se usa para identificar la operación de una bomba en sus condiciones óptimas (punto nominal, o punto de mejor eficiencia) y es útil para la selección preliminar de la bomba (Cengel, Cimbala, 2006).

2.4.1. Conexión en serie

Si la carga total (TDH) que hay que comunicar al fluido no es alcanzable con una determinada bomba, se puede plantear la instalación de dos bombas en serie, de modo que el flujo después de pasar por la primera, pase por la segunda y la energía mecánica específica aportada por cada una se sumen. La curva característica del conjunto de ambas bombas está formada por la suma de la carga manométrica de cada una de ellas para un mismo caudal. Esto funciona de la misma manera para más de dos bombas en serie, se suman las cargas totales de todas las bombas y el caudal se mantiene. En síntesis lo que ocurrirá al utilizar bombas en serie será un aumento en la presión.

El caudal o gasto volumétrico se mantiene (Zamora, Viedma, 2016).

$$Q_{total} = Q_1 = Q_2 \quad (2.27)$$

La carga o altura de cada bomba se suman.

$$H_{total} = H_1 + H_2 \quad (2.28)$$

$$H_{total} = \sum_{i=1}^n H_i \quad (2.29)$$

Las instalaciones en serie son aceptables en algunas aplicaciones, pero conectar bombas diferentes en serie puede ocasionar problemas, sobre todo si una de las bombas es más grande que la otra. Conectar bombas desiguales en serie puede originar problemas porque el gasto volumétrico que pasa por cada una debe ser el mismo, pero la sobrepresión global es igual al aumento de presión de una bomba más el de la otra. Si las curvas de rendimiento de las bombas son muy distintas, la bomba más pequeña podría ser forzada a operar más allá de su caudal de descarga libre, y en consecuencia esta actúa como una pérdida de carga, y se reduce la cantidad total de volumen.

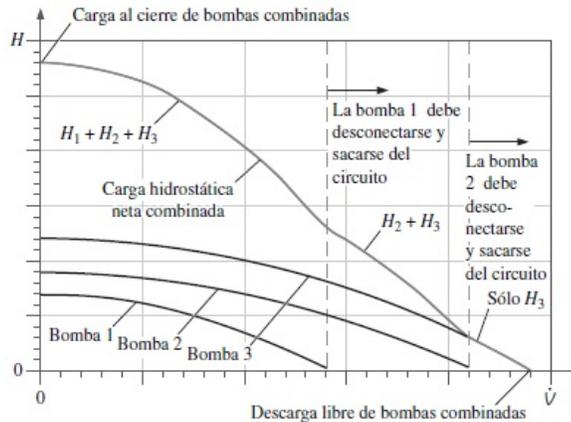


Figura 2.19: Curvas para bombas en serie. (Cengel, Cimbala, 2006).

La ecuación 2-27 se ilustra en la figura 2-18 para tres bombas conectadas en serie. En este ejemplo, la bomba 3 es la más potente y la bomba 1 es la de menor empuje. La carga al cierre de las tres bombas conectadas en serie es igual a la suma de la carga al cierre de cada bomba. En el caso de valores bajos de gasto volumétrico, la carga hidrostática neta de las tres

bombas en serie es igual a $H_1 + H_2 + H_3$. Más allá de la descarga libre de la bomba 1 (a la derecha de primera línea vertical gris y de guiones en la figura 2-19), esta bomba debe ser desconectada y sacarse del circuito. De lo contrario estaría trabajando más allá de su punto de operación de diseño máximo, y la bomba o su motor podrían dañarse. Además, la carga hidrostática neta en esta bomba sería negativa, como ya se señaló antes, lo cual contribuiría a las pérdidas netas en el sistema. Con la bomba 1 fuera del circuito, la carga hidrostática neta combinada se vuelve $H_2 + H_3$. De igual manera, más allá de la descarga libre de la bomba 2, esta bomba debe desconectarse también y ponerse fuera del circuito, y, entonces, la carga hidrostática neta combinada es igual a H_3 solamente, según se señala a la derecha de la segunda línea vertical gris y de guiones en la figura 2-18. En este caso, la descarga libre combinada es la misma que la de la bomba 3 sola, si se supone que las otras dos bombas están desconectadas.

En el acoplamiento en serie, la descarga de la bomba 1 hace que la entrada de la bomba 2 se encuentre a una presión de trabajo mayor que la inicialmente supuesta, de modo que la eficiencia del sistema puede llegar a ser significativamente baja en ciertas condiciones de funcionamiento. El rendimiento total para dos bombas en serie puede calcularse así (Zamora, Viedma, 2016):

$$\eta = \rho g Q_T \frac{(H_1 + H_2)}{(W_1 + W_2)} \quad (2.30)$$

Donde:

η : es la eficiencia del sistema en serie.

ρ : es la densidad del fluido (kg/m^3).

g : es la gravedad local (m/s^2).

Q_T : es el caudal total del sistema en serie (m^3).

H : es la diferencia de altura (m).

W_1 : es la potencia utilizada por la bomba 1 (W).

W_2 : es la potencia utilizada por la bomba 2 (W).

2.4.2. Conexión en paralelo

Ante un problema en el cual el caudal que se tiene es insuficiente, de manera que se desea aumentarlo, la solución puede provenir de plantear dos o más bombas en paralelo. Los caudales se suman y la carga (H) comunicada por cada una, menos la pérdida ΔH desde la bifurcación a la unificación por cada camino, ha de mantenerse (Zamora, Viedma, 2016).

$$Q_{total} = Q_1 + Q_2 \quad (2.31)$$

$$Q_{total} = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (2.32)$$

Cuando se instalan bombas diferentes en paralelo también se originan problemas porque la sobrepresión total debe ser la misma, pero el gasto volumétrico neto es la suma de la que pasa por cada rama. Si las bombas no tienen las dimensiones adecuadas, la bomba más pequeña no sería capaz de manejar la carga hidrostática enorme para ella, por lo que el flujo en esta rama, en realidad, podría regresarse; esto reduciría de manera inadvertida la sobrepresión global. En cada caso, la potencia suministrada a la bomba más pequeña se desperdiciaría.

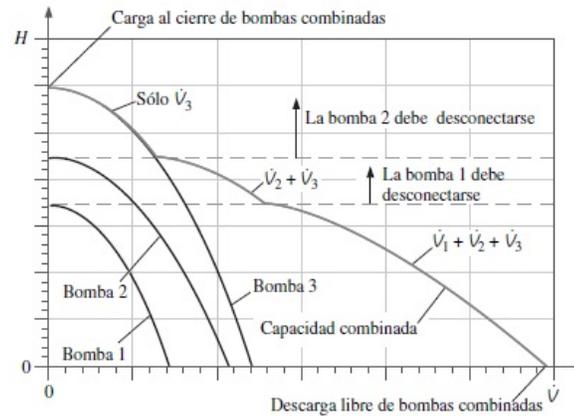


Figura 2.20: Curvas para bombas en paralelo. (Cengel, Cimbala, 2006).

Como ejemplo, considere las mismas tres bombas, pero conectadas ahora en paralelo. La curva de rendimiento de las bombas combinadas se muestra en la figura 2-20. La descarga libre de las tres bombas combinadas es igual a la suma de la descarga libre de cada una de las bombas. En el caso de valores bajos de carga hidrostática neta, la capacidad de las tres bombas en paralelo es igual a $Q_1 + Q_2 + Q_3$. Por arriba de la carga de cierre de la bomba 1 (arriba de la primera recta horizontal gris y discontinua de la figura 2-20), la bomba 1 debe cerrarse y bloquear su rama (por medio de una válvula). Si no es así, podría estar funcionando más allá de su punto de operación de diseño máximo, por lo que la bomba o su motor podrían dañarse. Además, el gasto volumétrico a través de esta bomba sería negativo, como se estableció antes, lo que contribuiría a una pérdida neta en el sistema. Con la bomba 1 apagada y desactivada, la capacidad combinada es $Q_2 + Q_3$. Sucede lo mismo si la bomba 2 funciona por arriba de su carga al cierre; esta bomba se debe desactivar y bloquear. La capacidad combinada es entonces sólo Q_3 .

Como puede inferirse de lo anteriormente descrito, se debe de tener cuidado al elegir las bombas para trabajar ya sea en serie o paralelo, pues no cualquier sistema puede funcionar como se desea. En el caso específico de este documento, se trabajará con dos bombas idénticas (marca y modelo) de manera que se podrá tabajar en serie o paralelo sin ningún problema.

2.5. Tuberías y accesorios

En este capítulo se abordará el tema de elección de la tubería y sus características para el debido trasiego. También se abordará el tema de accesorios necesarios para implementar el sistema que permita realizar todas las posibles guías de laboratorio que se deseen impartir.

2.5.1. Criterios de selección

Existen varios aspectos a tomar en cuenta a la hora de elegir una tubería, algunos de estos se mencionan a continuación:

Con respecto al fluido a trasegar: temperatura, corrosividad, abrasividad, toxicidad, costo, accesibilidad, peso específico, densidad, viscosidad, entre otras más características del fluido, que son determinantes a la hora de elegir la tubería que se utilizará para el respectivo trasiego.

En relación a las condiciones de operación: Caudal y presión.

Según las condiciones externas: Ubicación, condiciones ambientales, tipo de actividad para la cual se utiliza (medica, alimenticia, minera, combustible, etc.), riesgos asociados, etc.

Otro aspecto importante respecto a la elección de la tubería son las pérdidas por fricción en las mismas, para lo cual se destinará una subsección posterior (2.5.2). Por el momento se indica que lo ideal es minimizar este tipo de pérdidas, esto se hace eligiendo coeficientes de rugosidad de tubería bastante pequeños siempre que este tipo cumpla con los demás requisitos como lo es soportar las fuerzas generadas por el trasiego. Otra forma de minimizar pérdidas es aumentando el diámetro de la tubería, de esta manera la fricción entre líquido y tubería respectiva para el caudal de trasiego será menor, sin embargo se debe de recordar el factor económico, pues una tubería con mayor diámetro puede aumentar los costos, respecto a este tema, se indica que se debe de tener un equilibrio entre los costos por compra de tuberías y los costos de operación, llegando a un punto donde ninguno de los dos sea exagerado.

2.5.2. Accesorios

Los accesorios corresponden a elementos que se conectan con las tuberías, tienen diversas funciones tales como cambiar la dirección de la tubería, unir tuberías, crear nuevas líneas, medir presión o caudal, etc. Estos elementos provocan pérdidas de energía adicionales por lo cual es importante conocer esas pérdidas y contabilizarlas en el diseño.

- Codos: Los hay de diferentes tipos como radio largo (menores pérdidas, costosos) radio corto (mas pérdidas, económicos), con distintos ángulos. Se utilizan para cambiar la dirección del fluido hacia donde se requiera. Los codos en ángulo de 90 grados son los más típicos y sencillos de utilizar.
- Ramificaciones en forma de letra T: Permiten dividir el flujo en distintas direcciones, existen ramas principales (el flujo no cambia de dirección) y ramas derivadas (el fluido cambia de dirección).
- Válvula de compuerta: Se opera abierta o cerrada, se utiliza para detener el flujo.
- Válvula de globo: Se puede utilizar abierta o cerrada así como semiabierta, esta característica permite estrangular el fluido dando la posibilidad de regular el flujo según se requiera
- Válvula de bola: Se opera abierta o cerrada, se utiliza para detener el flujo. Tiene la característica de realizar una apertura o cerrado del flujo de manera rápida (un cuarto de vuelta a la válvula).
- Válvula de retención (check): Evita que el flujo se devuelva o vaya en una dirección no deseada.
- Reducción excéntrica: Se utiliza para poder hacer calzar tuberías de diferentes diámetros.
- Manómetro: Permiten medir la presión en puntos de interés.
- Flujómetro: Permiten medir el caudal en puntos de interés.
- Canastas de filtración: Utilizadas para evitar que elementos no deseados ingresen por la succión.

Las válvulas y accesorios se utilizan para garantizar el funcionamiento adecuado del sistema, un ejemplo puede ser el funcionamiento en serie o paralelo para los cuales se utilizarán codos, válvulas de bola y ramificaciones para pasar de la utilización de una sola bomba a configuración en serie o paralelo. Otro ejemplo puede ser la válvula de retención para evitar que el fluido se devuelva a la bomba una vez que esta se detenga. En resumen los accesorios son utilizados para la operación del sistema.

Como se mencionó en el apartado de elección de la tubería respecto a pérdidas, los accesorios también ejercen fricción contra el flujo generando pérdidas, estas dependerán del tipo de accesorio, se deberán sumar todas las pérdidas de cada accesorio presente en el sistema y luego sumar esas pérdidas a las calculadas para la tubería, calculo que se mencionara en la siguiente subsección. En resumen la elección de los accesorios también afectara las pérdidas por fricción.

2.5.3. Pérdidas de energía por fricción

Cuanto un flujo de algún fluido pasa por una tubería se crea un efecto de fricción entre la superficie de contacto del tubo y el fluido, esta fricción detiene o resta movimiento al fluido, de modo que la fricción entre tubo y fluido genera pérdidas energética, por ejemplo si las pérdidas son muy altas (mucho fricción) gran parte de la energía que la bomba suministra al fluido se desperdiciara como fricción (como aplicar un freno). En los accesorios también ocurre este efecto, por ejemplo en un codo cuando al fluido se le cambia de dirección se provocan pérdidas energéticas a raíz de esto, en ramificaciones también ocurre, en general la gran mayoría de accesorios producen pérdidas, algunos más que otros.

A continuación se mencionará un procedimiento para calcular las pérdidas en las tuberías, esto es la cantidad de energía que se pierde debido a la fricción entre fluido y tubo. El dato de pérdidas se dará en términos de metros columna de fluido pues es la unidad para la carga con la que venimos trabajando, específicamente metros columna de agua (mca) de este modo la energía perdida equivaldrá a las cantidad de energía necesaria para lograr un carga determinada de mca. El método a utilizar recibe el nombre de Darcy-Weisbach, por medio del cual se define una ecuación que depende de varios parámetros referentes al fluido sus condiciones y la tubería, de esta manera se pueden calcular las pérdidas en términos de mca, la ecuación y sus elemento se describe a continuación (Cengel, Cimbala, 2006):

$$Ln(f) = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} \quad (2.33)$$

Donde:

$Ln(f)$: son las pérdidas por fricción (m)=(mca).

f : es el factor de fricción.

L : es la longitud de la tubería (m).

D : es el diametro interno de la tubería (m).

v : es la velocidad del fluido (m/s).

g : es la gravedad local (m/s^2).

En relación con la ecuación (2.32) es sencillo conocer los datos de longitud y diámetro de la tubería, la velocidad del fluido y la gravedad local, pues son datos del propio diseño. En cuanto al dato referente al factor de fricción que se define de acuerdo a las propiedades del fluido, condiciones del sistema y tipo de tubería.

Para calcular el factor de fricción (f) se pueden utilizar distintas ecuaciones cada una de estas para distintas condiciones del fluido, estas condiciones se determinan por el coeficiente de Reynolds del fluido (Cengel, Cimbala, 2006):

$$R = \frac{\rho * v * D}{\mu} \quad (2.34)$$

Donde:

R: es el número de Reynolds.

ρ : es la densidad del fluido.

v: es la velocidad del fluido.

D: es el diametro interno de la tubería.

μ : es la viscosidad dinámica del fluido.

Entonces dependiendo de este parámetro surgen diversas ecuaciones tales como son: Colebrook y White, Sacham, Nikuwadse, Churchil, Blasius, Wilson y Azad entre otros. Todos estos nombres corresponden con autores de las ecuaciones que llevan su mismo nombre y que se utilizan para calcular el coeficiente de fricción dependiendo del número de Reynolds respectivo.

En el caso específico de este proyecto se usará la ecuación de Hazen-Williams, la cual es usada para agua fría (temperatura menor a 60 grados Celsius) que es el caso, por medio de esta ecuación se pueden calcular de manera directa las pérdidas de carga en el sistema. A continuación se muestra la ecuación:

$$Ln(f) = \frac{10,674 * L * Q^{1,852}}{C^{1,852} * D^{4,8704}} \quad (2.35)$$

Donde:

Ln(f): son las pérdidas por fricción (m)=(mca).

L: es la longitud de la tubería (m).

Q: es la caudal (m^3/s).

C: es el coeficiente de Hazen-Williams.

D: es el diametro interno de la tubería (m).

Respecto al coeficiente de Hazen-Williams (C), se indica:

Tipo de tubería	C
PVC > 38 mm	150
PVC < 38 mm	150
Hierro galvanizado	125
Acero	120
Acero remachado	110

Come se indicó, el fluido en un sistema de tubería típico pasa a través de varias uniones, válvulas, flexiones, codos, ramificaciones en forma de letra T (conexiones en T), entradas, salidas, ensanchamientos y contracciones además de los tubos. Dichos componentes (accesorios) interrumpen el suave flujo del fluido y provocan pérdidas adicionales debido al fenómeno de separación y mezcla del flujo que producen. En un sistema típico, con tubos largos, estas pérdidas son menores en comparación con la pérdida de carga por fricción en los tubos (las pérdidas mayores) y se llaman pérdidas menores. Aunque por lo general esto es cierto, en algunos casos las pérdidas menores pueden ser más grandes que las pérdidas mayores. Éste es el caso, por ejemplo, en los sistemas con varias vueltas y válvulas en una distancia corta. Las pérdidas de carga que resultan de una válvula totalmente abierta, por ejemplo, pueden ser despreciables. Pero una válvula cerrada parcialmente puede provocar la pérdida de carga más grande en el sistema, como pone en evidencia la caída en la razón de flujo. El flujo a través de válvulas y uniones es muy complejo, y por lo general no es lógico un análisis teórico. En consecuencia, usualmente los fabricantes de los accesorios determinan las pérdidas menores de manera experimental.

Existen distintos métodos para calcular las pérdidas en accesorios, tales como el método K, el método $2k$ y el método de longitud equivalente. Los tres métodos son basados en datos experimentales del fabricante y generalmente los resultados (aunque se ubican dentro de un rango aceptable de similitud) difieren entre sí, de modo que como es de esperar puede que alguno de los métodos sea más exacto mientras otro sea más inexacto, sin embargo los tres métodos son aceptados y usados para calcular pérdidas en accesorios.

Se procederá a explicar el método de longitud equivalente pues es el que se utilizará para calcular este tipo de pérdidas. El término de longitud equivalente se refiere a la longitud de tubería a la cual equivale un accesorio en termino de pérdidas, en otras palabras significa tomar las pérdidas que se dan en un accesorio y convertirlas en su equivalente (pérdidas) para la tubería correspondiente. De esta manera si se suman todas las pérdidas que se dan por accesorios y se convierten en longitud equivalente, esta cifra se podrá sumar a la longitud de tubería obteniendo una longitud total entre tubería y accesorios.

El método de longitud equivalente consiste en crear una tabla en la cual se anotan los accesorios (columna 1) presentes en el sistema, la cantidad determinada de cada accesorio (mismo accesorio, columna 2) y su respectiva longitud equivalente según el fabricante (columna 3). Luego en otra columna (columna 4) se multiplica el número de accesorios (la columna 2) por la longitud equivalente (columna 3) y se realiza una sumatoria para esa columna (4), obteniendo una longitud equivalente total para todos los accesorios del sistema.

Posteriormente esa longitud equivalente total (de todos los accesorios presentes en el sistema) se sumará a la longitud total de tubería, con ese dato de longitud total se procederá a realizar los cálculos de pérdida de carga por tubería teniendo así contemplados los accesorios.

Cuadro 2.1: Longitudes equivalentes para accesorios en metros. (KSB Pumps, 2002).

DIAMETRO D		ACCESORIOS																		
		COUDO 90° CURVA LARGA	COUDO 90° CURVA MEDIA	COUDO 90° CURVA CORTA	COUDO 45°	CURVA 90° R/D=1/2	CURVA 90° R/D=1	CURVA 45°	ENTRADA NOMINAL	ENTRADA EXTENDIDA	VÁLVULA DE CORTE ABIERTA	VÁLVULA DE GLOBO ABIERTA	VÁLVULA DE GLOBO EN ANGLULO ABIERTA	TEE CON PASAJE DIRECTO	TEE CON SALIDA LATERAL	TEE CON SALIDA BILATERAL	VÁLVULA DE PNE Y FILTRO	SALIDA CANALIZACIÓN	VÁLVULA DE RETENCIÓN TIPO BOLA	VÁLVULA DE RETENCIÓN TIPO CHUPILETA
mm	pulg																			
13	½	0,3	0,4	0,5	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2	0,4	0,1	4,9	2,6	0,3	1,0	1,0	3,6	0,4	1,1	1,6
19	¾	0,4	0,6	0,7	0,3	0,3	0,4	0,2	0,3	0,5	0,1	6,7	3,6	0,4	1,4	1,4	5,6	0,5	1,6	2,4
25	1	0,5	0,7	0,8	0,4	0,3	0,5	0,2	0,3	0,7	0,2	8,2	4,6	0,5	1,7	1,7	7,3	0,7	2,1	3,2
32	1¼	0,7	0,9	1,1	0,5	0,4	0,6	0,3	0,4	0,9	0,2	11,3	5,6	0,7	2,3	2,3	10,0	0,9	2,7	4,0
38	1½	0,9	1,1	1,3	0,6	0,5	0,7	0,3	0,5	1,0	0,3	13,4	6,7	0,9	2,8	2,8	11,6	1,0	3,2	4,8
50	2	1,1	1,4	1,7	0,8	0,6	0,9	0,4	0,7	1,5	0,4	17,4	8,5	1,1	3,5	3,5	14,0	1,5	4,2	6,4
63	2½	1,3	1,7	2,0	0,9	0,8	1,0	0,5	0,9	1,9	0,4	21,0	10,0	1,3	4,3	4,3	17,0	1,9	5,2	8,1
75	3	1,6	2,1	2,5	1,2	1,0	1,3	0,6	1,1	2,2	0,5	26,0	13,0	1,6	5,2	5,2	20,0	2,2	6,3	9,7
100	4	2,1	2,8	3,4	1,3	1,3	1,6	0,7	1,6	3,2	0,7	34,0	17,0	2,1	6,7	6,7	23,0	3,2	8,4	12,9
125	5	2,7	3,7	4,2	1,9	1,6	2,1	0,9	2,0	4,0	0,9	43,0	21,0	2,7	8,4	8,4	30,0	4,0	10,4	16,1
150	6	3,4	4,3	4,9	2,3	1,9	2,5	1,1	2,5	5,0	1,1	51,0	26,0	3,4	10,0	10,0	39,0	5,0	12,5	19,3
200	8	4,3	5,5	6,4	3,0	2,4	3,3	1,5	3,5	6,0	1,4	67,0	34,0	4,3	13,0	13,0	52,0	6,0	16,0	25,0
250	10	5,5	6,7	7,9	3,8	3,0	4,1	1,8	4,5	7,5	1,7	85,0	43,0	5,5	16,0	16,0	65,0	7,5	20,0	32,0
300	12	6,1	7,9	9,5	4,6	3,6	4,8	2,2	5,5	9,0	2,1	102,0	51,0	6,1	19,0	19,0	78,0	9,0	24,0	38,0
350	14	7,3	9,5	10,5	5,3	4,4	5,4	2,5	6,2	11,0	2,4	120,0	60,0	7,3	22,0	22,0	90,0	11,0	28,0	45,0

Los valores indicados para válvulas de globo, también se aplican a grifos, válvulas de duchas y válvulas de descarga.

El cuadro 2.1 muestra un ejemplo de una tabla de longitudes equivalentes de algunos accesorios, existen diversas fuentes de las cuales se puede obtener esta información. Otra forma de obtener el dato de longitud equivalente de algún accesorio, es buscarlo en la ficha técnica del fabricante, que dicho sea de paso, es un dato más exacto, sin embargo, generalmente estos cálculos se realizan antes de comprar el material, por lo cual se utilizan tablas como la mostrada.

2.6. Instrumentación

A continuación se dará una breve reseña de los instrumentos que se utilizarán en la implementación del sistema de bombas centrífugas.

2.6.1. Flujómetros

Estos instrumentos tienen la función de indicar el caudal que fluye, tanto la velocidad del fluido y el área transversal que abarca este, son los dos factores que determinan dicha medición. El objetivo de utilizar un flujómetro (o caudalímetro) es conocer cuánto fluido (por ejemplo agua) está pasando por el instrumento y por lo tanto también por la tubería de algún sistema, pues se conectan en serie. Existen diferentes tipos de flujómetros, a continuación se mencionarán dos tipos:

El rotámetro es un tipo común de medidor de área variable. El fluido se mueve hacia arriba, a través de un tubo libre que tiene un medidor exacto en su interior. Se suspende un flotador en el fluido en posición proporcional al flujo volumétrico. Las fuerzas hacia arriba, debido al arrastre dinámico del fluido sobre el flotador, y la flotabilidad, balancean con exactitud el peso del flotador. Un flujo volumétrico diferente ocasiona que este se mueva a una posición nueva, lo que cambia el área libre entre el flotador y el tubo hasta que el equilibrio se alcanza otra vez. La posición del flotador se mide en una escala graduada en las unidades convenientes de flujo volumétrico o de flujo en peso (Mott, 2006).

También existen los flujómetros de resorte opuesto, en donde la fuerza de arrastre del fluido se equilibra con la fuerza del resorte (Cengel, Cimbala, 2006).



Figura 2.21: Imagen del flujómetro de tipo rotámetro. (Fuente propia).



Figura 2.22: Imagen del flujómetro de resorte opuesto. (Fuente propia).

En el flujómetro de turbina, el flujo hace que la turbina gire a una velocidad que depende de este flujo volumétrico. Cuando cada álabe del rotor pasa por una bobina magnética, se genera un pulso de voltaje que entra a un medidor de frecuencia, un conductor electrónico, o algún dispositivo similar cuyas lecturas se convierten a flujo volumétrico (Mott, 2006).



Figura 2.23: Imagen del flujómetro de tipo turbina. (Fuente propia).

2.6.2. Manometría

Para realizar mediciones de presión o vacío se utilizan manómetros o vacuómetros respectivamente, existen instrumentos con ambas funciones o sea miden tanto presión como vacío. Existen diversos tipos de manómetros, para fines de este informe se describirá el de tipo Bourdon, que es un dispositivo mecánico, nombrado así en honor del ingeniero e inventor francés Eugene Bourdon (1808-1884). Consta de un tubo metálico hueco, doblado como un gancho, cuyo extremo se cierra y se conecta a la aguja de un indicador de carátula. Cuando el tubo se abre a la atmósfera, el tubo queda sin cambiar de forma y, en este estado, la aguja de la carátula se calibra para que dé la lectura cero (presión manométrica). Cuando se presuriza el fluido que está en el tubo, éste tiende a enderezarse y mueve el agua en proporción a la presión aplicada (Cengel, Cimbala, 2006).



Figura 2.24: Imagen de los manómetros utilizados. (Fuente propia).

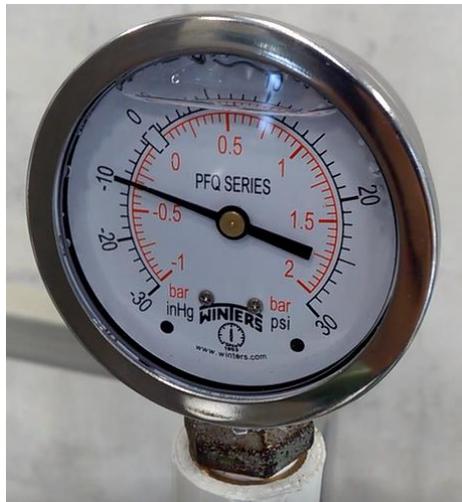


Figura 2.25: Imagen de un Mano-vacuómetro. (Fuente propia).

2.6.3. Variables eléctricas

Se presenta una toma eléctrica trifásica, con voltaje de 208 V en cada fase.



Figura 2.26: Imagen del interruptor trifásico. (Fuente propia).

El panel de control es un diseño eléctrico el cual funciona como interfaz entre la toma eléctrica y las bombas centrífugas, además posee una serie de botones conectados a diferentes circuitos que pueden poner en funcionamiento las bombas de manera singular o en conjunto, así como desactivarlas. Cada botón está etiquetado de acuerdo a su función, entre ellos se pueden destacar los de encendido y apagado, los de selección y muy importante el de emergencia.



Figura 2.27: Imagen del panel. (Fuente propia).

El regulador de frecuencia está conectado al panel de control y tiene la capacidad de variar la frecuencia eléctrica, de esta manera cuando se pone en funcionamiento recibe la corriente de la toma eléctrica (conectada al panel de control) con la frecuencia que entrega la toma eléctrica, tiene la capacidad de regular la frecuencia eléctrica y así suministrarla a las bombas centrífugas, las cuales operarán de acuerdo a dichas condiciones. En cuanto a las bombas, un cambio en la frecuencia de la corriente que las alimenta se reflejará en un cambio en las revoluciones que da por unidad de tiempo, si se aumenta la frecuencia aumentará el número de revoluciones y si disminuye la frecuencia disminuirán las revoluciones que da el eje que mueve el rodete, la frecuencia está directamente relacionada a la velocidad de giro del motor. Lo anterior a su vez variará la capacidad de las bombas de trasegar fluido, pudiendo reflejarse tanto en caudal como presión.



Figura 2.28: Imagen del variador de frecuencia. (Fuente propia).

A manera de cierre, respecto al capítulo dos (marco teórico) del presente informe final, se debe indicar, que todo lo abordado es la base teórica para el diseño del laboratorio, sus secciones y subsecciones conforman una explicación de los posteriores criterios de diseño así como procedimientos teóricos utilizados como referente para la construcción e implementación del sistema que será empleado como laboratorio de máquinas hidráulicas.

Capítulo 3

Diagnóstico y equipamiento

En vista de que es necesaria la construcción de un laboratorio de máquinas hidráulicas funcional, en el cual se puedan realizar prácticas relacionadas con los temas abordados en el curso teórico respectivo, se realizan una serie de abordajes tales como realizar entrevistas al cuerpo docente relacionado al curso, así como también inventarios de materiales existentes que podrían eventualmente servir para la construcción. Lo anterior con el fin de tener claras las necesidades de docencia y los materiales con los que se podría contar y a partir de dicha información contar con un punto de partida para realizar el diseño.

3.1. Requerimientos de docencia

La Escuela de Ingeniería Mecánica UCR, dentro de su plan de estudios ofrece distintas líneas de estudio en las cuales figuran el departamento de diseño, el departamento de materiales y manufactura, el departamento de termo-fluidos, además para el grado de Licenciatura existen una serie de cursos opcionales ligados con alguno de los departamentos antes mencionados. El departamento de termo-fluidos ofrece los siguientes cursos, Termodinámica I (IM0313), Termodinámica II (IM0413), Mecánica de Fluidos (IM0423), Transferencia de Calor (IM0305), Máquinas hidráulicas (IM0409), Principios de Refrigeración y Aire Acondicionado (IM0414), Sistemas de Aire Acondicionado (IM0905) y Plantas de Vapor (IM0431), si el estudiante así lo desea podría ampliar este tema mediante algún curso optativo asociado al tema. Este informe final se centra en el curso de Máquinas Hidráulicas pues conlleva el diseño e implementación de un laboratorio asociado a este. Además dentro de los temas tratados también se involucran los relacionados con el curso de Mecánica de Fluidos por lo cual también se tomará en cuenta dentro de los requerimientos de docencia.

El curso de Máquinas Hidráulicas (IM-0409) presenta dentro de sus objetivos específicos los siguientes (Murillo, 2018):

1. Estudiar los diferentes tipos de turbinas hidráulicas más utilizadas en Costa Rica.
2. Seleccionar el tipo de turbina hidráulica más apropiada, de acuerdo con las características de un potencial aprovechamiento hidráulica.
3. Conocer las características de un aprovechamiento hidráulico.
4. Estudiar los tipos de bombas más utilizadas en la industria costarricense.
5. Seleccionar el tipo de bomba más apropiado, para que pueda cumplir con las condiciones particulares que se presentan en la industria costarricense.
6. Seleccionar los mantenimientos preventivos y correctivos, más comunes en los diferentes tipos de bombas estudiadas.
7. Desarrollar ejemplos de selección de bombas.
8. Manipular un banco de pruebas de bombas centrífugas, para confirmar los aspectos teóricos vistos en clase.
9. Confeccionar un informe técnico

Como se puede observar, el objetivo específico número 8 se refiere a la manipulación de un banco de bombas centrífugas con la intención de poner en práctica los conocimientos adquiridos durante las horas de teoría.

El curso de máquinas hidráulicas se divide en tres temas básicamente, turbinas, bombas centrífugas y bombas de desplazamiento positivo.

En cuanto a turbinas, estas se clasifican según sus características, como por ejemplo tipo Francis y tipo Pelton, además se estudian otros tipos como Banki o Kaplan. Sin embargo para efectos de laboratorio se estudiaran Francis y Pelton, turbinas que a su vez son analizadas en funcionamiento durante una gira de campo a las represas hidroeléctricas de Cachi (Francis) y Río Macho (Pelton). La idea de una guía de laboratorio es permitir al estudiante ver las turbinas en funcionamiento, así como poder operarlas y entender su funcionamiento. Además es importante poder realizar mediciones de los distintos parámetros de funcionamiento con el fin de aplicar la teoría vista en clase en el reporte de laboratorio.

En cuanto a las bombas centrifugas este tema se divide en dos tipos: centrifugas y desplazamiento positivo, abarcando diversos subtipos dentro del desplazamiento positivo. En el caso del laboratorio se cuenta con equipo del tipo centrífugo. La idea de una guía de laboratorio para bombas centrifugas es permitir al estudiante observar en funcionamiento dicha maquinaria, así como poder operarlas con el fin de entender su funcionamiento. Por medio de mediciones durante el funcionamiento se podrá poner en práctica todo lo aprendido respecto a la teoría durante las horas de clase.

El diseño e implementación de este laboratorio permite al estudiante del curso de Máquinas Hidráulicas una gran gama de posibilidades prácticas previamente estudiadas en la clase teórica, entre las cuales destacan:

- Cálculo y verificación de NPSH en un sistema real, con datos tomados en el sitio, ficha técnica del equipo y diseño del sistema a disposición.
- Cálculo y verificación de TDH en un sistema real, con datos tomados en el sitio, ficha técnica del equipo y diseño del sistema a disposición.
- Cálculo y verificación de sistemas en serie y paralelo de un sistema real, con datos tomados en el sitio, ficha técnica del equipo y diseño del sistema a disposición.
- Cálculo y verificación potencia y eficiencia de un sistema real, con datos tomados en el sitio, ficha técnica del equipo y diseño del sistema a disposición.
- Cálculo de potencia generada y eficiencia en turbinas del tipo Francis y Pelton.

El curso de Mecánica de Fluidos (IM-0423) presenta dentro de sus temas de clase, los siguientes tópicos estrechamente relacionados con el laboratorio de máquinas hidráulicas (Monge, 2021):

1. Utilizar las correlaciones empíricas comúnmente asociadas a casos particulares de dinámica de fluidos para pronosticar el comportamiento de algunos elementos de máquinas.
2. Flujo interno en tuberías llenas, utilizar las ecuaciones, diagramas y los principios de la mecánica de fluidos para comprender el comportamiento de un fluido al trasegar dentro de una tubería.
3. Pérdidas en tuberías llenas, comprender los procedimientos y principios utilizados para calcular las pérdidas de energía que ocurren cuando un fluido es trasegado dentro de una tubería.
4. Turbo maquinaria, conocer los distintos tipos de máquinas utilizadas con fluidos, tanto para el trasiego como para a generación de energía, así como su funcionamiento.
5. Sección de bombas, estudiar los distintos tipos de bombas disponibles en el mercado, así como sus principios de funcionamiento.

Los estudiantes del curso de Mecánica de Fluidos podrán aprovechar el laboratorio de máquinas hidráulicas respecto a los temas anteriormente mencionados, de la siguiente manera:

- Observar una bomba centrífuga en funcionamiento y tener acceso a los datos de diseño del sistema de trasiego de fluido.
- Poder tener acceso a la ficha técnica de una bomba centrífuga que ha visto en funcionamiento, de esta manera podrá corroborar datos y estudiar la información teórica y práctica.
- Realizar cálculos de pérdidas en tubería para trasiego de fluidos con turbo maquinaria y compararlos con el diseño real.
- Observar sistemas de bombas en serie y paralelo y corroborar sus respectivas ecuaciones.
- Calcular los parámetros adimensionales de las bombas allí presentes, con datos reales tomados en el laboratorio.
- Realizar mediciones de presión, caudal y flujo a un sistema de bombas centrífugas real en funcionamiento.
- Poder realizar cálculos de NPSH requerido, TDH, eficiencia, potencia de un sistema real en funcionamiento.
- Poder realizar variaciones en la frecuencia (variable eléctrica) del motor de una bomba centrífuga y analizar lo que ocurre a continuación con el funcionamiento de la bomba.
- Realizar mediciones de presión, caudal y flujo a un sistema de bombas centrífugas real en funcionamiento.
- Observar las turbinas Pelton y Francis en funcionamiento con sus respectivas fichas técnicas y poder realizar cálculos respecto a la generación de potencia de estas.

Por medio de varias reuniones con los profesores de los cursos relacionados con el laboratorio de máquinas hidráulicas (IM-0409 y IM-0423) se acuerda poner en funcionamiento el equipo de bombas centrífugas, esto pues este tipo de turbomaquinaria es ampliamente abordado en su parte teórica (pues son de uso común en el trasiego de fluidos en la industria y demás ambitos), siendo así de suma importancia incorporar laboratorios que complementen el aprendizaje. Por consiguiente se debe de diseñar el sistema y utilizar los componentes que se puedan rescatar del antiguo laboratorio. Dentro del nuevo diseño se deberá incluir la posibilidad de trabajar con cada bomba de manera individual y permitir la posibilidad de realizar el procedimiento necesario para calcular las curvas de TDH, NPSH y potencia para cada bomba. Además, también se deberá contemplar que el sistema pueda funcionar en serie y en paralelo.

Respecto a las turbinas, dado que se cuenta con una equipo nuevo de este tipo, será necesario redactar las guías de laboratorio ajustadas para dicho equipo.

Algunas de las actividades que se realizar durante las numeras reuniones con los profesores encargados, son las siguientes:

- Planteamiento de una propuesta para diseñar e implementar el laboratorio de máquinas hidráulicas.
- Realizar listas de necesidades prácticas deseables a satisfacer con el diseño de laboratorio.
- Redacción de listas de posibles prácticas de laboratorio a impartir.
- Ubicación en sitio de los equipos de laboratorio con el fin de que exista un orden dentro del laboraría tanto para la ubicación del equipo a diseñar como de los demás equipos de fluidos.
- Revisión de diseños preliminares y sus respectivas correcciones y aportes Revisión y aprobación de los diseños finales.
- Coordinación para la compra del material necesario. Supervisión y consejería durante la construcción del sistema.

Además cabe mencionar que en paralelo con lo anteriormente descrito, se mantuvo una constante comunicación respecto a todos los detalles que conlleva el diseño e implementación del laboratorio pertinente a este informe de proyecto.

3.2. Inventario de componentes y equipos

La Escuela de Ingeniería Mecánica cuenta con diversos laboratorios para uso docente, uno de estos corresponde al laboratorio de fluidos el cual cuenta con equipos utilizados para impartir los laboratorios de los cursos de Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas, equipos tales como bombas centrífugas, turbinas, túnel de viento, pérdidas en tubería, dispositivo Reynolds entre otros, se encuentran dentro de este laboratorio. Para efectos de este informe se abordarán las bombas centrífugas y las turbinas.

3.2.1. Turbinas

En el caso de las prácticas con turbinas, la Escuela de Ingeniería Mecánica compró todo un equipo para el laboratorio de mecánica de fluidos, dentro de este, se cuenta con dos turbinas, una del tipo Francis y la otra tipo Pelton, las cuales vienen diseñadas para realizar pruebas de laboratorio tales como se tiene planeado. Por esta razón en relación a las prácticas de laboratorio de turbina se utilizarán las turbinas nuevas para las cuales se redactarán sus respectivas guías.

La turbina Francis se compone de dos módulos, el HM 150 que es el módulo básico que funciona como base para todos los demás módulos, el HM 150.20 que es la turbina Francis, de la cual se muestra una ilustración a continuación:

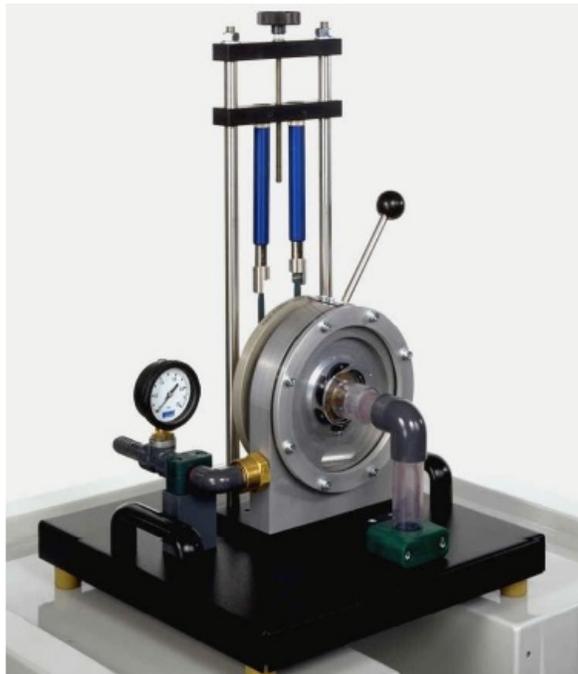


Figura 3.1: Turbina Francis. Fuente: Gunt Hamburg, 2016.

La turbina Pelton se compone de dos módulos, el HM 150 que es el modulo básico que funciona como base para todos los demás módulos, el HM 150.19 que es la turbina Pelton, de la cual se muestra una ilustración a continuación:

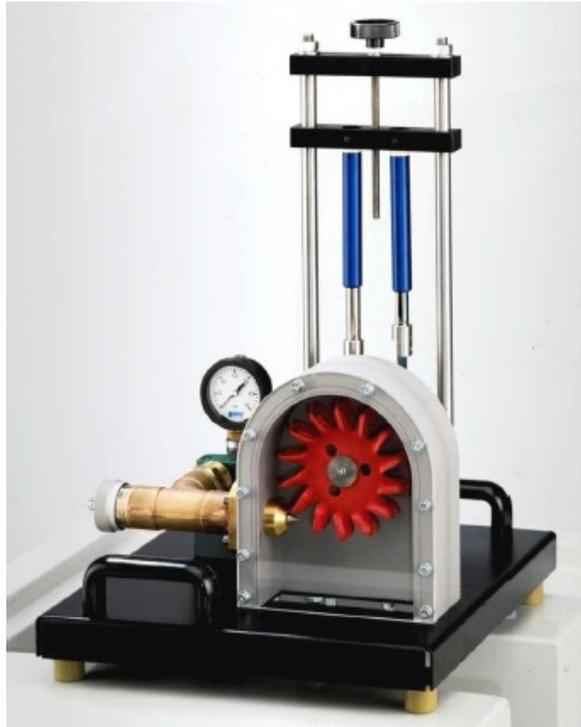


Figura 3.2: Turbina Pelton. Fuente: Gunt Hamburg, 2016.

3.2.2. Bombas centrífugas

Se cuenta con dos bombas centrífugas idénticas entre sí, marca GOLDS PUMPS, modelo 1ST1E5E4. Ambas bombas llevan algunos años sin ser puestas en mantenimiento. Son de tipo trifásico y diseñadas con auto cebado.

En vista de que las bombas estuvieron en funcionamiento durante varios años en el antiguo laboratorio de máquinas hidráulicas y luego de eso se mantuvieron otro par de años fuera de servicio, resulta necesario darles mantenimiento antes de volverlas a poner en funcionamiento. Con tal fin, se entabló comunicación con el representante del fabricante en Costa Rica, la empresa Zebol, quienes en un inicio donaron dichas bombas. Una vez establecido un canal de comunicación con ellos se coordinó llevar la bombas a su taller de servicio en donde se realizaron un diagnóstico de ambas bombas llegando a la conclusión de que se debía de cambiar los sellos mecánicos, o rings (junta tórica) y los rodamientos de ambas bombas, además en el caso de una bombas se debe de cambiar el ventilador que estaba quebrado. Se realizó dicho mantenimiento, quedando ambas bombas en condiciones de operar correctamente. Se coordinó para traer las bombas de vuelta a las instalaciones de la UCR, donde fueron debidamente probadas, constatando que funcionaban perfectamente.

Cabe mencionar que para poner en funcionamiento dichas bombas centrífugas, se debió habilitar una toma trifásica para la debida alimentación eléctrica de ambas bombas, se coordinó con el departamento de mantenimiento del edificio de laboratorios de la Facultad de Ingeniería de la UCR, para pactar una cita con el fin de avaluar los detalles a tomar en cuantas para la instalación de la toma trifásica. Una vez los funcionarios en sitio se les indicó en lugar donde se debería de colocar la toma y se les mostró el equipo que se debería de alimentar, se realizó un recorrido por las instalaciones determinando las conexiones y material que se debería de considerar. Posteriormente ese coordinó la compra de material por parte del departamento de mantenimiento. Ya con los materiales se procedió a realizar la instalación, la cual consistió en conectarse de la toma trifásica instalada en el techo del laboratorio y por medio de cable y tubo de una manera muy estética llegar hasta el punto indicado e instalar una caja de encendido y apagado de acuerdo a las especificaciones del equipo a conectar.

El siguiente paso fue coordinar con el departamento de maquinaria y equipo de la UCR para conectar de la toma trifásica habilitada la caja de control y variador de frecuencia y posteriormente conectar las bombas a la caja de control. Se concretó una cita para que los funcionarios pudieran ver las conexiones que se deberían de realizar, así como los materiales necesarios. Se coordinó la compra del material por parte del departamento de maquinaria y equipo y seguidamente se coordinó la conexión. Se conectó la caja de control y regulador de frecuencia a la toma trifásica, se conectaron las bombas a la caja de control, con cajas de registro donde se realizaron las conexiones, el trabajo fue realizado de manera estética y acorde con las medidas de seguridad, se probó el debido funcionamiento de las bombas en conjunto con la caja de control y variador, el cual fue óptimo.

3.2.3. Accesorios y tubería existente

En el laboratorio de fluidos de la Escuela de Ingeniería Mecánica, se encuentran partes del antiguo laboratorio de máquinas hidráulicas, se procede a realizar un inventario del cual se pueden reutilizar diversos componentes citados a continuación:

- Estructura Metálica para apoyo de tanques de agua.
- 2 tanques de agua, uno de 750L y otro de 450L.
- 7 válvulas de compuerta, donde 4 son de 1 1/4, 2 de 1 1/2 y una de 2 pulgadas (de diametro).
- 3 válvulas de globo, donde una es 2 pulgadas y dos de 1 pulgada.
- 3 válvulas de globo, donde una es de 1 1/4 y dos de 1 pulgada.
- 3 flujómetros, uno del tipo rotámetro, uno tipo resorte opuesto y uno de turbina.
- 7 manómetros tipo Bourdon, con diversos rangos de medida
- Una caja (o panel) de control, con instalación eléctrica y sensores de nivel del fluido.
- Un regulador de frecuencia.



Figura 3.3: Imagen de instrumentos reutilizables. (Fuente propia).



Figura 3.4: Imagen de estructura, tanques, panel y variador. (Fuente propia).

3.2.4. Módulos didácticos

A continuación se presenta una descripción de los equipos para el curso de Mecánica de Fluidos, IM-0423.

Módulo HM 150. Este módulo se utiliza con todos los demás equipos, posee una bomba sumergible para suministrar fluido a los otros módulos que se le colocan encima, además depositos para el fluido.



Figura 3.5: Módulo básico. (Fuente: Gunt Hamburg, 2016).

Módulo HM 150.14. En la dinámica de fluidos, un vórtice es un flujo circular de un fluido causado por gradientes de velocidad lo suficientemente grandes. En la práctica, esto se puede observar en el desagüe de un tanque a una tubería o cuando dos fluidos con velocidades distintas se encuentran. Con el equipo de ensayo HM 150.14 pueden generarse y estudiarse vórtices libres y forzados. El equipo de ensayo dispone de un depósito transparente con toberas, distintos insertos en la salida de agua, una rueda de paletas y un dispositivo palpador para registrar los perfiles de los vórtices, (Gunt Hamburg, 2016). A continuación una ilustración:



Figura 3.6: Equipo para crear y estudiar vórtices. (Fuente: Gunt Hamburg, 2016).

Módulo HM 150.09. Con el Aparato de orificio y chorro se pueden calibrar toberas de distinto diámetro. Un cilindro de plexiglás, con un rebosadero ajustable y una escala, permite volver a ajustar y leer con exactitud la altura de la columna de agua. En el pie cilíndrico se pueden utilizar distintas toberas, una junta especial evita que haya fugas. Para medir el chorro de salida, el equipo cuenta con varas de posición y con una bandeja blanca que se coloca detrás del chorro, (Gunt Hamburg, 2016). A continuación una ilustración:



Figura 3.7: Descarga horizontal por orificios. (Fuente: Gunt Hamburg, 2016).

Módulo HM 150.12. El equipo HM 150.12 Aparato de Descarga por Orificio sirve para el análisis de las pérdidas de caudal debidas a salidas a través de un orificio de conducción hacia el exterior. Las pérdidas se pueden analizar para distintas cantidades de flujo, (Gunt Hamburg, 2016). A continuación una ilustración:



Figura 3.8: Descarga vertical por orificios. (Fuente: Gunt Hamburg, 2016).

Módulo HM 150.11. El equipo HM 150.11 permite realizar experimentos para la medición de caudal y de presión y cálculos de pérdidas de corriente y transcurso de presión en tubos y elementos de tubería especiales, (Gunt Hamburg, 2016).



Figura 3.9: Pérdidas en tuberías. (Fuente: Gunt Hamburg, 2016).

Módulo HM 150.13. Este equipo para la medición de caudales incluye tres caudalímetros distintos y se permite investigar experimentalmente las siguientes relaciones: Comparación de diferentes caudalímetros, investigación de las relaciones existentes entre el caudal y la presión al medir caudales, determinación de índices de caudal, calibración de caudalímetros, (Gunt Hamburg, 2016).



Figura 3.10: Medición de caudal. (Fuente: Gunt Hamburg, 2016).

Módulo HM 150.11. El equipo de ensayo permite representar la inundación laminal y turbulenta. La inundación se puede ver gracias a un trazado en tinta en un fragmento de tubo transparente, (Gunt Hamburg, 2016).



Figura 3.11: Ensayo de Osborne Reynolds. (Fuente: Gunt Hamburg, 2016).

Los módulos didácticos acá presentados corresponden a equipo recientemente adquirido por la Escuela de Ingeniería Mecánica, esto con el fin de proveer la posibilidad de realizar laboratorios de calidad para los estudiantes del curso de Mecánica de Fluidos, este curso se ubica previo al curso de Máquinas Hidráulicas. De esta manera la escuela ofrece una amplia gama de laboratorios en el area de fluidos, constituida por los módulos didacticos de reciente adquisición y el sistema de bombas centrífugas diseñado y construido durante este proyecto.

Se cuenta también con otros equipos relacionados con mecánica de fluidos, dentro de los que se encuentran los siguientes:

Tunel de viento: El cual cuenta con su propio motor electrico e instrumentos de medicón, además cuanta con un hardware y software para su debido funcionamiento.



Figura 3.12: Tunel de viento. (Fuente: Propia, 2021).

Anemómetro: Este instrumento marca Extech, modelo EN300, es utilizado para medir las condiciones ambientales, tales como humedad, temperatura, velocidad del aire, entre otras.



Figura 3.13: Anemómetro. (Fuente: Propia, 2021).

Viscosímetro: Este instrumento marca Exttech, modelo 345060, es utilizado para medir la viscosidad de distintos fluidos.



Figura 3.14: Viscosímetro. (Fuente: Propia, 2021).

3.2.5. Equipos comerciales

En esta sección se presentan algunos equipos comerciales, que cumplen con la misma función que el sistema de bombas centrífugas propuesta en este documento. La idea es poder mostrar sus características para así poder tener un punto de comparación que permita observar fortalezas, debilidades o similitudes del equipo aquí diseñado y construido con respecto a los equipos que ofrece el mercado.

La empresa Alemana GUNT, ofrece un sistema de módulos para poder realizar prácticas con bombas centrífugas, de manera que un módulo consiste en una bomba, mientras que otro modulo consiste en un par de bombas que pueden funcionar en serie o paralelo. Ambos equipos funcionan con un tercer módulo que cumple la función de base.



Figura 3.15: Bomba centrífuga marca GUNT. (Fuente: Gunt Hamburg, 2018).

En la figura 3.12 se muestra el equipo correspondiente al módulo didáctico para realizar las prácticas de laboratorio correspondiente a una bomba centrífuga. En la figura 3.13 se muestra este equipo sobre el módulo base llamado HM 150, el cual funciona como depósito, además dispone de una bomba sumergible para trasegar fluido a la bomba centrífuga.

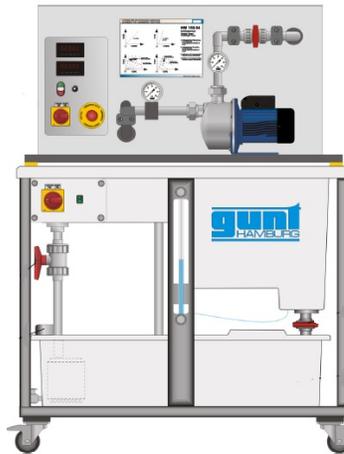


Figura 3.16: Bomba centrífuga sobre la base HM 150. (Fuente: Gunt Hamburg, 2018).

De acuerdo con el fabricante con este equipo se pueden realizar las siguientes prácticas de laboratorio: registrar la curva característica de bomba, registrar curvas características de bomba para diferentes números de revoluciones, elaborar gráficos de potencia y eficiencia (GUNT, 2018).

El otro módulo corresponde a un sistema que consta de dos bombas, las cuales pueden funcionar en serie o en paralelo, la figura 13.14 muestra el módulo de dos bombas, así como un diagrama ya con este equipo sobre el módulo base HM 150.

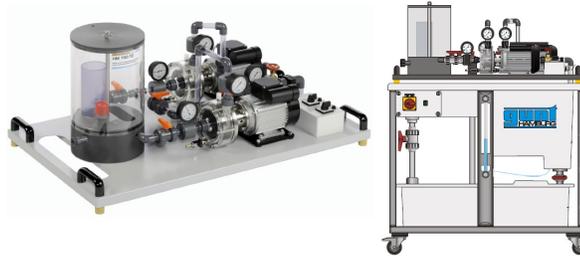


Figura 3.17: Módulo en paralelo y serie sobre la base HM 150. (Fuente: Gunt Hamburg, 2014).

De acuerdo con el fabricante con este equipo se pueden realizar las siguientes prácticas de laboratorio: determinación de la altura de elevación, registro de la característica de la bomba, determinación de la potencia hidráulica y determinación del punto de funcionamiento (GUNT, 2014).

Otro equipo disponible en el mercado es el de la marca española EDIBON, el cual consiste en un banco de bombas en serie y paralelo, en la figura 3.15 se muestra el equipo correspondiente.



Figura 3.18: Banco de bombas en serie y paralelo. (Fuente: Edibon, 2017).

El fabricante indica que las bombas centrífugas pueden funcionar: aisladamente, acopladas en serie o acopladas en paralelo. Una bomba está accionada a través de un motor trifásico con posibilidad de regulación y medición de la velocidad de giro así como de medición del par mecánico transmitido, y la otra bomba está accionada a través de un motor monofásico (Edibon, 2017). Entre las prácticas que se pueden realizar con este equipo destacan: obtención de curvas TDH y eficiencia, ensayo de cavitación, obtención de curvas NPSH, acoplamiento en serie o paralelo para bombas iguales o distintas, (Edibon, 2017).

El siguiente equipo comercial corresponde a la marca francesa Pignat, el cual consiste en dos bombas centrífugas conectadas entre sí a un tanque común, en la figura 3.16 se puede observar dicho equipo.



Figura 3.19: Banco de bombas centrífugas. (Fuente: Pignat, 2022).

Según el fabricante el objetivo de este banco de estudio de bombas es de familiarizar al usuario con diferentes nociones asociadas al empleo de una bomba centrífuga, y además particularmente a la noción de presión disponible en la salida de la bomba. El banco está diseñado para estudiar las bombas de manera individual, juntas en serie o en paralelo (Pignat, 2022). Entre las prácticas posibles de realizar con este equipo destacan las siguientes: trazar curvas TDH a una misma velocidad o variándola, cálculo de rendimiento eléctrico y potencia hidráulica, analizar el fenómeno de cavitación, asociación en serie y paralelo (Pignat, 2022).

Por último se presenta un banco de pruebas de la empresa italiana Veneta, el cual consiste en una bomba centrífuga conectada por medio de tuberías a un depósito de fluido, en la figura 3.17 se muestra el equipo.



Figura 3.20: Banco de prueba de bombas centrífugas. (Fuente: Veneta, 2022).

Según el fabricante este equipo puede ser utilizado para calcular la curva TDH del equipo, así como cálculo de potencia absorbida por el motor, número de revoluciones, medición del par y cálculo de eficiencia (Veneta, 2022).

Con respecto a la sección de equipos comerciales disponibles en el mercado, se indica que ya presentados ciertos equipos de fabricación Alemana, Francesa, Española e Italiana y que estos son solo un ejemplo de alternativas posibles al equipo que se diseña y construye por medio de este proyecto, cabe mencionar que en el mercado e incluso en las empresas citadas hay más alternativas. Sin embargo de manera general este tipo de equipos, los cuales se conocen como banco para bombas centrífugas comparten muchas características, de modo que aunque su diseño puede variar según el fabricante, sus componentes, características y funciones se comparten, haciéndolos en términos prácticos bastante similares. En la descripción de estos equipos se puede observar que unos constan de una sola bomba conectada a un depósito de fluido, mientras que otros más completos constan de dos bombas, las cuales se pueden utilizar de manera individual o en asociación en serie o paralelo, también cabe mencionar que todos estos equipos presentan un solo depósito de fluido tanto para succión como descarga. Dentro de las posibles prácticas destacan cálculo y creación de curvas TDH y NPSH, además de eficiencia y potencia, análisis del fenómeno de cavitación, mediación de flujo, presión y vacío, lo anterior son las características usuales que presentan los equipos comerciales disponibles antes citados.

Por último, a manera de cierre del capítulo de diagnóstico y equipamiento se indica que el objetivo fue mostrar el equipo con el que se cuenta en el laboratorio de fluidos, tanto para el curso de Mecánica de Fluidos como para el de Máquinas Hidráulicas, con el fin de que el lector pueda conocer el material con que se cuenta y las posibilidades que brinda esto. Además indicar que el equipo que se diseña y construye por medio de este proyecto vendrá a fortalecer el equipamiento de este laboratorio en conjunto con el equipo ya disponible, con el fin de brindar mejores oportunidades de aprendizaje al estudiantado.

Capítulo 4

Sistema de bombas centrífugas

En este capítulo se presentan los resultados del diseño (sistema de tuberías), así como la lista de materiales necesarios de adquirir según requerimientos del diseño, además se presentan las fases de construcción del sistema y las pruebas de su debido funcionamiento. Cabe mencionar que para lograr lo anteriormente mencionado el autor se apoya de los anteriores capítulos, específicamente en el marco teórico, el diagnóstico y equipamiento, pues la información allí recolectada permite elaborar el diseño que a su vez determinará la construcción y que por último se verá reflejado en las pruebas de funcionamiento.

4.1. Diseño

Se presenta la necesidad de crear un laboratorio que permita experimentar con bombas centrífugas, para el curso de Máquinas Hidráulicas de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad de Costa Rica. Se plantea crear las siguientes guías de laboratorio: NPSH, TDH, sistema en paralelo y sistema en serie.

Conociendo las prácticas que se desean realizar por medio del sistema de bombas centrífugas, además teniendo claro el punto de partida respecto a la estructura existente que funciona como base para los tanques de almacenamiento de líquido, sus dimensiones, altura y demás detalles, además de las tuberías y accesorios disponibles en inventario, se procede a crear un diseño para el cual se utilizarán los criterios antes mencionados, esto con la intención de lograr cumplir el objetivo de funcionamiento que requiere cada práctica de laboratorio de manera armónica con el inventario existente. Para lograr esto se creará un diseño que responda a las necesidades curriculares de cada práctica, así como a las condiciones ya invariables (material disponible, estructura) y posteriormente se determinará todo el material necesario para implementar a cabalidad el sistema con un funcionamiento adecuado.

A continuación se mencionan los aspectos a tomar en cuenta para cada una de las prácticas que se desean implementar.

NPSH: Se calculará un NPSH práctico, por medio de los datos medidos al operar el equipo, luego el dato calculado se comparará con el NPSH requerido que brinda el fabricante, de esta manera se podrán corroborar las condiciones de cavitación. Para esta función se debe de succionar agua de un tanque (ubicado en la parte baja del sistema) y llevarla a otro tanque más elevado (en la parte superior del sistema). Además se debe de colocar una válvula de globo para regular el caudal de succión, cuando esta válvula esté completamente abierta el sistema podrá trabajar en su punto de operación de diseño (cercano a su punto de mayor eficiencia), luego por medio de la válvula de globo en succión se reducirá progresivamente el flujo aportando pérdidas lo cual ocasionará variaciones en el sistema, que luego de un aumento en las pérdidas de presión en la succión, generadas por el estrangulamiento que se presenta al ir cerrando la válvula, ocasionará que la bomba presente los primeros síntomas de cavitación. Para poder medir dichas pérdidas y el funcionamiento del sistema, se coloca un vacuómetro en la succión (entrada de la bomba) y un manómetro en la descarga (descarga de la bomba), además dos medidores de caudal en la descarga. El diseño del sistema de tuberías permite realizar esta práctica para cada bomba de manera individual o incluso en serie o paralelo.

TDH: Para esta función se necesita succionar agua de un tanque (ubicado en la parte baja del sistema) y llevarla a otro tanque más elevado (en la parte superior del sistema). Además se debe de colocar una válvula de globo para regular el caudal en la descarga, cuando esta válvula esté completamente abierta el sistema podrá trabajar en su punto de operación de diseño (cercano a su punto de mayor eficiencia), luego por medio de la válvula de globo en descarga se cerrará progresivamente el flujo aportando pérdidas lo cual ocasionará variaciones en el sistema de tuberías, estos cambios permitirán tomar datos que luego se utilizarán para crear la curva de operación de la bomba. Para poder medir dichas pérdidas y el funcionamiento del sistema, se coloca un vacuómetro en la succión (entrada de la bomba) y un manómetro en la descarga (descarga de la bomba), además dos medidores de caudal en la descarga. El diseño del sistema de tuberías, permite realizar esta práctica para cada bomba de manera individual o incluso en serie o paralelo (para el sistema).

Sistema en paralelo: Para esta función se necesita succionar agua de un tanque (ubicado en la parte baja del sistema) y llevarla a otro tanque más elevado (en la parte superior del sistema). Cada bomba debe de tener una válvula de compuerta en su boca de entrada (succión) y una válvula de globo en la descarga, además cada bomba deberá de tener un medidor de flujo en su boca de descarga y otro medidor más adelante donde los flujos de ambas bombas se unen. Las bombas succionarán en un inicio por una tubería única para ambas, luego por medio de una T y dos codos se podrá repartir la succión entre las dos bombas. Con todas las válvulas totalmente abiertas el sistema trabajará en paralelo en su punto de mayor eficiencia, luego, por medio de las válvulas de globo en la descarga se podrán introducir pérdidas, con estos datos se podrá elaborar la curva de operación del sistema en serie. Para poder medir dichas pérdidas y el funcionamiento del sistema, se coloca un vacuómetro en la succión y un manómetro en la descarga de cada bomba, además tres medidores de caudal en la descarga, uno en la salida de una bomba, otro en la salida de la otra bomba y un tercero que mida el caudal sumado de ambas bombas.

Sistema en serie: Para esta función se necesita succionar agua de un tanque (ubicado en la parte baja del sistema) y llevarla a otro tanque más elevado (en la parte superior del sistema). Cada bomba debe de tener una válvula de compuerta en su boca de entrada (succión) de modo que la válvula de entrada de una de las bombas esté abierta y la de la otra bomba cerrada, para que solo una bomba succione. Luego para la bomba que esta succionando directo del tanque se necesita una válvula (la de globo que se utiliza para la práctica de TDH) la cual estará cerrada. Un aspecto importante de esta función es que deberá existir una tubería que conecte la descarga de una bomba (la que succiona directo del tanque) con la succión de la otra, logrando así un sistema en serie, dicha tubería deberá tener una válvula de bola que permita abrir o cerrar según se desee trabajar en serie o no. En la descarga de la segunda bomba (la que se conecta a la descarga de la primer bomba) deberá haber una válvula de globo para introducir pérdidas cuando sea necesario y así obtener los datos necesarios para crear la curva de operación del sistema en serie. Para poder medir dichas pérdidas y el funcionamiento del sistema, se coloca un vacuómetro en la succión y un manómetro en la descarga de cada bomba, además tres medidores de caudal en la descarga.

Las posibles funciones del laboratorio antes mencionadas y sus requerimientos fueron los criterios de diseño base. Sin embargo se indica que ese diseño permitirá realizar otro tipos de prácticas de laboratorio, tales como eficiencia-potencia, altura mínima de succión, uso de un regulador de frecuencia, etc. Sin embargo los criterios de las funciones mencionadas permiten realizar las otras funciones. Tal y como se mencionó, se conservó dentro del diseño el regulador de frecuencia que incluía el laboratorio antiguo.

Una vez que se tiene claro con que se cuenta y que se desea construir, se realiza un diagrama, en el cual se plasma la configuración del sistema en cuanto a forma y dimensiones. Luego con base a dicho diagrama se realizan los calculos y ajustes necesarios para que el sistema cumpla con su objetivo. Cabe mencionar que dentro del diagrama se contemplan espacios de tubería destinados a permitir un ajuste del sistema, esto es, cierta tubería a la cual se le pueden hacer recortes en su largo con el fin de que el sistema pueda empatar sus piezas como un todo. Además tambien se contemplan posibles ajustes a la hora del ensamblaje, pues es normal tener que realizar pequeños cambios que no alteren el diseño pero que se hacen necesarios al implementar un diseño, cada ajuste deberá ser determinado por la persona a cargo del proyecto con su debida justificación.

Se crea un diagrama del diseño que permite realizar todas las prácticas, se muestra tanto el ensamble así como acercamientos para una mejor visualización, sus medidas se indican posteriormente durante el desarrollo del diseño y en la sección de anexos se presenta nuevamente con sus medidas mas relevantes, esto con el fin de no cargar de más esta figura:

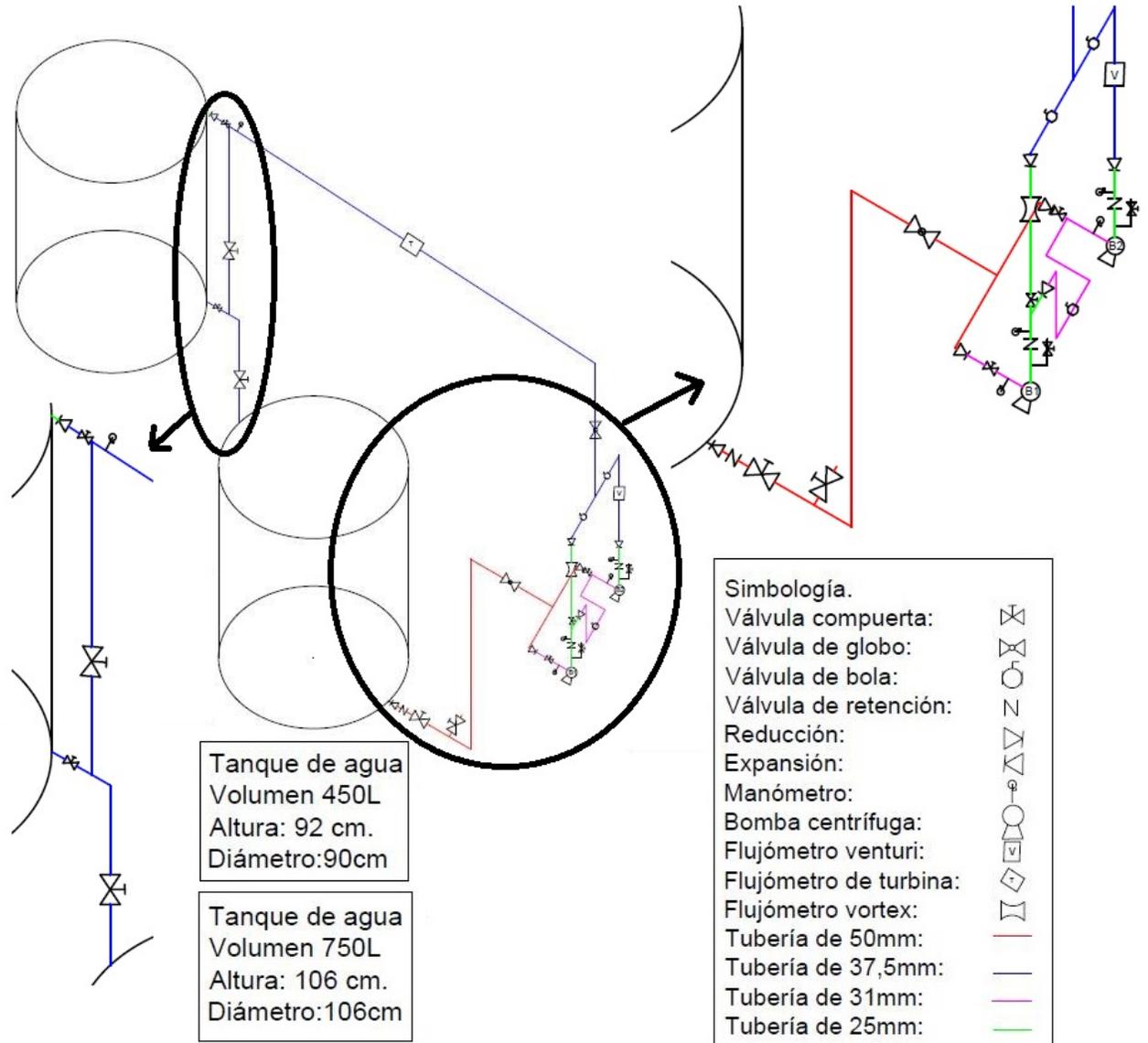


Figura 4.1: Diagrama de diseño. (Fuente propia).

De acuerdo al diseño establecido se calculan de manera teórica los valores de NPSH disponible y TDH, para comparar dichos valores de diseño con los valores del fabricante (curvas de la bomba) y posteriormente los valores obtenidos en la práctica de laboratorio correspondiente. Según los cálculos de diseño, utilizando las fórmulas expuestas en el marco teórico e indicando que el líquido a tresegar será agua y que en caso de utilizar otro fluido se deberá de considerar su densidad dentro de las ecuaciones, además la presión está dada en datos absolutos.

NPSH requerido:

$$NPSH = P_{atm} \pm \Delta H - P_{vap} - P_{fs} \quad (4.1)$$

Donde:

P_{atm} : es la presión atmosférica (ft).

ΔH : es la diferencia de altura (ft).

P_{vap} : Es la presión de vapor del agua (ft).

P_{fs} : Son las pérdidas por fricción (ft).

Entonces, la presión atmosférica (P_{atm}), depende de la altitud, el laboratorio de fluidos se encuentra a 1226 msnm (según Google Earth), con una presión de 0,86 atm = 0,87 bar = 8,87 mca = 29,15 ft (herramientasingeneria.com, 2020).

Diferencia de altura, (ΔH): para la diferencia de altura en NPSH se tomará el caso extremo de altura mínima de succión (H_{min}), esta es la altura mínima a la que debe de llegar el nivel del fluido respecto a la salida del tanque y que depende de la velocidad de succión. Según el diseño, entre la salida del tanque y el nivel máximo del mismo hay un metro. Se recomienda una velocidad de succión de entre 5 – 9 ft/s (1,5 – 2,7 m/s) pues velocidades mayores incrementan las pérdidas por fricción, la anterior es una recomendación basada en la experiencia emitida por el Instituto Hidráulico (Hydraulic Institute, 2018). Se acata la recomendación y se elige una velocidad de succión de 1,5 m/s así la altura mínima de succión será de 0,85 m (según figura 2.16) y dado que la diferencia de altura total es 1m, tenemos una diferencia de altura (ΔH) de 0,15 m. Esta altura es entre el nivel mínimo del fluido en el tanque de suministro y la altura de la boca de succión (la bomba centrífuga). Presión de vapor, (P_{vap})= 23,76mmHg = 0,33mca, a una temperatura de 25°C, (hyperphysics, 2020).

Cálculo de pérdidas en tuberías y accesorios, (P_{fs}). Utilizando la ecuación de Hazen –Willians:

$$Ln(f) = \frac{10,674 * L * Q^{1,852}}{C^{1,852} * D^{4,8704}} \quad (4.2)$$

En el capítulo de marco teórico se puede analizar esta ecuación más a fondo.

Con un caudal de $Q=A*V = (\pi r^2)*(1,5 \text{ m/s})= 2,945 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

Pérdidas en la tubería.

En la tubería de 2 pulgadas de diámetro, longitud 2,25m. $Ln(f)= 0,1 \text{ m}$.

En la tubería de 1-1/4 pulgadas de diámetro, longitud 0,25m. $Ln(f)= 0,1 \text{ m}$.

A continuación se calcula la longitud equivalente de los accesorios, utilizando tablas que brindan esta información (Piping Hand Book, 1945).

Donde:

n: número de accesorios de algún tipo.

Leq: Longitud equivalente del accesorio.

Accesorios en 2 pulgadas de diámetro:

Cuadro 4.1: Pérdidas por accesorios de 2 pulgadas de diámetro. (Fuente propia).

Accesorios	n	Leq (ft)	n* Leq (ft)
Esp $1\frac{1}{2}$ a 2 ft	1	1,9	1,9
V. Retención	1	22	22
V. Compuerta	1	2,25	2,25
V. Globo	1	60	60
Codo 90	3	5,25	15,75
T. Ramal	1	11	11
T.Principal	1	3,5	3,5

Total= 116,4 ft =35,5 mca.

En los accesorios equivalentes a tubería de 2 pulgadas de diámetro, $L_n(f) = 1,58$ m.

Accesorios en 1-1/2 pulgadas de diámetro:

Cuadro 4.2: Pérdidas por accesorios de 1-1/2 pulgadas de diámetro. (Fuente propia).

Accesorios	n	Leq (ft)	n* Leq (ft)
Entrada de tubería	1	3,5	3,5

Total= 3,5 ft = 1 mca.

En los accesorios equivalentes a tubería de 2 pulgadas de diámetro, $L_n(f) = 0,18$ m.

Accesorios en 1-1/4 pulgadas de diámetro:

Cuadro 4.3: Pérdidas por accesorios de 1-1/4 pulgadas de diámetro. (Fuente propia).

Accesorios	n	Leq (ft)	n* Leq (ft)
V. Comp	1	0,7	0,7
Contracción $2-1\frac{1}{4}$	1	1,9	1,9

Total= 2,6 ft = 0,79 mca.

En los accesorios equivalentes a tubería de 2 pulgadas de diámetro, $L_n(f) = 0,35$ m.

Pérdidas totales: $0,1+0,1+1,58+0,18+0,35 = 2,31$ mca

$NPSH = 8,87 - 0,15 - 0,33 - 2,31 = 6,08$ mca = 19,9 ft.

Según fabricante el $NPSH_{req} = 7$ ft, para el punto de mayor eficiencia.

Se sugiere que $NPSH_{disp} = 1,1 * NPSH_{req}$ (ANSI), (Mott, 2006), según marco teórico.

Se cumple con la recomendación: $19,9\text{ft} > 7,7$ ft.

Cálculo de TDH de diseño:

$$TDH = \text{Estático} + \text{Dinámico} \quad (4.3)$$

$$TDH = \Delta H + \Delta P + H_f + \frac{V^2}{2g} \quad (4.4)$$

Datos operativos de las bombas:

- TDH máximo: 76 ft = 23,16 mca.
- Punto de máxima eficiencia (PME): 51 ft = 15,5448 mca.
- TDH mínimo (según curva de funcionamiento): 40 ft = 12,192 mca.

A continuación se calcula cada elemento de la ecuación 4.4:

Diferencia de altura (ΔH) según el plano:

Estructura: 1,4m - 0,85m = 0,55m.

$\Delta H = 0,15\text{m} + 0,55\text{m} + 1\text{m} = 1,7\text{m}$.

Diferencia de presión (ΔP): $P_2 - P_1 = P_{atm} - P_{atm} = 0$

P_2 es la presión en el tanque de descarga y P_1 es la presión en el tanque de succión.

Velocidad del fluido al cuadrado entre dos veces la gravedad.

$$\frac{V^2}{2g} = \frac{1,5^2}{2 \cdot 9,8}$$

Pérdidas en tubería y accesorios:

$$H_f = H_{f(\text{succion})} + H_{f(\text{descarga})} = 2,31 \text{ mca} + H_{f(\text{descarga})}$$

Con un caudal de $Q = A \cdot V = (\pi r^2) \cdot (1,5 \text{ m/s}) = 2,945 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$

Cálculo de pérdidas en la descarga, $H_{f(\text{descarga})}$:

Tubería de 1 pulgada de diámetro:

Longitud = 0,7 m

$L_n(f) = 0,91 \text{ mca}$.

Tubería de 1-1/2 pulgada de diámetro:

Longitud = 3,45 m

$L_n(f) = 0,62 \text{ mca}$.

Accesorios en 1-1/2 pulgada de diámetro, (Piping Hand Book, 1945):

Cuadro 4.4: Pérdidas por accesorios de 1-1/2 pulgada de diámetro. (Fuente propia).

Accesorios	n	Leq (ft)	n* Leq (ft)
Expansión 1 a 1 $\frac{1}{2}$ ft	1	1,5	1,5
T. Ramal	1	8	8
Codo 90	2	4,5	9
Flujo Turbina	1	2,3	2,3
Contracción 1 $\frac{1}{2}$ a 1ft	1	1,5	1,5
V. Globo	1	46	46
V. Compuerta	1	1,75	1,75
Total= 70,05 ft = 21,35 mca.			

$$\text{Ln}(f) = 3,85 \text{ mca.}$$

Accesorios en 1 pulgada de diámetro:

Cuadro 4.5: Pérdidas por accesorios de 1 pulgada de diámetro. (Fuente propia).

Accesorios	n	Leq (ft)	n* Leq (ft)
T. Principal	2	2,5	5
V. Retención	1	12	12
V. Compuerta	1	1,25	1,25
Flujómetro Vortex	1	2,3	2,3
Total= 20,55 ft = 6,26 mca.			

$$\text{Ln}(f) = 8,13 \text{ mca.}$$

Suma total de TDH

$$TDH_{Total} = 2,31\text{mca} + 0,91\text{mca} + 0,62\text{mca} + 3,83\text{mca} + 8,13\text{mca} = 15,82 \text{ mca. } TDH_{Total} = 51,9 \text{ ft.}$$

El diseño indica que el sistema trabajará con un TDH de 51,9 ft y se recuerda que el PME según la curva de funcionamiento del fabricante es de 51 ft, lo cual permitiría iniciar la toma de datos cerca del PME, para luego incrementar las pérdidas por medio de una válvula de globo lo cual incrementará el valor de TDH y disminuirá el caudal de manera progresiva hasta poder contar con los suficientes puntos de registro para trazar la curva experimental de la bomba centrífuga.

4.2. Materiales

Una vez definido el diseño y el inventario presente en el laboratorio de fluidos, se procede a realizar una lista de materiales necesarios para iniciar el ensamble, se indica el precio de los cuales se debían de comprar, con el fin de poder concretar la construcción del sistema de máquinas hidráulicas. Los materiales que no presentan un valor es porque están disponibles.

Cuadro 4.6: Materiales necesarios para el ensamble.

Artículo	Cantidad	Precio (colones)
Tubo 2' en 3m de largo	1	18.950,00
Tubo 1 1/2' en 3m de largo	2	22.700,00
Válvula de compuerta 2'	2	0.00
Válvula de globo 2'	1	0.00
Válvula de retención 2'	1	18,000.00
Te pvc 2'	1	3,095.00
Reducción 2' a 1 1/4'	2	4,500.00
Codo 90 en 2'	2	6,990.00
Válvula de compuerta 1 1/4'	2	0.00
Manómetros	6	0.00
Te pvc 1 1/4'	2	3,500.00
Válvula de retención 1'	2	0.00
Te pvc 1'	5	8,750.00
Válvula de compuerta 1 1/4'	1	0.00
Expansión de 1 a 1 1/2'	2	2,190.00
Válvula de bola 1 1/2'	2	17,990.00
Válvula de bola 1 1/4'	1	0.00
Codo 90 en 1 1/2'	2	2,250.00
Te pvc 1 1/2'	1	2,450.00
Expansión de 1 a 1 1/2'	1	1,095.00
Válvula de compuerta 1 1/2'	4	0.00
Pegamento PVC 473 ml	1	6,195.00
Teflón profesional 1'	1	1,750.00
Flujómetro rotámetro 1 1/2'	1	0.00
Flujómetro resorte 1'	1	0.00
Flujómetro turbina 1 1/2'	1	0.00
Vacuometro 0-30 Psi	2	20,000.00
Gaza-Soporteria 2'	6	1,680.00
Gaza-Soporteria 1 1/2'	2	540.00
Pintura, diluyente y brocha	1	8,000.00

Conociendo el diseño requerido y los materiales que se pueden reutilizar del antiguo laboratorio de máquinas hidráulicas, se procedió a solicitar a la Escuela de Ingeniería Mecánica la compra de dicho material, la respuesta fue afirmativa y se procedió a coordinar el proceso de compra. A continuación se muestra un cuadro con los valores totales de los materiales necesarios:

Cuadro 4.7: Costo total de los materiales que se requieren comprar.

Detalle	Precio (colones)
Subtotal	152.875,00
Imprevistos 10	15.287,50
Transporte	16.000,00
Total	184.162,50

4.3. Construcción y armado del sistema

Se debe de construir una base metálica, en la cual se apoyaran las bombas centrífugas. Dicha base deberá ser resistente y estable, además deberá permitir que la boca de succión de ambas bombas este a una altura de un metro y 25 centímetros del suelo, con el fin de poder estar sobre el nivel del fluido y así poder ocasionar una succión negativa, es decir las bombas deberán producir vacío para succionar el fluido.

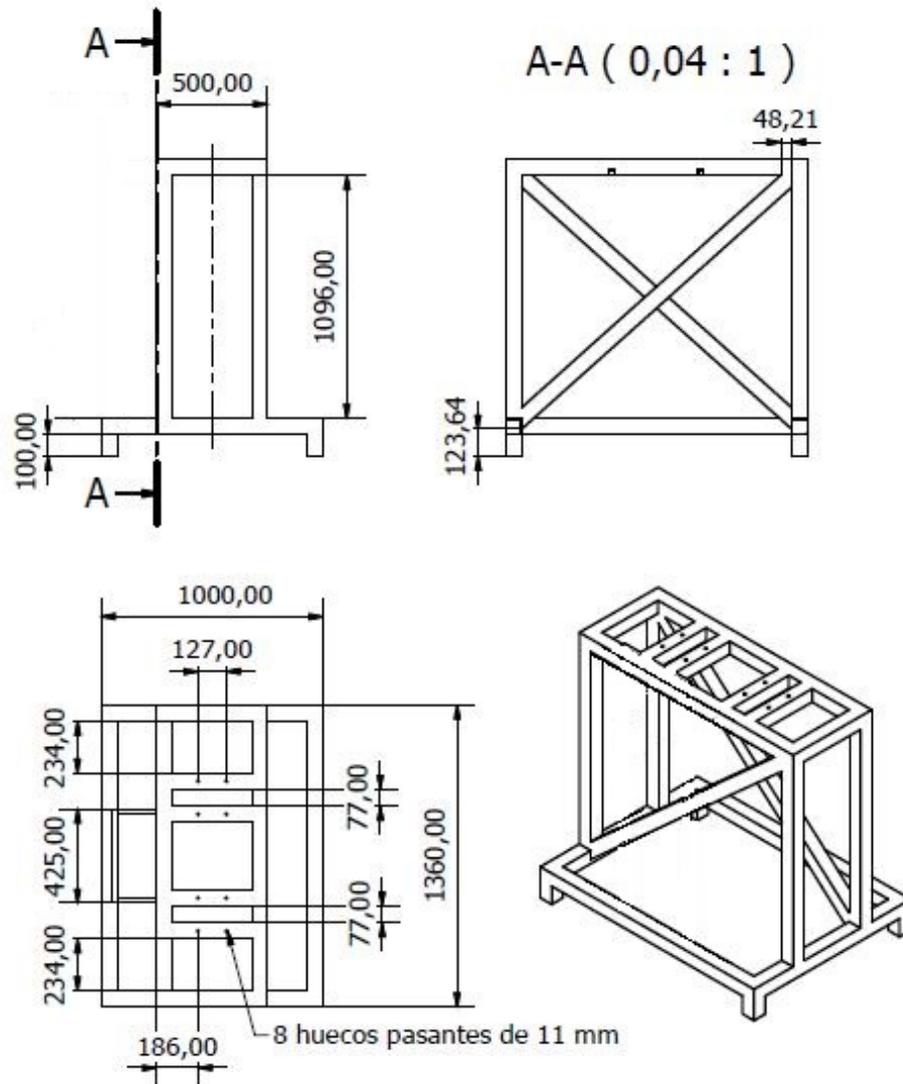


Figura 4.2: Diseño de banco para bombas centrífugas. (Fuente propia).

Para crear dicha base según el plano, se realiza todo el proceso de manufactura, desde corte de los tubos, soldado, limpieza y preparación de la superficie metálica y pintado, además se debió de perforar agujeros adecuados para la sujeción de las bombas. La base luego de todo el proceso antes citado quedo como se muestra en la figura 4.3:



Figura 4.3: Base para bombas centrífugas. (Fuente propia).

Luego se debió de ensamblar de manera provisional, el sistema de tuberías y accesorios respectivos según el diseño establecido, figura 4.4, con el fin de que el sistema sea apto para las prácticas de laboratorio requeridas. Se muestra una foto del sistema presentado:



Figura 4.4: Sistema presentado. (Fuente propia).

La intención de presentar el sistema de manera provisional es poder ver si el diseño se puede traducir de manera fidedigna a un sistema real, pues las dimensiones de tuberías y sus accesorios podrían requerir de variantes que obliguen a variar la forma o ubicación de ciertos tramos o accesorios. En esta prueba se pudo constatar que el sistema diseñado en su mayoría pudo recrearse en el sistema real, solo fueron necesarios algunos ajustes que no variaron de manera significativa el diseño.

Como se mencionó en la fase de diseño, el diagrama contemplaba dos segmentos de tuberías que podían ajustar su largo para hacer encajar el sistema, uno en la succión y otro en la descarga. Para esta fase de presentación del equipo, se determinó que era posible eliminar el segmento de ajuste en la succión, reduciendo de esta manera el uso de un codo, lo cual disminuye las pérdidas por accesorios.

Luego se determina que también es factible eliminar el segmento de ajuste en la descarga, eliminando otro codo y reduciendo así las pérdidas. Para realizar este cambio, fué necesario eliminar la válvula de globo (que regula el flujo en la descarga) que estaba en ese segmento y colocar válvulas de globo en la salida de cada bomba con el mismo propósito.

Como última variante respecto al diagrama de diseño, se pasó la válvula de retención en la succión, para el segmento vertical de tubería, pues su instalación requería esa posición (vertical), al igual que la válvula de globo, en este caso por tema de espacio disponible.

Posteriormente se procede con la ubicación de la soportería, figura 4.5, la cual deberá de dar sostén a la tubería cargada con agua, con un caudal en movimiento y todos los accesorios como lo son pesadas válvulas. Se da apoyo en puntos estratégicos en donde la carga es alta, de manera que el sistema permanezca estable. Se muestra fotografía a continuación:



Figura 4.5: Soportería del sistema. (Fuente propia).

Una vez presentado el sistema con todos los accesorios y la ubicación indicada para el justo desarrollo de las prácticas de laboraría, se procede a pegar con cemento para PVC las tuberías y roscar con teflón las uniones macho roscadas a las válvulas, flujometros y demás accesorios que así lo requieran. Cabe mencionar que dicho proceso se debe de realizar con mucho cuidado pues las medidas de la tubería deben de ser justas para no perder el diseño y además recordar que una vez pegadas con cemento no habrá margen de error.

4.4. Funcionamiento del sistema

En esta sección se identificarán todas las válvulas del sistema y se mencionará su función dentro del este, además, se explicará cuales válvulas se deben abrir y cuales cerrar para determinada práctica de laboratorio.

4.4.1. Explicación del funcionamiento del sistema

Para explicar el funcionamiento de bombeo, se enumeran las válvulas, con la intención de poder referirse a cada una de manera clara. A continuación se muestra dicha enumeración y posteriormente una imagen a manera de ilustración:

1. Válvula de compuerta. Se ubica a la salida del tanque de succión, su función es regular el paso ente abierto o cerrado en dicho tanque.
2. Válvula de globo. Se ubica en la succión y su función es regular el paso del fluido en dicha línea, agregando pérdidas al sistema o permitiendo el paso pleno de caudal.
3. Válvula de compuerta. Se ubica en la entrada de la bomba 1, su función es permitir o no el paso del fluido a la bomba.
4. Válvula de compuerta. Se ubica en la entrada de la bomba 2, su función es permitir o no el paso del fluido a la bomba.
5. Válvula de globo. Se ubica en la descarga de la bomba 1 y su función es regular el paso del fluido, agregando pérdidas al sistema o permitiendo el paso pleno de caudal.
6. Válvula de globo. Se ubica en la descarga de la bomba 2 y su función es regular el paso del fluido, agregando predidas al sistema o permitiendo el paso pleno de caudal.
7. Válvula de bola. Está en la parte alta de la descarga (B2). Permite o no el paso del fluido en la descarga de la bomba.
8. Válvula de bola. Está en la parte alta de la descarga (B2). Permite o no el paso del fluido en la descarga de la bomba.
9. Válvula de bola. Esta cerca del tanque de descarga. Permite o no la descarga por la parte superior de dicho tanque.
10. Válvula de bola. Esta cerca del tanque de descarga. Permite o no la descarga por la parte inferior de dicho tanque.
11. Válvula de bola. Comunica el tanque de descarga con el de succión.
12. Válvula de bola. Permite al sistema trabajar en serie o en paralelo.

A continuación se muestra una imagen en la cual se etiquetan las válvulas anteriormente citadas.



Figura 4.6: Sistema de válvulas. (Fuente propia).

En la imagen anterior no se puede apreciar bien la válvula 12, la cual permite al sistema trabajar ya sea en serie o en paralelo. A continuación se muestra otra imagen con otro ángulo, que permite apreciar mejor dicha válvula.



Figura 4.7: Sistema de válvulas. (Fuente propia).

4.4.2. Manipulación de válvulas

A continuación se explicará el método para poder manipular las válvulas y llevar a cabo las prácticas de laboratorio según corresponda.

Práctica de NPSH o TDH en la bomba 1: 1 abierta, 2 abierta (para la práctica de NPSH regulará el paso del fluido), 3 abierta, 4 cerrada, 5 abierta (para la práctica de TDH regulará el paso del fluido), 6 cerrada, 7 cerrada, 8 abierta, 9 abierta (si se desea llenar el tanque por arriba, cerrada si se desea llenar el tanque por abajo con 11 cerrada), 10 cerrada (si se desea llenar el tanque por arriba, abierta si se desea llenar el tanque por abajo con 11 cerrada), 11 cerrada o abierta según se desee que haya fluido de retorno al tanque de succión, 12 cerrada.

Práctica de NPSH o TDH en la bomba 2: 1 abierta, 2 abierta (para la práctica de NPSH regulará el paso del fluido), 3 cerrada, 4 abierta, 5 cerrada, 6 abierta (para la práctica de TDH regulará el paso del fluido), 7 abierta, 8 cerrada, 9 abierta (si se desea llenar el tanque por arriba, cerrada si se desea llenar el tanque por abajo con 11 cerrada), 10 cerrada (si se desea llenar el tanque por arriba, abierta si se desea llenar el tanque por abajo con 11 cerrada), 11 cerrada o abierta según se desee que haya fluido de retorno al tanque de succión, 12 cerrada.

Sistema en serie: 1 abierta, 2 abierta (regulará el paso del fluido en la succión), 3 cerrada, 4 abierta, 5 abierta (regulará el paso del fluido en la descarga), 6 cerrada, 7 cerrada, 8 abierta, 9 abierta, 10 cerrada, 11 cerrada o abierta según se desee que haya fluido de retorno al tanque de succión, 12 abierta.

Sistema en paralelo: 1 abierta, 2 abierta (regulará el paso del fluido en la succión), 3 abierta, 4 abierta, 5 abierta (regulará el paso del fluido en la descarga de la bomba 1), 6 abierta (regulará el paso del fluido en la descarga de la bomba 2), 7 abierta, 8 abierta, 9 abierta, 10 cerrada, 11 cerrada o abierta según se desee que haya fluido de retorno al tanque de succión, 12 cerrada.

En relación a la manipulación de válvulas, las anteriores son todas las configuraciones necesarias para poner en funcionamiento el equipo y realizar las guías de laboratorio. Las indicaciones para poder realizar dichas guías se especificaran posteriormente en la subsección de prácticas de laboratorio.

4.5. Resultados de funcionamiento

Para verificar el correcto funcionamiento del sistema diseñado y construido, se aplicaron las pruebas de laboratorios que deben de poder ser realizar, estas son TDH, NPSH, sistema en serie y sistema en paralelo, esto con el fin de comprobar un funcionamiento adecuado.

4.5.1. Cabeza dinámica total (TDH)

Para realizar las mediciones de TDH se utilizó la bomba número 1, por medio de la válvula de globo a la salida de la descarga se reguló las pérdidas, para así poder hacer variar las condiciones de funcionamiento. Por medio del vacuómetro en la succión, manómetro en la descarga, rotámetro en la salida de las descarga y un caudalímetro de turbina en la descarga (posterior) se realizaron las mediciones. Para la medición número 1 se operó con la válvula de globo totalmente abierta, para las siguientes mediciones se fue cerrando media vuelta el manubrio de la válvula, hasta casi cerrarla (media vuelta antes de cerrarla).

Cabe recordar que las fichas técnicas de las bombas y algunos instrumentos de medición, vienen originalmente con un sistema de unidades alterno, con el fin de conservar y utilizar la información original del fabricante se manejarán datos en dicho sistema alterno.

Los datos fueron registrados en la siguiente tabla, con la siguientes mediciones, vacío en la succión (en pulgadas de mercurio, inhg, unidades del vacuómetro) y presión en la descarga (en PSI, unidades del manómetro) además se paso a pascales (para el respectivo cálculo de TDH, según lo pide la formula), caudal tanto en el rotámetro como en la caudalímetro de turbina en galones por minuto (Gal/min, según el instrumento) que se pasó a metros cúbicos por segundo (para el respectivo cálculo de TDH, según la formula).

Cuadro 4.8: Mediciones de caudal y presión. (Fuente propia).

Medición	Entrada B1 inhg	1inhg= 3386,4 Pa	Salida B1 PSI	1psi= 6894,76 Pa	Caudal GPM Rotámetro	1GPM= 0,00006309019 6 m ³ /s	Caudal GPM Turbina	Turbina m ³ /s
1	-7	-23704.80	17.5	120658.30	30	0.0019	31.72	0.0020
2	-7	-23704.80	18	124105.68	30	0.0019	30.51	0.0019
3	-7	-23704.80	18.5	127553.06	29.5	0.0019	30.24	0.0019
4	-6	-20318.40	19.5	134447.82	28	0.0018	29.63	0.0019
5	-6	-20318.40	20	137895.20	26	0.0016	27.98	0.0018
6	-6	-20318.40	21	144789.96	26	0.0016	27.38	0.0017
7	-6	-20318.40	21.5	148237.34	25	0.0016	25.85	0.0016
8	-4	-13545.60	24	165474.24	14	0.0009	13.92	0.0009

También se midió diferencia de voltaje y corriente, los datos se muestran a continuación:

Cuadro 4.9: Mediciones de voltaje y corriente. (Fuente propia).

ΔV (V)	I (A)
210	2,2
210	2,1
210	2,1
210	2,1
210	2,1
210	2
210	2
210	1,7

Con los datos del cuadro 4.8 y la formula 4.4 se procedió a calcular el TDH utilizando el software Excel, tanto en metros columna de agua como pies columna de agua (mca y ft). La potencia trifásica se calculó por medio de la formula 2.8 y los datos del cuadro 4.9 en Watts y caballos de fuerza (W y hp), se utiliza el sistema ingles pues las curvas del fabricante vienen con dichas unidades. Se muestran resultados:

Cuadro 4.10: Cálculo de TDH y potencia. (Fuente propia).

TDH (mca)	TDH (ft)	Potencia (W)	Potencia (hp)	Potencia trifásica (w)	Potencia trifásica (hp)
15,45	50,67	462	0,62	651,5	0,87
15,76	51,72	441	0,59	621,9	0,83
16,11	52,85	441	0,59	621,9	0,83
16,45	53,97	441	0,59	621,9	0,83
16,76	54,98	441	0,59	621,9	0,83
17,45	57,25	420	0,56	592,3	0,79
17,76	58,28	420	0,56	592,3	0,79
18,61	61,07	357	0,48	503,4	0,68

El usuario puede comparar los datos obtenidos con los datos de la ficha técnica de la bomba correspondiente, cabe mencionar que estos datos se encuentran bastante cercanos a los que indican tales fichas técnicas mediante su curva de operación.

Se traza la curva de THD del sistema práctico (TDH, en color azul) junto con el segmento respectivo de la curva dada por el fabricante (TDH F, en rojo).

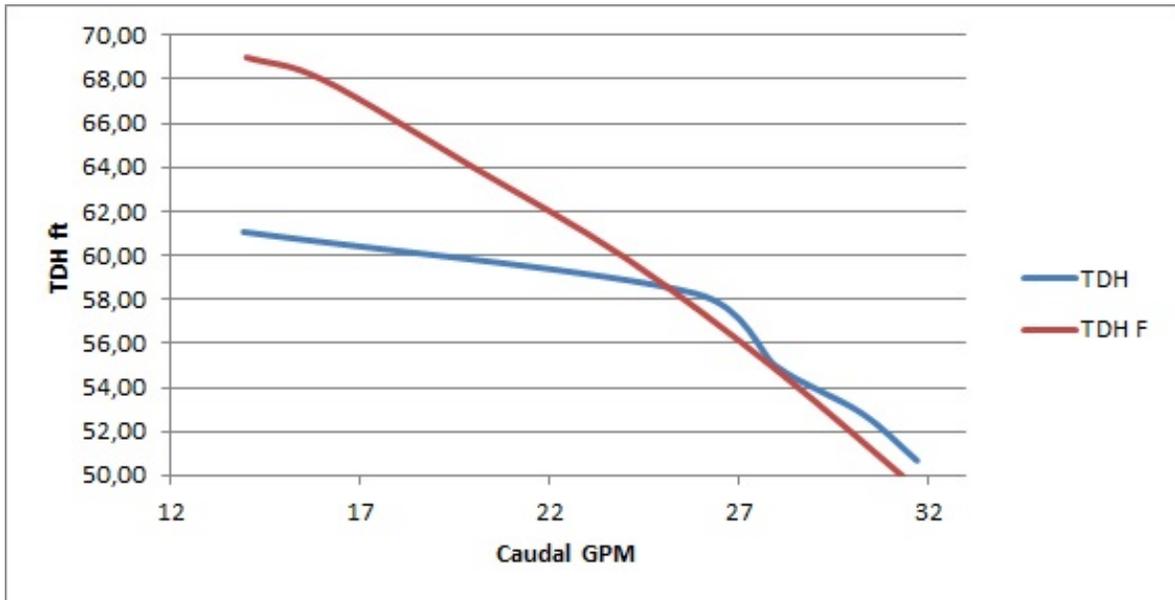


Figura 4.8: Curva de THD. (Fuente propia).

Se observa similitud visual en las curvas (figura 4.8), cabe destacar que para los valores más elevados de THD (presión) se da una mayor diferencia entre curvas, esto debido a que la válvula allí utilizada presenta leves fugas por su vástago, ocasionadas por desgaste de fricción (pues fue reutilizada) permitiendo pérdidas de presión y por ende ocasionando tal diferencia en la curva de operación, se puede observar que cuando el manubrio de la válvula está abierto no ocurren tales pérdidas, es cuando se cierra y por ende aumenta la presión en el vástago.

Se traza la curva de potencia trifásica del sistema práctico (Pot T, en verde) junto con el segmento respectivo de la curva dada por el fabricante (Pot F, en rojo).

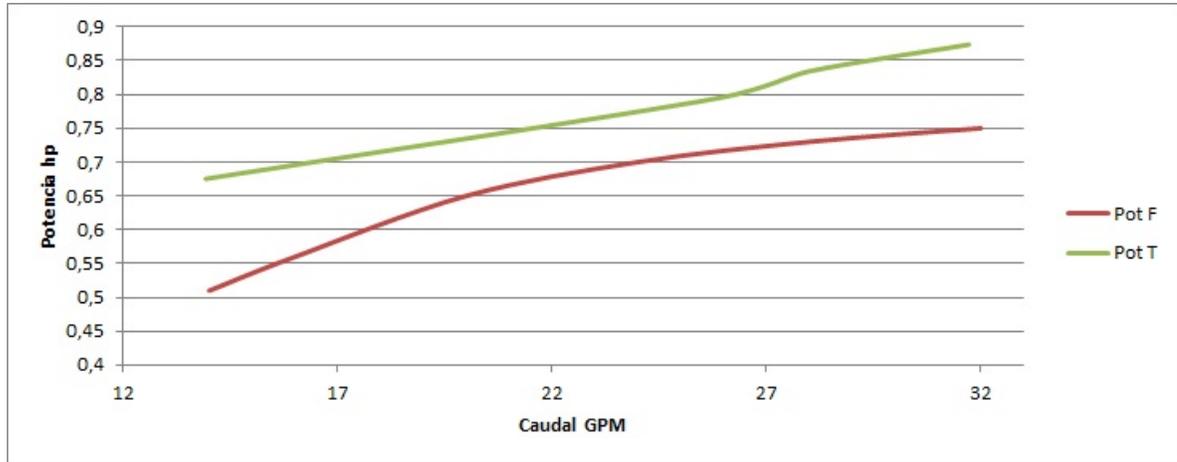


Figura 4.9: Curva de potencia. (Fuente propia).

Se observan similitud en las curvas (Fig 4.17), si bien las curvas no son idénticas mantienen estrecha relación. La leve diferencia entre las curvas, podría derivarse de la precisión de los instrumentos de medición, específicamente el utilizado para medir corriente, pues es analógico con una división de escala muy amplia, lo cual resta presión a la lectura.

Se indica que para graficar las curvas, se utilizaron solamente los puntos de medición en los cuales los manómetros registraron cambios de presión al cerrar el manubrio de la válvula, con el fin de graficar la curva con solo los puntos necesarios para observar su forma general (respetando el orden secuencial con que se tomó cada medición). Esto a raíz de que las válvulas de globo no restringen el paso del fluido de manera uniforme (a lo largo de los distintos puntos de medición) de manera que varios puntos (aun cerrando el paso) presentaban datos muy similares (la válvula no cerró habiéndose girado el manubrio) y luego para otro punto el flujo se cerraba de manera abrupta. Es por esto que se eligieron solo los puntos en los que ocurrió la restricción de paso al flujo, siendo estos los datos que se requerían.

4.5.2. Cabeza de succión neta positiva (NPSH)

Para realizar las mediciones de NPSH se utilizó la bomba número 1, por medio de la válvula de globo en la tubería de succión se reguló las pérdidas, para así poder hacer variar las condiciones de funcionamiento. Por medio del vacuómetro en la succión se monitoreó el vacío de succión, por medio de un rotámetro en la salida de la descarga y un flujómetro de turbina en la descarga (posterior) se realizaron las mediciones de caudal. Para la medición número 1 se operó con la válvula de globo totalmente abierta, para las siguientes mediciones se fue cerrando media vuelta (del manubrio de la válvula) hasta casi cerrarla (media vuelta antes de cerrarla).

Para calcular el NPSH práctico (mediante mediciones en el equipo) se utiliza la siguiente ecuación (Diaz, Mustafá y Ríos, 2006):

$$NPSH = \frac{P_s}{\rho * g} + \frac{V_s^2}{2g} - \frac{P_v}{\rho * g} \quad (4.5)$$

Donde:

P_s : es la presión absoluta, presión atmosférica (87000 Pa) menos la manométrica en la succión.

V_s : es la velocidad de succión, obtenida por medio del caudal y área de la tubería de succión.

P_v : es la presión del vapor, 3236 Pa.

ρ : es la densidad del agua, 997 Kg/m³.

g : es la gravedad, 9.8 m/s².

Los datos obtenidos en el ensayo fueron registrados en el cuadro 4.11, se registró el vacío en la succión en pulgadas de mercurio (inhg) pues así se lee del instrumento, luego se paso a pascales (para el respectivo cálculo), se midió caudal tanto en el rotámetro como en el caudalímetro de turbina (valor empleado para los calculos) en galones por minuto (Gal/min) pues así se lee del instrumento, luego se pasó a metros cúbicos por segundo y empleando el area transversal de la tubería de succión se calculó la velocidad de succión.

Cuadro 4.11: Mediciones y cálculos para NPSH. (Fuente propia).

Medición	Entrada B1 (inhg) Medido	Entrada B1 (Pa) Calculado	NPSH (mca) Calculado	NPSH (ft) Calculado	Caudal Rotámetro (GPM) Medido	Caudal Turbina (GPM) Medido	Caudal (m3/s) Calculado	Velocidad de succión (m/s) Calculado
1	-7	-23704.66	6.17	20.24	30	31	0.001956	0.44
2	-7	-23704.66	6.17	20.24	30	30.95	0.001953	0.44
3	-7	-23704.66	6.17	20.24	30	30.84	0.001946	0.44
4	-7	-23704.66	6.17	20.24	30	30.8	0.001943	0.44
5	-8	-27091.04	5.82	19.10	30	30.76	0.001941	0.44
6	-8	-27091.04	5.82	19.10	30	30.61	0.001931	0.44
7	-8	-27091.04	5.82	19.10	30	30.52	0.001926	0.44
8	-9	-30477.42	5.48	17.97	29.5	30.34	0.001914	0.44
9	-10.5	-35556.99	4.96	16.26	29	29.63	0.001869	0.42
10	-11.5	-38943.37	4.61	15.12	29	28.97	0.001828	0.42
11	-20.5	-69420.79	1.48	4.87	20	21.21	0.001338	0.30

Cabe recordar que en la sección de diseño, se calculó un NPSH disponible de 19,9 ft cuando se opera con la válvula de globo en succión totalmente abierta. Cabe mencionar que ahora por medio de la ecuación 4.5 y los datos medidos de manera práctica, con la válvula de globo en succión totalmente abierta, se obtiene un NPSH disponible de 20.24 ft, ambos datos se aproximan bastante, comprobando que el diseño fue correcto, de manera que se corrobora en la práctica.

Se puede observar en el cuadro 4.11, que para la medición 11 se deberían de presentar signos de cavitación pues el NPSH disponible es menor al requerido. En efecto los signos de cavitación fueron: Caída notable en el caudal, mucha vibración, ruido, además la bomba comenzó a generar un sonido distinto (que en operación regular no se daba) lo que se podría interpretar como un indicio de cavitación.

Utilizando los datos del cuadro 4.11, se traza la curva de NPSH práctico (NPSH p, en rojo) y su NPSH requerido, suministrado por el fabricante (NPSH R, en verde).

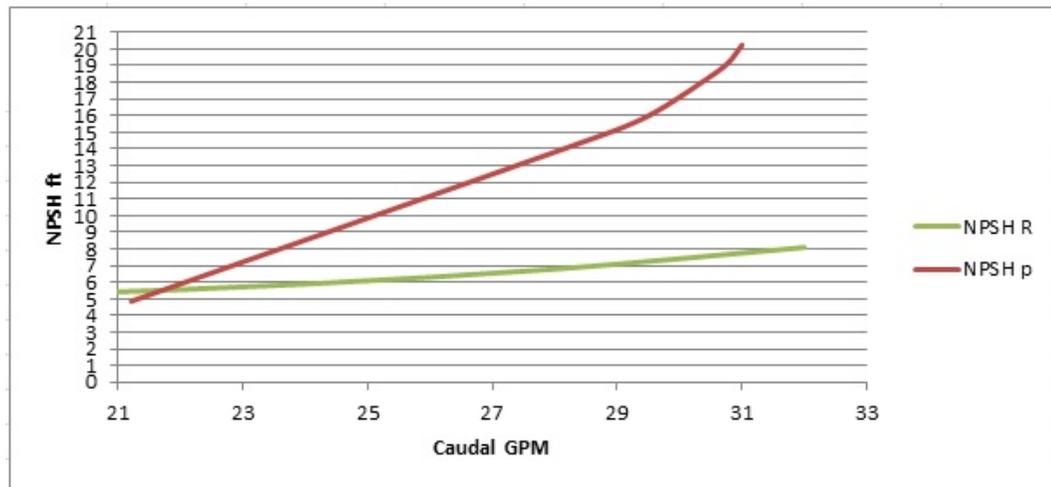


Figura 4.10: Curvas NPSH práctico y requerido. (Fuente propia).

En la figura 4.10 se muestra la curva NPSH del fabricante en verde y una curva práctica de NPSH en rojo, elaborada por medio de los datos registrados durante el funcionamiento del sistema y la ecuación 4.5. Mediante esta figura se pueden apreciar las condiciones de NPSH al operar el equipo y el momento en que inicia la cavitación. Como era de esperar, se aprecia que para la medición 11 (cuadro 4.11) el valor del NPSH disponible está por debajo del requerido y se presenta cavitación. Además, también se puede observar como para los anteriores puntos de medición, la curva de funcionamiento del sistema de NPSH admisible, se encuentra por encima del NPSH requerido, permitiendo esto que la bomba no cavite.

Se indica que para graficar las curvas, se utilizaron solamente los datos de medición suficientemente distintos, con el fin de graficar la curva con solo los puntos necesarios para observar su forma general, respetando el orden de medición. Esto a raíz de que las válvulas de globo no restringen el paso del fluido de manera uniforme, a lo largo de los distintos puntos de medición, de manera que varios puntos aún cerrando el paso, presentaban datos muy similares (la válvula no cerró habiéndose girado el manubrio) y luego para otro punto el flujo se cerraba de manera abrupta. Es por esto que se eligieron solo los puntos en los que ocurrió la restricción de paso al flujo, siendo estos los datos que mostraron cambios ante la regulación de flujo.

4.5.3. Sistema en serie

Para realizar las mediciones de TDH en el sistema en serie se utilizaron la bomba número 1 y numero 2 (conectadas en serie), por medio de la válvula de globo colocada después de la bomba 1 (el flujo pasa primero por la bomba 2 luego por la 1), para así poder hacer variar las condiciones de funcionamiento. Por medio del vacuómetro en la succión antes de la bomba 2 se monitoreó el vacío de succión y un manómetro luego de la bomba 1 para la presión. Por medio de un rotámetro en la salida de la descarga de la bomba 1 y un caudalímetro de turbina en la descarga (posterior) se realizaron las mediciones de caudal. Para la medición número 1 se operó con la válvula de globo totalmente abierta, para las siguientes mediciones se fue cerrando media vuelta (de la válvula) hasta casi cerrarla (media vuelta antes de cerrarla).

Los datos fueron registrados en la siguiente tabla, con la siguientes mediciones, vacío en la succión y presión en la descarga en pulgadas de mercurio (inhg) además se pasó a pascales (para el respectivo cálculo de TDH), caudal tanto en el rotámetro como en la flujómetro de turbina en galones por minuto (Gal/min) que se pasó a metros cúbicos por segundo, para el respectivo cálculo de TDH. Con los datos medidos se procedió a calcular el TDH tanto en metros columna de agua como pies columna de agua (mca y ft). Se muestran resultados:

Cuadro 4.12: Datos del sistema en serie. (Fuente propia).

Medición	Entrada B2 inhg	1inhg= 3386,4 Pa	Salida B1 PSI	1psi= 6894,76 Pa	Caudal GPM Rotámetro	1GPM= 0,000063090 196 m3/s	Caudal GPM Turbina	m3/s	TDH (mca)	TDH (ft)
1	-9	-30477.60	23.5	162026.86	35	0.0022	36.66	0.0023	20.53	67.36
2	-8	-27091.20	24.5	168921.62	35	0.0022	36.11	0.0023	20.87	68.47
3	-8	-27091.20	25	172369.00	34	0.0021	35.67	0.0023	21.21	69.58
4	-8	-27091.20	26	179263.76	34	0.0021	35.28	0.0022	21.90	71.86
5	-8	-27091.20	29	199948.04	32.5	0.0021	33.75	0.0021	23.97	78.64
6	-8	-27091.20	29	199948.04	32.5	0.0021	33.75	0.0021	23.97	78.64
7	-7	-23704.80	32	220632.32	31	0.0020	31.88	0.0020	25.68	84.26
8	-5	-16932.00	46.5	320606.34	21	0.0013	22.67	0.0014	34.99	114.78

Se traza la curva de THD práctico del sistema en serie (TDH P, en azul) junto con el segmento en serie respectivo para los datos del fabricante (TDH F, en rojo). Se leyeron los datos en la curva del fabricante y como las bombas son iguales (mismo modelo) se sumaron dichos datos.

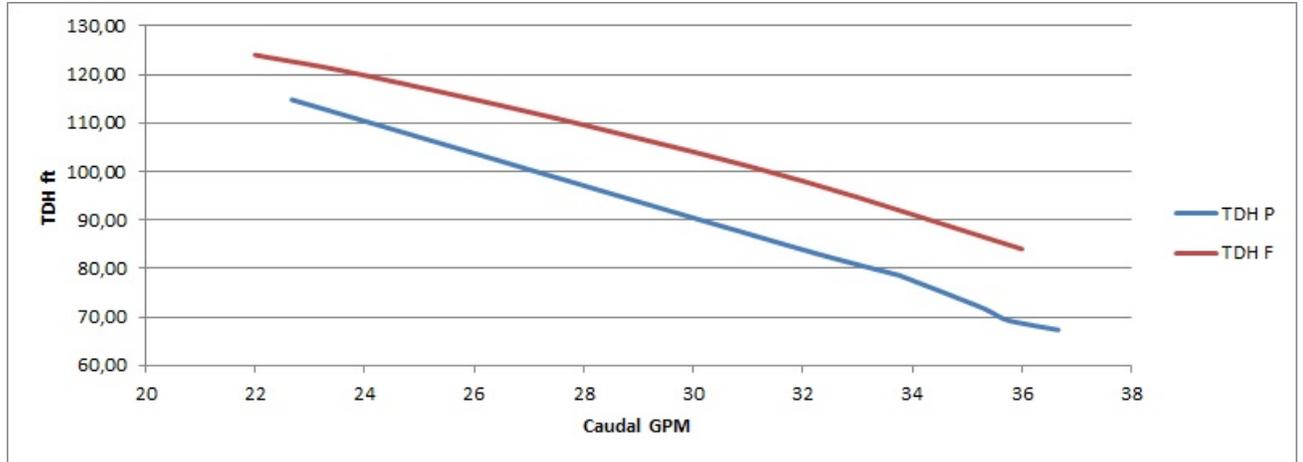


Figura 4.11: Gráfica TDH sistema en serie. (Fuente propia).

Se puede observar estrecha similitud entre las curvas (Fig 4.21). Si bien la curva del fabricante presenta valores de TDH (presión) un tanto mayores, la razón probable es la misma que para la curva de TDH para una sola bomba, debiéndose a leves fugas en el vástago de la válvula, lo cual provoca pérdidas leves de presión.

Se indica que para graficar las curvas se utilizaron solamente los datos de medición suficientemente distintos, con el fin de graficar la curva con solo los puntos necesarios para observar su forma general, respetando el orden de medición. Esto a raíz de que las válvulas de globo no restringen el paso del fluido de manera uniforme a lo largo de los distintos puntos de medición de manera que varios puntos aun cerrando el paso presentaban datos muy similares (la válvula no cerró habiéndose girado el manubrio) y luego para otro punto el flujo se cerraba de manera abrupta. Es por esto que se eligieron solo los puntos en los que ocurrió la restricción de paso al flujo, siendo estos los datos que se requerían.

4.5.4. Sistema en paralelo

Para realizar las mediciones de TDH en el sistema en paralelo se utilizaron la bomba número 1 y numero 2 (conectadas en paralelo), por medio de la válvula de globo colocada después de cada bomba (el flujo pasa simultanea mente por ambas bombas), para así poder hacer variar las condiciones de funcionamiento. Por medio del vacuómetro en la succión antes de cada bomba se monitoreó el vacío de succión y un manómetro luego de cada bomba para la presión. Por medio de un rotámetro en la salida de la descarga de la bomba 1, un caudalímetro de vortex en la descarga de la bomba 2 y un caudalímetro de turbina en la descarga total (posterior) se realizaron las mediciones de caudal. Para la medición número 1 se operó con las válvulas de globo totalmente abiertas, para las siguientes mediciones se fueron cerrando media vuelta (de ambas válvula) hasta casi cerrarlas (media vuelta antes de cerrarlas).

Los datos de fueron registrados en la siguiente tabla, con la siguientes mediciones, vacío en la succión y presión en la descarga en pulgadas de mercurio (inhg) además se pasó a pascales (para el respectivo cálculo de TDH), caudal tanto en el rotámetro como en la caudalimetro de turbina en galones por minuto (Gal/min) que se pasó a metros cúbicos por segundo (para el respectivo cálculo de TDH). Con los datos medidos se procedió a calcular el TDH tanto en metros columna de agua como pies columna de agua (mca y ft). Se muestran resultados:

Cuadro 4.13: Datos del sistema en paralelo. (Fuente propia).

Medición	Entrada B2 inhg	1inhg= 3386,4 Pa	Salida B1 PSI	1psi= 6894,76 Pa	Caudal GPM Rotámetro	Caudal GPM Vortex	1GPM= 0,000063090 196 m3/s	Caudal GPM Turbina	m3/s	TDH (mca)	TDH (ft)
1	-10	-33864.00	19	131000.44	25	20.00	0.0016	47.08	0.0030	18.11	59.41
2	-10	-33864.00	19	131000.44	25	20.00	0.0016	47.68	0.0030	18.14	59.50
3	-10	-33864.00	19.5	134447.82	25	20.00	0.0016	47.13	0.0030	18.46	60.58
4	-10	-33864.00	20	137895.20	24	19.00	0.0015	46.58	0.0029	18.79	61.66
5	-9	-30477.60	21	144789.96	22	19.00	0.0014	45.22	0.0029	19.09	62.64
6	-9	-30477.60	21	144789.96	23	19.00	0.0015	44.72	0.0028	19.07	62.58
7	-8	-27091.20	22	151684.72	21	18.00	0.0013	42.64	0.0027	19.35	63.47
8	-6	-20318.40	26	179263.76	15	15.00	0.0009	30.84	0.0019	21.07	69.13

Se traza la curva de THD del sistema práctico en paralelo (TDH P, en azul) junto con el segmento en paralelo respectivo para los datos del fabricante (TDH F, en rojo). Se leyeron los datos en la curva del fabricante y como las bombas son iguales (mismo modelo) se sumaron dichos datos.

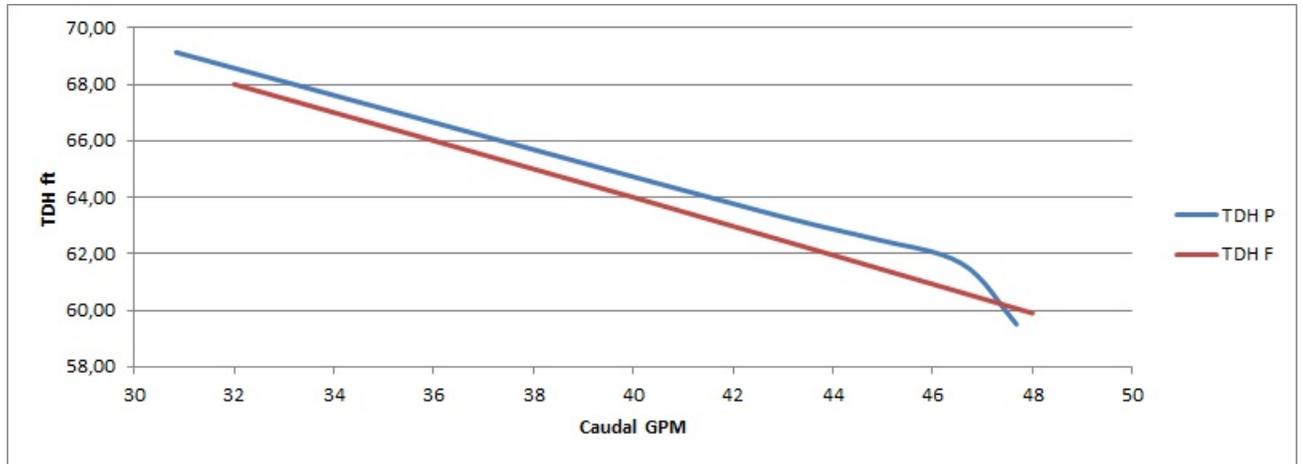


Figura 4.12: Gráfica del sistema en paralelo. (Fuente propia).

Se puede apreciar que las dos curvas (la del sistema práctico y la equivalente del fabricante) son muy similares. Las pequeñas diferencias que se ven en la gráfica pueden ser producto de los procesos de medición, sin embargo cabe recalcar que la similitud es bastante alta. Se indica que para graficar la curva se utilizó solamente los datos de medición suficientemente distintos entre sí, respetando el orden de medición. Esto a raíz de que las válvulas de globo utilizadas no restringen el paso del fluido de manera uniforme a lo largo de los distintos puntos de medición, de manera que varios puntos aún cerrando el paso presentaban datos muy similares (la válvula no cerro aunque sí se giró el manubrio) y luego para otro punto el flujo se cerraba de manera abrupta. Es por esto que se eligieron solo los puntos en los que ocurrió la restricción de paso al flujo, que a su vez son los datos que se requerían.

Es importante resaltar que todas las secciones de este informe fueron de la mano y de forma sucesiva a como se presentan, las secciones iniciales forman la base para las siguientes, de manera para los resultados su utilizan los datos recolectados en las secciones anteriores. Para poder proponer el diseño (sección de resultados) se utilizan los datos elaborados en la secciones de marco teórico y diagnóstico, luego se utiliza el diseño para la construcción y de manera consecutiva se le aplican las pruebas de funcionamiento al modelo real: Lo anterior evidencia una secuencia de pasos que llevan a las creación de un sistema funcional de acuerdo a las necesidades específicas también definidas y contempladas en dicha secuencia. Cabe mencionar, que todos los pasos realizados para llegar al funcionamiento del equipo fueron de acuerdo con el procedimiento planeado y que el equipo en funcionamiento trabajó de la manera esperada. Observando las gráficas se aprecia que los datos obtenidos son acorde con las curvas teóricas de operación de las bombas centrífugas. Por ultimo se indica que al comparar los datos prácticos con los de fábrica existe un rango de error que oscila entre cero por ciento y treinta por ciento (como máximo en un segmento de potencia), siendo un error aproximado al diez por ciento en promedio para todas la curvas acá presentadas.

Con respecto al equipo diseñado y construido se debe decir que cumple con todas las características y funciones de los equipos más completos disponibles en el mercado, de modo que permite medir flujo, presión y vacío en diversos puntos del sistema, posee un variador de frecuencia para regular las vueltas que da el rodete, además permite realizar cálculos y curvas de TDH, NPSH, potencia, eficiencia, tanto de manera individual como en serie o paralelo, en síntesis este equipo cumple con todas las funciones de un equipo comercial completo. Como aspectos positivos extras se debe indicar que para la elaboración de este proyecto se utilizó material es desuso, de manera que al reutilizar material en bodega se redujo el costo del proyecto, debiendo comprar solo algunos accesorios para conectar el equipo, pero esto se contempló en el diseño, resultando en un presupuesto muy económico (se muestra más adelante). Otra características favorables de este equipo es que cuenta con un depósito de succión y otro de descarga, haciéndolo más similar con respecto a una aplicación real, además esto permitiría realizar otro tipo de prácticas como el llenado del tanque de descarga ya sea por arriba de este o por abajo, en este último caso la columna de fluido hará variar las condiciones del sistema conforme ocurra el llenado. Además este sistema se asemeja con un posible caso real, pues sus dimensiones amplias y componentes de uso frecuente y fácil acceso en el mercado nacional permiten dar fe de que una vez terminado el respectivo curso de carrera, él o la estudiante puede tener acceso a todo los materiales utilizados así como disponer del conocimiento para realizar el diseño. Otras características de este sistema es que permite realizar las prácticas de cebado de las bombas, detalle muy importante para iniciar el funcionamiento de estas, además su tamaño espacioso permitirá a varias personas ver el funcionamiento e incluso rotar entorno al sistema cumpliendo diversas funciones como encender, apagar anotar caudal, presión o vacío o regular alguna válvula sin estorbar entre sí o tapar la visibilidad de alguna persona presente.

Capítulo 5

Guías de laboratorio

Las guías que a continuación se presentarán, responden al diseño elaborado y mostrado en este documento en capítulos anteriores, por lo cual responden a las necesidades pedagógicas del curso de máquinas hidráulicas en su parte práctica. Todas las guías fueron escritas tomando en cuenta cada detalle para que el estudiante pueda seguir paso a paso el procedimiento de la práctica y comprenderlo. Cada guía fue puesta en práctica con el fin de corroborar su adecuada redacción y procedimientos descritos. A continuación se presentan las guías.

5.1. Turbina Pelton

El objetivo de esta práctica es que el estudiante se familiarice con el equipo de turbina Pelton, pueda identificar todos sus componentes y además manipularlos con el fin de poner en funcionamiento el equipo. Se deberá medir distintos parámetros de manera directa (con la debida instrumentación) tales como número de revoluciones, fuerza de frenado, altura de caída. A partir de los datos medidos se deberá calcular (con formulas) otros parámetros tales como par en el árbol, potencia en el árbol, potencia hidráulica, eficiencia. Además se deberá de realizar graficas con los datos obtenidos para describir el funcionamiento de la turbina. Se advierte que para la redacción de esta guía se utiliza como base, el manual correspondiente elaborado por el fabricante (GUNT, 2018) quienes ponen dicho material a disposición del usuario para su debida interpretación y utilización.

Para esta práctica se requieren los equipos denominados HM 150 y HM 150.19.

El procedimiento consta de los siguientes pasos y se ilustra con las figuras 5.1 y 5.2:

1. Colocar la construcción de ensayo HM 150.19 sobre HM 150 de modo que la salida de la carcasa abierta (desagüe) se encuentre encima del canal de HM 150.
2. Establecer la unión de mangueras entre HM 150 y la conexión de la turbina Pelton.
3. Abrir el desagüe del depósito volumétrico de HM 150.
4. Soltar por completo el dispositivo de freno de la turbina con el volante (5).
5. Como las balanzas por resorte (4) se encargan de la descarga, ya no es necesario tirar de la correa (10) hacia la polea.

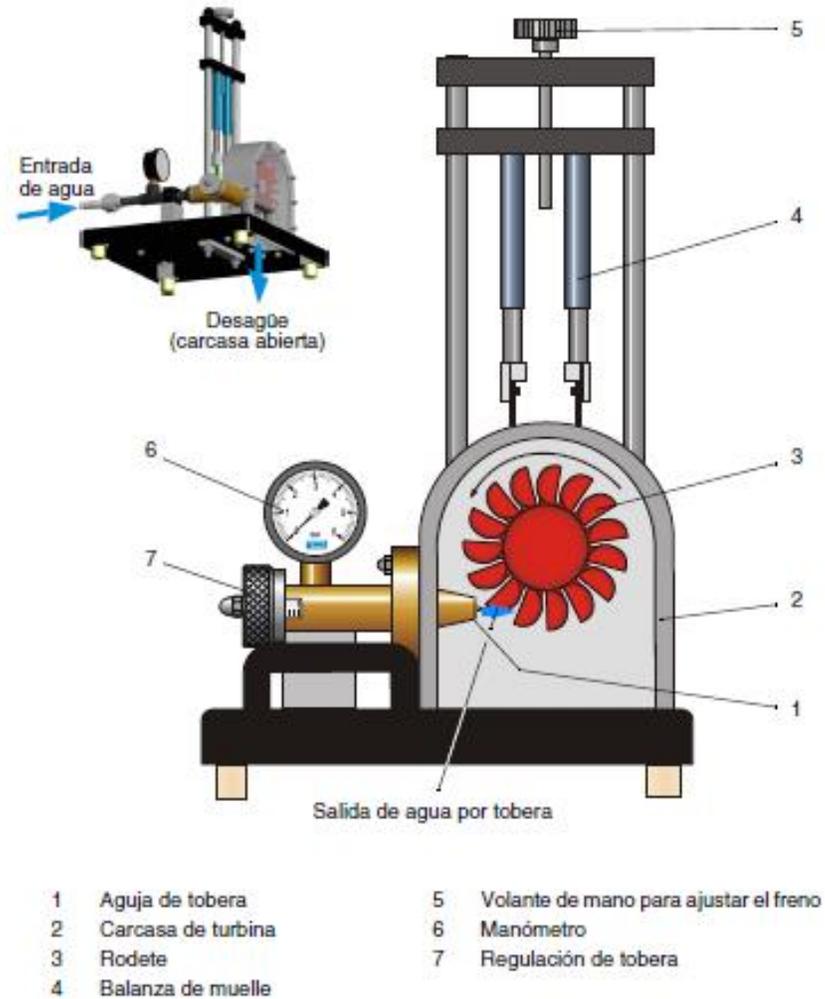


Figura 5.1: Turbina Pelton, HM 150.19. Fuente: Gunt Hamburg.

Ciclo de prueba

6. Cerrar la válvula de entrada principal HM 150 y conectar la bomba de HM 150. Abrir la válvula de entrada principal lentamente y por completo.

7. Cerrar la válvula de entrada principal y desconectar la bomba.

8. Girando el regulador de la tobera (7), se mueve la aguja axialmente y se puede abrir la tobera.

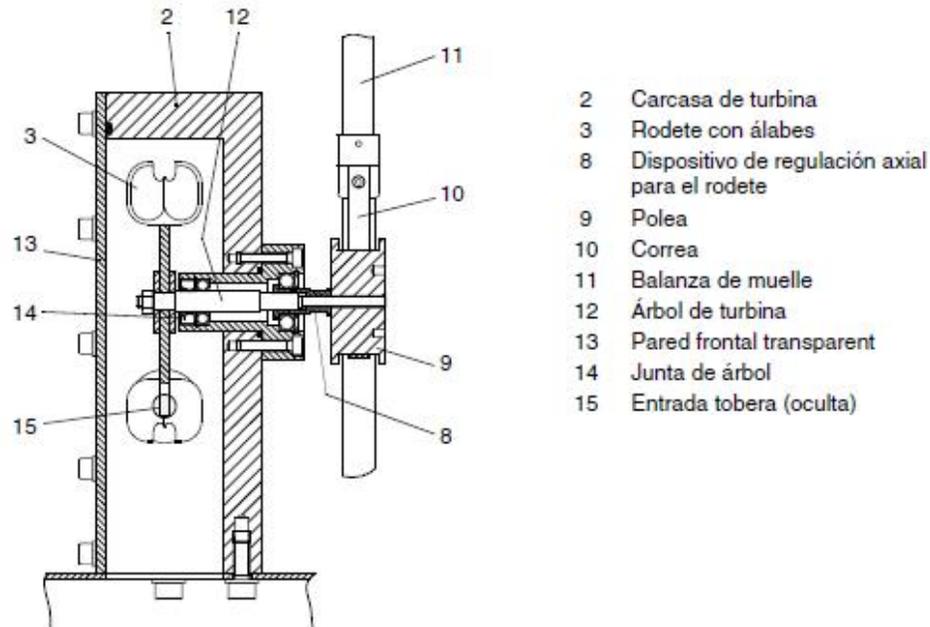


Figura 5.2: Turbina Pelton, HM 150.19. Fuente: Gunt Hamburg.

Registro de curvas características de turbina.

9. Puesta en servicio del HM 150.
10. Puesta en servicio del HM 150.19.
11. Cerrar la válvula de entrada principal HM 150.
12. Conectar la bomba.
13. Regule la tobera a la posición 7.
14. La altura de caída se mantiene constante por medio de la válvula de bola en la entrada del HM 150 en un valor de 2 m (0,2 bar).
15. Aumentar la carga en el dispositivo de freno (5) en pasos de 0,5 N. Registrar el número de revoluciones.
16. Anote el número de revoluciones y fuerza de frenado para cada punto de funcionamiento, en la tabla 5.1.



Figura 5.3: Módulo básico, HM 150. Fuente: Gunt Hamburg.

- Lectura de la fuerza de frenado: la balanza de muelle mostrará dos cifras (derecha e izquierda) la diferencia entre esas dos cifras es el valor de la fuerza de frenado.

- Cálculo del par de giro: utilice la siguiente formula:

$$M = F * \frac{D}{2} \quad (5.1)$$

Dónde:

M: par de giro (Nm).

F: fuerza de frenado (N).

D: diámetro de la polea, que es 50mm (m).

- Cálculo de potencia en el árbol (12): utilice la siguiente formula:

$$P_{out} = M * 2 * \pi * \frac{n}{60} \quad (5.2)$$

Dónde:

P_{out} = Potencia en el árbol (W).

M: par de giro (Nm).

n= número de revoluciones (min^{-1}).

- Cálculo de potencia hidráulica: La potencia hidráulica es una función del caudal volumétrico y de la altura de caída. Utilice la siguiente formula:

$$P_{hyd} = \dot{V} * H * \rho * g \quad (5.3)$$

Dónde:

P_{hyd} : Potencia hidráulica (W).

\dot{V} = caudal volumétrico, a fin de determinar el caudal volumétrico es necesario registrar el tiempo t que se necesita para llenar el depósito volumétrico de HM 150, de un punto a otro, conociendo el volumen entre puntos. El flujo volumétrico es prácticamente constante entre mediciones, se utilizará 30,7 L/min.

ρ : densidad del agua, 1000 Kg/ m^3

g: gravedad, 9.8 m/ s^2

H: es la altura de caída de la columna de agua corresponde a la presión de bomba aplicada delante de la turbina. La altura de caída se puede leer en el manómetro en bar. $H = p / (\rho * g)$.

Dónde: “p” es la presión en el manómetro, “ ρ ” densidad del agua y “g” gravedad.

En la siguiente fórmula, se puede introducir la altura de caída leída directamente en bar:

$$P_{hyd} = \frac{\dot{V} * p * 10^5}{1000 * 60} \quad (5.4)$$

Dónde:

P_{hyd} : Potencia hidráulica (W).

\dot{V} = caudal volumétrico, a fin de determinar el caudal volumétrico es necesario registrar el tiempo t que se necesita para llenar el depósito volumétrico de HM 150, de un punto a otro, conociendo el volumen entre puntos, (L/min).

p : es la presión que marca el manómetro (bar).

- Cálculo de eficiencia: utilice la siguiente formula:

$$\eta = \frac{P_{hyd}}{P_{out}} \quad (5.5)$$

Dónde:

η : eficiencia (%).

P_{out} : Potencia en el árbol (W).

P_{hyd} : Potencia hidráulica (W).

Grafique:

17. Par en el árbol (Nm) contra número de revoluciones (m^{-1}).

18. Potencia en el árbol (W) contra número de revoluciones (m^{-1}).

19. Eficiencia (%) contra número de revoluciones (m^{-1}).

Compare las gráficas de curva con datos experimentales con las curvas que se presentan en el manual de la turbina.

¿Se parecen en forma? Explique lo que ve al comparar ambas curvas.

¿Los puntos de operación conciden? Explique si los datos practicos obtenidos para la curva son aproximados a los de la curva mostrada en el manual. Indique porcentaje de error.

Se espera que el estudiante tenga la oportunidad de conocer las partes de una turbina Pelton, que opere el equipo y realice mediciones directas con el fin de obtener datos que suministren información del funcionamiento de la turbina, también que calcule otros parámetros a partir de las mediciones y formulas suministrada (teoría del curso), además una vez registrados todos los datos necesarios, graficar las curvas características de la turbina y por ultimo realizar una comparación entre las curvas obtenidas y las que se muestran en el manual del equipo, dando su opinión respecto a los resultados.

5.2. Turbina Francis

El objetivo de esta práctica es que el estudiante se familiarice con el equipo de turbina Francis, pueda identificar todos sus componentes y además manipularlos con el fin de poner en funcionamiento el equipo. Se deberá medir distintos parámetros de manera directa (con la debida instrumentación) tales como número de revoluciones, fuerza de frenado, altura de caída. A partir de los datos medidos se deberá calcular (con formulas) otros parámetros tales como par en el árbol, potencia en el árbol, potencia hidráulica, eficiencia. Además se deberá de realizar graficos con los datos obtenidos para describir el funcionamiento de la turbina. Se advierte que para la redacción de esta guía se utiliza como base, el manual correspondiente elaborado por el fabricante (GUNT, 2019) quienes ponen dicho material a disposición del usuario para su debida interpretación y utilización.

Para esta práctica se requieren los equipos denominados HM 150, HM 150.20 y un tacómetro manual.



Figura 5.5: Módulo básico, HM 150. Fuente: Gunt Hamburg.

El procedimiento consta de los siguientes pasos:

1. Colocar la construcción de ensayo HM 150.20 (figura 5.6) sobre HM 150 de modo que la salida del tubo de aspiración pueda conducir el agua al canal de HM 150.
2. Compruebe la posición cero en el manómetro, si es necesario, abra brevemente el tornillo o el diafragma de goma en la parte superior del manómetro para igualar la presión con el medio ambiente.
3. Establecer la unión de mangueras entre el HM 150 y la conexión de la turbina Francis HM 150.20 y abrir la válvula de cierre del depósito volumétrico del HM 150.
4. Soltar por completo el dispositivo de freno de la turbina con el volante de mano, las balanzas de resorte (5) están descargadas y la correa (12) ya no es tirada hacia la polea.
5. Cerrar el grifo principal HM 150 y conectar la bomba HM 150; abrir el grifo principal lentamente.
6. Soltar la palanca para la regulación de álabe distribuidor (4) mediante giro y eliminar el aire del tubo de aspiración acercando y alejando los álabes distribuidores (2).

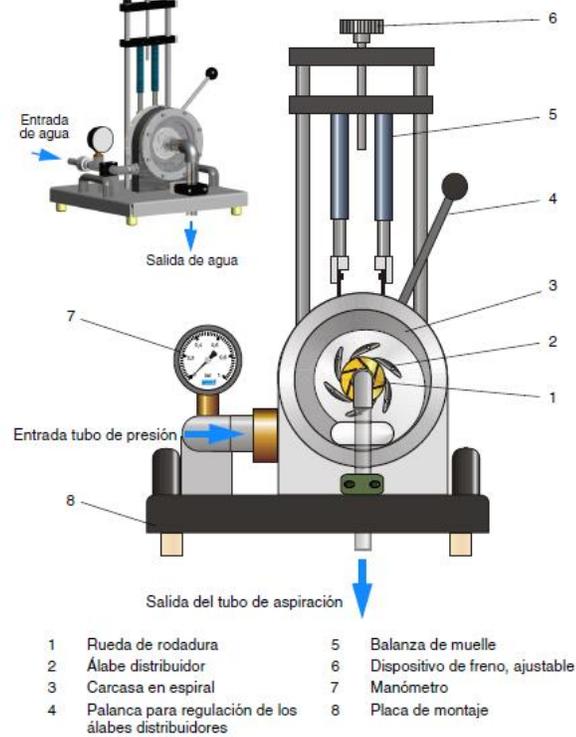


Figura 5.6: Turbina Francis, HM 150.20. Fuente: Gunt Hamburg.

Ciclo de prueba.

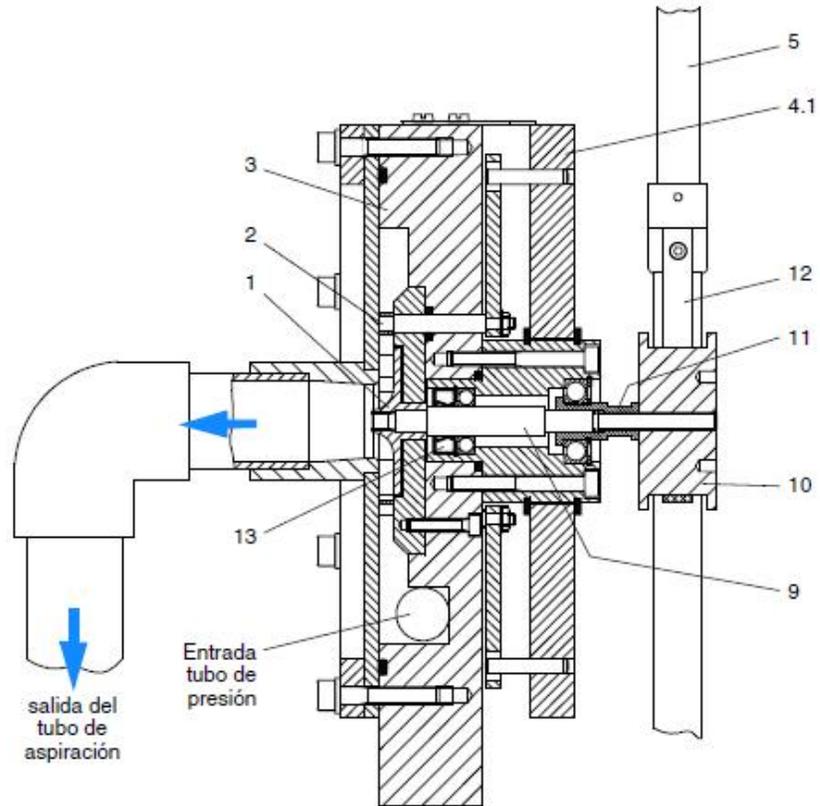
7. Cerrar la válvula principal HM 150 y conectar la bomba HM 150. Abrir la válvula principal lentamente y por completo.

8. Cerrar la válvula principal y desconectar la bomba.

9. El ángulo de contacto del agua sobre los álabes de la rueda de rodadura queda determinado por la posición de los álabes distribuidores. Este ángulo de contacto determina el número de revoluciones y de esta manera, también la potencia de la turbina.



Figura 5.7: Tacómetro. Fuente: Gunt Hamburg.



- | | | | |
|-----|--|----|---|
| 1 | Rueda de rodadura | 9 | Árbol de turbina |
| 2 | Álabe distribuidor | 10 | Polea |
| 3 | Carcasa en espiral | 11 | Hembrilla de ajuste para regulación de la rueda de rodadura |
| 4.1 | Disco para regulación de los álabes distribuidores (disco de regulación) | 12 | Correa |
| 5 | Balanza de muelle | 13 | Junta de árbol |

Figura 5.8: Turbina Francis. Fuente: Gunt Hamburg.

- Cálculo del par de giro: utilice la siguiente formula:

$$M = F * \frac{D}{2} \quad (5.6)$$

Dónde:

M: par de giro (Nm).

F: fuerza de frenado (N).

D: diámetro de la polea, que es 50mm (m).

- Cálculo de potencia en el árbol: utilice la siguiente formula:

$$P_{out} = M * 2 * \pi * \frac{n}{60} \quad (5.7)$$

Dónde:

P_{out} = Potencia en el árbol (W).

M: par de giro (Nm).

n= número de revoluciones (min^{-1}).

- Cálculo de potencia hidráulica: La potencia hidráulica es una función del caudal volumétrico y de la altura de caída. Utilice la siguiente formula:

$$P_{hyd} = \dot{V} * H * \rho * g \quad (5.8)$$

Dónde:

P_{hyd} : Potencia hidráulica (W).

\dot{V} = caudal volumétrico, a fin de determinar el caudal volumétrico es necesario registrar el tiempo t que se necesita para llenar el depósito volumétrico de HM 150, de un punto a otro, conociendo el volumen entre puntos. El flujo volumétrico es prácticamente constante entre mediciones, se utilizará 30,7 L/min.

ρ : densidad del agua, 1000 Kg/ m^3

g: gravedad, 9.8 m/ s^2

H: es la altura de caída de la columna de agua corresponde a la presión de bomba aplicada delante de la turbina. La altura de caída se puede leer en el manómetro en bar. $H = p / (\rho * g)$.

Dónde: “p” es la presión en el manómetro, “ ρ ” densidad del agua y “g” gravedad.

En la siguiente fórmula, se puede introducir la altura de caída leída directamente en bar:

$$P_{hyd} = \frac{\dot{V} * p * 10^5}{1000 * 60} \quad (5.9)$$

Dónde:

P_{hyd} : Potencia hidráulica (W).

\dot{V} = caudal volumétrico, a fin de determinar el caudal volumétrico es necesario registrar el tiempo t que se necesita para llenar el depósito volumétrico de HM 150, de un punto a otro, conociendo el volumen entre puntos, (L/min).

p: es la presión que marca el manómetro (bar).

- Cálculo de eficiencia: utilice la siguiente formula:

$$\eta = \frac{P_{hyd}}{P_{out}} \quad (5.10)$$

Dónde:

η : eficiencia (%).

P_{out} : Potencia en el árbol (W).

P_{hyd} : Potencia hidráulica (W).

Grafique:

17. Par (N) contra número de revoluciones (m^{-1}).
18. Par en el árbol (N) contra número de revoluciones (m^{-1}).
19. Eficiencia (%) contra número de revoluciones (m^{-1}).

Compare las gráficas de curva con datos experimentales con las curvas que se presentan en el manual de la turbina.

¿Se parecen en forma? Explique lo que ve al comparar ambas curvas.

¿Los puntos de operación conciden? Explique si los datos prácticos obtenidos para la curva son aproximados a los de la curva mostrada en el manual, calcule un porcentaje de error.

Se espera que el estudiante tenga la oportunidad de conocer las partes de una turbina Francis, que opere el equipo y realice mediciones directas con el fin de obtener datos que suministren información del funcionamiento de la turbina, también calcule otros parámetros a partir de las mediciones y formulas suministradas (teoría del curso), además una vez registrados todos los datos necesarios, graficar las curvas características de la turbina y por ultimo realizar una comparación entre las curvas obtenidas y las que se muestran en el manual del equipo, dando su opinión respecto a los resultados.

5.3. NPSH

El cálculo de NPSH es fundamental cuando se opera una bomba centrífuga, un correcto calculo permitirá prever una succión adecuada de acuerdo a las características de la bomba utilizada y del sistema de trasiego. Otro aspecto fundamental durante la succión es evitar la cavitación, un mal diseño puede provocar este fenómeno y ocasionar daños en el equipo. Esta práctica tiene como propósito permitir al estudiante observar un sistema de succión con todos sus componentes y en funcionamiento, además poder tomar mediciones de vacío y presión en distintos puntos de funcionamiento (al introducir pérdidas por restricción de flujo con una válvula de globo) para luego poder graficar la curva de NPSH práctica de la bomba y compararla con curva mostrada en la ficha tecnica del equipo. También se tendrá la oportunidad de cerrar la válvula de globo (introducción de pérdidas en succión) pasando de un funcionamiento óptimo a uno en el cual aparecen los primeros síntomas de cavitación, condición que durará pocos segundos (pues es dañino para la bomba) pero que permitirá al estudiante entender la importancia de un correcto diseño de succión en bombas centrífugas.

A continuación el procedimiento.

A. Alistar el sistema de válvulas correspondiente (abierta o cerrada). Utilice la figura 5.9 como referencia.



Figura 5.9: Sistema de válvulas. Fuente: Propia.

A.1. Ubique la válvula de globo identificada con el número 2, ábrala por completo, luego ciérrela y cuente las vueltas que da para cerrarse por completo, cada vuelta corresponde a 360 grados. Si para cerrar la válvula da una cantidad de vueltas (n) multiplique n por 360 y divídalo entre 8, para así tener 8 puntos de medición del NPSH. Si para cerrar la válvula se necesita una cantidad (n) de vuelta y un segmento de vuelta adicional, si ese segmento es igual o mayor a 90 grados considérela como un punto de medición si es menor a 90 grados sume los grados respectivos al último punto de medición.

A.2. Para poder realizar la práctica de NPSH se deben de tener abiertas (por completo) las siguientes válvulas: 1, 2, 3, 5, 8, 9.

A.3. Por lo tanto deben estar cerradas (por completo) las válvulas: 4, 6, 7, 10, 11 y 12.

B. Procedimiento de encendido de la bomba centrífuga número 1, la cual se distingue con la sigla B1 en la figura 5.9.

B.1. Verifique que el interruptor de la toma trifásica que alimenta al variador de frecuencia del sistema de bombeo este apagado y el interruptor del panel de control tenga el circuito “abierto”.

B.2. Proceda a encender (subir) el interruptor de la toma eléctrica (trifásica) de la cual dispone el laboratorio de fluidos.

B.3. En el panel de control elija la opción correspondiente a la bomba número uno (B1) y verifique en el panel que la opción “manual” que corresponde al número 1 esté elegida.

B.4. Encienda el interruptor del panel, lo cual corresponde a “cerrado”.

B.5. En el panel de control oprima el botón de encendido para que la bomba uno (B1) comience a trabajar.

B.6. Preste atención a los manómetros los cuales registrarán lecturas inestables si aún queda aire dentro de la tubería, en ese caso permita funcionar para que salga el aire y se estabilicen las mediciones.

B.7. Controle (vigile) los niveles del líquido en los tanques cuando estén trasegando fluido, pues alguno podría desbordarse si se descuida su nivel, apague si es necesario.

B.8. Apague el equipo.

C. Estrangulación del flujo en la succión, aumentando así las pérdidas.

C.1. Ponga el equipo en funcionamiento. Lea y anote el valor de presión en el vacuómetro que está cerca de la succión de la bomba 1.

C.2. Lea y anote el valor de presión en el manómetro que está cerca de la descarga de la bomba 1.

C.3. Lea y anote el valor del caudal en los dos flujómetros que están en la descarga, cerca y lejos de la bomba 1. Apague el equipo.

C.4. Cierre parcialmente la válvula de globo (identificada como 2), gire la cantidad de grados que resultó del conteo de vueltas y cálculo de grados por punto de medición ($n \cdot 360/8$). Encienda el equipo, vuelva a anotar el vacío, presión y caudal. Apague el equipo.

C.5. Continúe con el procedimiento C4 y anote las mediciones de presión en cada punto de interés. Esto se realizará varias veces hasta que se presenten las primeras alertas de cavitación. Cada vez que se cierra un tanto la válvula de globo, se incrementan las pérdidas en tuberías, en este caso por pérdidas en accesorios, lo cual reduce nuestro NPSH disponible práctico, acercándose cada vez más al NPSH requerido, cuando estos se igualen, la teoría dice que iniciará el fenómeno conocido como cavitación.

C.6. Identificar los inicios de la cavitación, cuando esto se dé ocurrirán ciertas características que se mencionan a continuación: pérdidas de presión elevada en el manómetro ubicado en la descarga de la bomba (B1), la aguja del manómetro en la descarga vibrará. Una vez detectadas esas dos características se deberá detener el estrangulamiento del fluido. Cabe destacar que si se continúa con el proceso de estrangulamiento las características citadas anteriormente se intensificarán y se sumaran otras como ruido dentro de la bomba y vibraciones en el sistema de bombeo, es importante evitar esto para proteger el estado del equipo de laboratorio.

C.7. Luego de tomar el último punto de medición, apague la bomba (B1) por medio de la caja de control. Apague (baje) el interruptor trifásico que brinda corriente a la caja de control. Desconecte el enchufe del toma corriente.

C.8. Cierre la válvula de compuerta identificada como 1.

A continuación se brinda una tabla para la respectiva anotación de datos de presión. Podría no llegar a utilizar los 11 puntos de medición, pues el proceso se detendrá justo cuando ocurran las alertas de cavitación.

Cuadro 5.3: Mediciones para NPSH práctico. (Fuente propia).

Medición	Entrada de la bomba (inhg)	Caudal (Gal/min)	
		Rotámetro Turbina	
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			

D. Determinar la curva de NPSH de la bomba. Cada vez que se cierra la válvula de globo (se estrangula el flujo) se incrementan las pérdidas, eso disminuirá nuestro NPSH disponible acercándose a la cavitación.

Utilizando los datos de vacío del vacuómetro ubicado cerca de la entrada de la bomba y los datos de caudal, se podrá realizar la curva NPSH.

D.1. Complete la tabla 5.4. Tome en cuenta que todos los valores de presión registrados justo antes de la entrada de la bomba serán negativos pues se trata de vacío.

Utilice la siguiente ecuación, para realizar los cálculos de NPSH práctico:

$$NPSH = \frac{P_s}{\rho * g} + \frac{V_s^2}{2g} - \frac{P_v}{\rho * g} \quad (5.11)$$

Donde:

P_s : es la presión absoluta, presión atmosférica (87000 Pa) menos la manométrica en la succión.

V_s : es la velocidad de succión, obtenida por medio del caudal y área de la tubería de succión.

P_v : es la presión del vapor, 3236 Pa.

ρ : es la densidad del agua, 997 Kg/m³.

g : es la gravedad, 9.8 m/s².

Para calcular la velocidad de succión, tome en cuenta el caudal respectivo y el area transversal de la tubería de succión correspondiente de 1-1/2 pulgada de diámetro.

Cuadro 5.4: Datos para el cálculo de NPSH práctico. (Fuente propia).

Medición	Entrada B1 (inhg) Medido	Entrada B1 (Pa) Calculado	NPSH (mca) Calculado	NPSH (ft) Calculado	Caudal Rotámetro (GPM) Medido	Caudal Turbina (GPM) Medido	Caudal (m ³ /s) Calculado	Velocidad de succión (m/s) Calculado
1								
2								
3								
4								
5								
6								
7								
8								
9								
10								
11								

D.2. Realice un gráfico de NPSH disponible práctico. Grafique los valores NPSH obtenidos en el eje “y” y los datos de caudal en el eje “x”. En este mismo gráfico incluya los puntos respectivos a la curva NPSH del fabricante, puede tomar los datos de las curvas en la ficha técnica (anexos).

Compare las gráficas de la curva con datos experimentales contra la curva con datos de fabricante tomados de la ficha técnica de la bomba.

¿Se parecen en forma? Explique lo que ve al comparar ambas curvas.

¿Los puntos de operación conciden? Explique si los datos prácticos obtenidos para la curva son aproximados a los de la curva mostrada en la ficha técnica. Calcule porcentajes de error.

Se espera que el estudiante haya tenido la oportunidad de hacer variar las condiciones de succión por medio de la introducción de pérdidas con restricción de flujo, además de tomar mediciones directas y a partir de estas, crear la curva de operación NPSH disponible de la bomba, así como comparar dicha gráfica con la original de fábrica. Además haber visto de manera directa el principio de la cavitación.

5.4. TDH

La curva de TDH permite al usuario conocer la capacidad de bombeo del equipo respectivo, eso es la energía que le imprime la bomba al fluido, esta energía se traduce a la altura a que se eleva, la fricción en tuberías y accesorios, la presión a la cual se ve sometido el líquido. Este TDH se asocia con el caudal mediante la curva, es por esta razón que comprender una curva de TDH es crucial para una correcta elección de bombas según los requerimientos así como para hacerla operar en su punto de mayor eficiencia. Por medio de esta práctica el estudiante podrá observar una bomba centrífuga funcionando en su punto de mayor eficiencia, podrá realizar mediciones directas en el equipo en funcionamiento y con estas, realizar cálculos mediante fórmulas para obtener datos del funcionamiento de la bomba, lo cual le permitirá graficar la curva de la bomba. Sumado a esto se medirán datos de voltaje (V) y corriente (A) consumida para trazar también la curva de potencia asociada al equipo en funcionamiento.

A continuación el procedimiento.

A. Alistar el sistema de válvulas correspondiente (abierta o cerrada). Utilice la figura 5.9 como referencia.

A.1. Ubique la válvula de globo identificada con el número 5, ábrala por completo, luego ciérrela y cuente las vueltas que da para cerrarse por completo, cada vuelta corresponde a 360 grados. Si para cerrarse la válvula da una cantidad de vueltas (n) multiplique n por 360 y divídalo entre 8, para así tener 8 puntos de medición del NPSH. Si para cerrar la válvula se necesita una cantidad (n) de vuelta y un segmento de vuelta adicional, si ese segmento es igual o mayor a 90 grados considérela como un punto de medición si es menor a 90 grados sume los grados respectivos al último punto de medición.

A.2. Para poder realizar la práctica de TDH se deben de tener abiertas (por completo) las siguientes válvulas: Bomba 1. Abiertas: 1, 2, 3, 5, 8, 9.
Bomba 1. Cerradas: 4, 6, 7, 10, 11, 12.

B. Procedimiento de encendido de la bomba centrífuga número 1, la cual se distingue con la sigla B1 en la figura 5.9.

B.1. Verifique que el interruptor de la toma trifásica que alimenta al variador de frecuencia del sistema de bombeo este apagado y el interruptor del panel de control tenga el circuito “abierto”.

B.2. Proceda a encender (subir) el interruptor de la toma eléctrica (trifásica) de la cual dispone el laboratorio de fluidos.

B.3. En el panel de control elija la opción correspondiente a la bomba número uno (B1) y verifique en el panel que la opción “manual” que corresponde al número 1 esté elegida.

B.4. Encienda el interruptor del panel, lo cual corresponde a “cerrado”.

B.5. En el panel de control oprima el botón de encendido para que la bomba uno (B1) comience a trabajar.

B.6. Preste atención a los manómetros y demás instrumentos los cuales deben de registrar los valores de medición. Apague el equipo con el botón en el panel de control.

B.7. Controle (vigile) los niveles del líquido en los tanques cuando estén trasegando fluido, pues alguno podría desbordarse si se descuida su nivel, apague si es necesario.

C. Estrangulación del flujo en la descarga, aumentando así las pérdidas.

C.1. Encienda el equipo. Lea y anote el valor de presión en el vacío-manómetro, que está cerca de la succión de la bomba 1. Lea y anote el valor de presión en el manómetro que está cerca de la descarga de la bomba 1. Lea y anote el valor del caudal en los flujómetro (rotámetro y turbina) que están cerca de la descarga de la bomba 1. Lea y anote los valores de corriente y voltaje en los cables de alimentación trifásica (ubicados en la caja de registro cerca de interruptor de la toma), utilice un amperímetro y un voltímetro. Apague el equipo.

C.2. Cierre parcialmente la válvula de globo (identificada como 5), gire la cantidad de grados que resultó del conteo de vueltas y cálculo de grados por punto de medición ($n \cdot 360/8$).

C.3. Repita el procedimiento C1 y anote las mediciones allí mencionadas en cada punto de interés. Esto se realizará varias veces hasta que la válvula de globo (5) esté cerrada. En ese momento el caudal será cero y los alabes de la bomba harán el agua recircular dentro de la bomba. Cada vez que se cierra un tanto la válvula de globo, se incrementan las pérdidas en tuberías, en este caso por pérdidas en accesorios, lo cual reduce el caudal, acercando al TDH máximo que es capaz de entregar la bomba.

C.4. Apague la bomba (B1) por medio del panel de control. Apague el interruptor trifásico que brinda corriente al panel.

C.5. Cierre la válvula de compuerta identificada como 1.

A continuación se brinda la tabla 5.5 para la respectiva anotación de datos de presión, caudal, corriente y voltaje.

Cuadro 5.5: Datos TDH. (Fuente propia).

Medición	Presión en la entrada B1 inhg	Presión en la salida B1 Psi	Caudal Rotámetro (Gal/min)	Caudal Turbina (Gal/min)	Corriente A	Voltaje V
1						
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						

D. Determinar la curva de TDH de la bomba.

D.1. Confeccione un plano de las tuberías.

D.2. Para calcular el TDH utilice la siguiente información.

Cada vez que se cierra la válvula de globo (se estrangula el flujo) se incrementan las pérdidas, eso disminuirá el caudal, aumentando la carga.

Utilizando la siguiente ecuación se pueden calcular los valores de TDH para distintos puntos de medición.

$$TDH = \frac{P_s - P_e}{\rho * g} + \frac{Q_s^2}{2 * g S_s^2} - \frac{Q_e^2}{2 * g S_e^2} + \Delta Z \quad (5.12)$$

Dónde:

P_s, P_e : Presiones a la salida y entrada de la bomba (Pa).

Q: Caudal circulante (m^3/s).

S_s, S_e : Secciones transversales de las tuberías de salida y entrada (m^2).

ΔZ : Diferencia de cota entre los puntos de medida en la entrada y la salida (m).

Utilice densidad del agua: $997 \text{ Kg}/m^3$

Utilice gravedad: $9,8 \text{ m}/s^2$

Complete la siguiente tabla. Tome en cuenta que todos los valores de presión registrados justo antes de la entrada de la bomba serán negativos pues se trata de succión.

A continuación se brinda la tabla 5.6 para ingresar los resultados obtenidos.

Cuadro 5.6: Resultados TDH. (Fuente propia).

Medición	Presión en la entrada B1 Pa	Presión en la salida B1 Pa	Caudal Turbina (m^3/s)	Área(m^2)		TDH mca	TDH ft	Potencia W	Potencia hp
				S_e	S_s				
1				0,00079	0,00051				
2				0,00079	0,00051				
3				0,00079	0,00051				
4				0,00079	0,00051				
5				0,00079	0,00051				
6				0,00079	0,00051				
7				0,00079	0,00051				
8				0,00079	0,00051				

D.3. Realice un gráfico de TDH. Grafique los valores TDH (ft) obtenidos en el eje “y” y los datos de caudal (GPM) en el eje “x”. En este mismo gráfico incluya los puntos respectivos a la curva TDH del fabricante, puede tomar los datos de las curvas en la ficha técnica (anexos).

Compare las gráficas de la curva con datos experimentales contra la curva con datos de fabricante tomados de la ficha técnica de la bomba.

D.4. Realice un gráfico de potencia. Grafique los valores potencia (hp) obtenidos en el eje “y” y los datos de caudal (GPM) en el eje “x”. En este mismo gráfico incluya los puntos respectivos a la curva de potencia del fabricante, puede tomar los datos de las curvas en la ficha técnica (anexos).

Compare las gráficas de la curva con datos experimentales contra la curva con datos de fabricante tomados de la ficha técnica de la bomba.

¿Se parecen en forma? Explique lo que ve al comparar ambas curvas.

¿Los puntos de operación conciden? Explique si los datos prácticos obtenidos para la curva son aproximados a los de la curva mostrada en la ficha técnica. Calcule porcentaje de error.

Se espera que el estudiante haya tenido la oportunidad de hacer la variar las condiciones de funcionamiento de la bomba, por medio de la introducción de pérdidas con restricción de flujo en la descarga, además de tomar mediciones directas y a partir de estas, crear las curvas de TDH y potencia de la bomba, así como comparar dichas curvas con las del fabricante. Realizado lo anterior se espera que el estudiante interiorice su conocimiento respecto a las curvas de una bomba, brindándole mejores herramientas para las correctas interpretaciones de estas durante su vida profesional.

5.5. Sistema en serie

Cuando una sola bomba no logra suplir las demandas de TDH del diseño, una posible solución es colocar dos bombas en serie de manera que su TDH se sume para lograr el objetivo. Mediante esta práctica se espera que el estudiante pueda manipular un sistema de válvulas para poner dos bombas a funcionar en serie. Además se realizarán mediciones directas al equipo en funcionamiento, luego con los datos registrados se utilizarán fórmulas para poder obtener la información necesaria para crear la curva TDH total de la configuración en serie.

A continuación el procedimiento.

A. Alistar el sistema de válvulas correspondiente (abierta o cerrada).

A.1. Ubique la válvula de globo identificada con el número 5, ábrala por completo, luego ciérrela y cuente las vueltas que da para cerrarse por completo, cada vuelta corresponde a 360 grados. Si para cerrarse la válvula da una cantidad de vueltas (n) multiplique n por 360 y divídalo entre 8, para así tener 8 puntos de medición. Si para cerrar la válvula se necesita una cantidad (n) de vuelta y un segmento de vuelta adicional, si ese segmento es igual o mayor a 90 grados considérela como un punto de medición si es menor a 90 grados sume los grados respectivos al último punto de medición.

A.2. Para poder realizar la práctica de sistema en serie se deben de tener abiertas (por completo) las siguientes válvulas, según figura 5.9:

Abiertas: 1, 2, 4, 12, 5, 8, 9, 11.

Cerradas: 3, 6, 7, 10.

B. Procedimiento de encendido de las bombas centrífugas número 1 y número 2, las cuales se distinguen con las siglas B1 y B2 respectivamente, en la figura 5.9.

B.1. Verifique que el interruptor de la toma trifásica que alimenta al variador de frecuencia del sistema de bombeo este apagado y el interruptor del panel de control tenga el circuito “abierto”.

B.2. Proceda a encender (subir) el interruptor de la toma eléctrica (trifásica) de la cual dispone el laboratorio de fluidos.

B.3. En el panel de control elija la opción correspondiente a la bomba número uno y dos (B1 y B2) y verifique en el panel que la opción “manual” que corresponde al número 1 esté elegida.

B.4. Encienda el interruptor del panel, lo cual corresponde a “cerrado”.

B.5. En el panel de control oprima el botón de encendido para que la bomba uno y dos (B1 y B2) comience a trabajar.

B.6. Preste atención a los manómetros y sensores de caudal. Controle (vigile) los niveles del líquido en los tanques cuando estén trasegando fluido, pues alguno podría desbordarse si se descuida su nivel, apague si es necesario.

C. Estrangulación del flujo en la descarga, aumentando así las pérdidas.

C.1. Encienda el equipo. Lea y anote el valor de presión en el vacuómetro que está cerca de la succión de la bomba 2.

Lea y anote el valor de presión en el manómetro que está cerca de la descarga de la bomba 1. Lea y anote el valor del caudal en el flujómetro (rotámetro) que está cerca de la descarga (salida) de la bomba 1.

Lea y anote el valor del caudal en el flujómetro (turbina) que está en la descarga. Apague el equipo

C.2. Cierre parcialmente la válvula de globo (identificada como 5), gire la cantidad de grados que resultó del conteo de vueltas y cálculo de grados por punto de medición ($n \cdot 360/8$).

C.3. Repita el procedimiento C1 y anote las mediciones de presión y caudal en cada punto de interés. Esto se realizará varias veces hasta que la válvula de globo (12) esté cerrada. En ese momento el caudal será cero y los alabes de las bombas harán el agua recircular dentro de ambas bombas.

Cada vez que se cierra un tanto la válvula de globo, se incrementan las pérdidas en tuberías, en este caso por pérdidas en accesorios, lo cual reduce el caudal, acercando al TDH máximo que es capaz de entregar la bomba.

C.4. Apague las bombas 1 y 2 (B1 y B2) por medio del panel de control.

C.5. Cierre la válvula de compuerta identificada como 1.

A continuación se brinda la tabla 5.7 para la respectiva anotación de datos de presión y caudal.

Cuadro 5.7: Mediciones del sistema en serie.

Medición	Presión en la entrada B2 inHg	Presión en la salida B1 Psi	Caudal Rotámetro (Gal/min)	Caudal Turbina (Gal/min)
1				
2				
3				
4				
5				
6				
7				
8				

D. Determinar la curva de TDH de la bomba.

Cada vez que se cierra la válvula de globo (se estrangula el flujo) se incrementan las pérdidas, eso disminuirá el caudal, aumentando la carga.

Utilizando la siguiente ecuación se pueden calcular los valores de TDH para distintos puntos de medición.

$$TDH = \frac{P_s - P_e}{\rho * g} + \frac{Q_s^2}{2 * g S_s^2} - \frac{Q_e^2}{2 * g S_e^2} + \Delta Z \quad (5.13)$$

Dónde:

P_s, P_e : Presiones a la salida de la segunda bomba y entrada de la primer bomba (Pa).

Q : Caudal circulante (m^3/s).

S_s, S_e : Secciones transversales de las tuberías de salida y entrada (m^2).

ΔZ : Diferencia de cota entre los puntos de medida en la entrada y la salida (m).

Utilice densidad del agua: $997 \text{ Kg}/m^3$

Utilice gravedad: $9,8 \text{ m}/s^2$

A continuación se brinda la tabla 5.8 para ingresar los resultados obtenidos.

Cuadro 5.8: Resultados del sistema en serie.

Medición	Presión en la entrada B2 Pa	Presión en la salida B1 Pa	Caudal Turbina (m ³ /s)	Área(m ²)		TDH mca	TDH ft
				s_e	s_s		
1				0,00079	0,00051		
2				0,00079	0,00051		
3				0,00079	0,00051		
4				0,00079	0,00051		
5				0,00079	0,00051		
6				0,00079	0,00051		
7				0,00079	0,00051		
8				0,00079	0,00051		

D.4. Realice un gráfico de TDH. Grafique los valores TDH (ft) obtenidos en el eje “y” y los datos de caudal (GPM) en el eje “x”. En este mismo gráfico incluya los puntos respectivos a la curva TDH del fabricante, puede tomar los datos de las curvas en la ficha técnica (anexos), recuerde que las bombas son idénticas.

Compare las gráficas de la curva con datos experimentales contra la curva con datos de fabricante tomados de la ficha técnica de la bomba.

E. Verificación de la teoría respecto a sistemas en serie.

E.1. Con los datos de TDH prácticos o del fabricante de ambas bombas (1 y 2) corrobore que se cumpla la teoría respecto a sistemas en serie, que indica lo siguiente:

$$H_{total} = H_1 + H_2 \quad (5.14)$$

Dónde: H_{total} = El TDH del sistema en paralelo (m).

H_1 = El TDH que trasiega la bomba 1 (m).

H_2 = El TDH que trasiega la bomba 2 (m).

Comente los resultados.

¿Al colocar en serie ambas bombas se sumaron los TDH correspondientes a cada bomba funcionando de manera individual? Explique qué ocurrió.

Se espera que el estudiante haya podido colocar un sistema en serie y ponerlo en funcionamiento, así como realizar mediciones y cálculos que le permitan graficar la curva TDH del sistema en serie. Además es importante poner atención a las pérdidas por fricción en tuberías y accesorios entre ambas bombas.

5.6. Sistema en paralelo

Cuando una sola bomba no logra suplir las demandas de caudal necesarias en el diseño, una posible solución es colocar dos bombas en paralelo de manera que su caudal se sume para lograr el objetivo. Mediante esta práctica se espera que el estudiante pueda manipular un sistema de válvulas para poner dos bombas a funcionar en paralelo. Además se realizarán mediciones directas al equipo en funcionamiento, luego con los datos registrados se utilizarán fórmulas para poder obtener la información necesaria para crear la curva TDH total de la configuración en paralelo.

A continuación el procedimiento.

A. Alistar el sistema de válvulas correspondiente (abierta o cerrada).

A.1. Ubique las válvulas de globo identificadas con los números 5 y 6, ábralas por completo, luego ciérrelas y cuente las vueltas que dan para cerrarse por completo cada una por separado, cada vuelta corresponde a 360 grados. Si para cerrarse las válvulas da una cantidad de completa de vueltas (n) multiplique n por 360 y divídalo entre 8, para así tener 8 puntos de medición del TDH. Si para cerrar las válvulas se necesita una cantidad (n) de vueltas y un segmento de vuelta adicional, si ese segmento es igual o mayor a 90 grados considérelolo como un punto de medición si es menor a 90 grados sume los grados respectivos al último punto de medición.

A.2. Para poder realizar la práctica de sistema en paralelo se deben de tener abiertas (por completo) las siguientes válvulas de acuerdo a la figura 4.11:

Abiertas: 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 y 11.

Cerradas: 10 y 12.

B. Procedimiento de encendido de las bombas centrífugas número 1 y número 2, las cuales se distinguen con las siglas B1 y B2 respectivamente, en la figura 5.9.

B.1. Verifique que el interruptor de la toma trifásica que alimenta al variador de frecuencia del sistema de bombeo este apagado y el interruptor del panel de control tenga el circuito “abierto”.

B.2. Proceda a encender (subir) el interruptor de la toma eléctrica (trifásica) de la cual dispone el laboratorio de fluidos.

B.3. En el panel de control elija la opción correspondiente a la bomba número uno y dos (B1 y B2) y verifique en el panel que la opción “manual” que corresponde al número 1 esté elegida.

B.4. Encienda el interruptor del panel, lo cual corresponde a “cerrado”.

B.5. En el panel de control oprima el botón de encendido para que la bomba uno y dos (B1 y B2) comience a trabajar.

B.6. Preste atención a los manómetros y sensores de caudal. Controle (vigile) los niveles del líquido en los tanques cuando estén trasegando fluido, pues alguno podría desbordarse si se descuida su nivel, apague si es necesario. Apague el equipo.

C. Estrangulación del flujo en la descarga, aumentando así las pérdidas.

C.1. Encienda el equipo. Lea y anote el valor de presión en los vacuómetros que están cerca de la succión de las bombas 1 y 2.

Lea y anote el valor de presión en los manómetros que están cerca de la descarga de la bomba 1 y 2. Lea y anote el valor del caudal en los flujómetros (vortex y rotámetro) que está cerca de la descarga (salida) de las bombas 1 y 2.

Lea y anote el valor del caudal en el flujómetro (turbina) que está en la descarga. Apague el equipo.

C.2. Cierre parcialmente las válvula de globo (a la descarga tanto de B1 y B2), gire la cantidad de grados que resultó del conteo de vueltas y cálculo de grados por punto de medición ($n \cdot 360/8$), igual cantidad de vueltas en cada válvula.

C.3. Repita el procedimiento C1 y anote las mediciones de presión y caudal en cada punto de interés. Esto se realizará varias veces hasta que las válvulas de globo estén cerradas. En ese momento el caudal cerca cero y los alabes de las bombas harán el agua recircular dentro de ambas bombas.

Cada vez que se cierran un tanto las válvulas de globo, se incrementan las pérdidas en tuberías, en este caso por pérdidas en accesorios, lo cual reduce el caudal, acercando al TDH máximo que es capaz de entregar la bomba.

C.4. Apague las bombas (B1 y B2) por medio del panel de control.

C.5. Apague (baje) el interruptor de la toma trifásica.

C.6. Cierre la válvula de compuerta identificada como 1.

A continuación se brinda la tabla 5.9 para la respectiva anotación de datos de presión y caudal.

Cuadro 5.9: Mediciones del sistema en paralelo.

Medición	Presión en la entrada B1 y B2 inhg		Presión en la salida B1 y B2 Psi		Caudal Rotámetro (Gal/min)	Caudal Vortex (Gal/min)	Caudal Turbina (Gal/min)
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							

D. Determinar la curva de TDH de la bomba. Cada vez que se cierra la válvula de globo (se estrangula el flujo) se incrementan las pérdidas, eso disminuirá el caudal, aumentando la carga.

Utilizando la siguiente ecuación se pueden calcular los valores de TDH para distintos puntos de medición.

$$TDH = \frac{P_s - P_e}{\rho * g} + \frac{Q^2}{2 * g} \left(\frac{1}{S_s} - \frac{1}{S_e} \right) + \Delta Z \quad (5.15)$$

Dónde:

P_s, P_e : Presiones a la salida y entrada de la bomba (Pa).

Q: Caudal circulante (m^3/s).

S_s, S_e : Secciones transversales de las tuberías de salida y entrada (m^2).

ΔZ : Diferencia de cota entre los puntos de medida en la entrada y la salida (m).

Utilice densidad del agua: $997 \text{ Kg}/m^3$

Utilice gravedad: $9,8 \text{ m}/s^2$

A continuación se brinda la tabla 5.10 para ingresar los resultados obtenidos.

Cuadro 5.10: Resultados del sistema en paralelo.

Medición	Presión en la entrada B1 Pa	Presión en la salida B1 Pa	Caudal Turbina (m ³ /s)	Área(m ²)		TDH mca	TDH ft
				s_e	s_s		
1				0,00079	0,00051		
2				0,00079	0,00051		
3				0,00079	0,00051		
4				0,00079	0,00051		
5				0,00079	0,00051		
6				0,00079	0,00051		
7				0,00079	0,00051		
8				0,00079	0,00051		

D.1. Realice un gráfico de TDH. Grafique los valores TDH (ft) obtenidos en el eje “y” y los datos de caudal (GPM) en el eje “x”. En este mismo gráfico incluya los puntos respectivos a la curva TDH del fabricante, puede tomar los datos de las curvas en la ficha técnica (anexos), recuerde que las bombas son idénticas.

Compare las gráficas de la curva con datos experimentales contra la curva con datos de fabricante tomados de la ficha técnica de la bomba.

E. Verificación de la teoría respecto a sistemas en paralelo.

E.1. Con los datos de caudal prácticos de ambas bombas (1 y 2) corrobore que se cumpla la teoría respecto a sistemas en paralelo, que indica lo siguiente:

$$Q_{total} = Q_1 + Q_2 \quad (5.16)$$

Dónde: Q_{total} = El caudal del sistema en paralelo (m³/s).

Q_1 = El caudal que trasiega la bomba 1 (m³/s).

Q_2 = El caudal que trasiega la bomba 2 (m³/s).

Comente los resultados.

¿Al colocar en paralelo ambas bombas se sumaron los caudales correspondientes a cada bomba funcionando de manera individual? Explique qué ocurrió.

Se espera que el estudiante haya podido colocar un sistema en paralelo y ponerlo en funcionamiento, así como realizar mediciones y cálculos que le permitan graficar la curva TDH del sistema en paralelo. Además es importante poner atención a las pérdidas por fricción en tuberías y accesorios entre ambas bombas.

Capítulo 6

Conclusiones

- El objetivo general de este proyecto se ha cumplido a cabalidad, pues al momento de su término, gracias al proceso de diseño y construcción previamente descrito, se cuenta en estado completamente funcional con el equipo requerido para llevar a cabo las prácticas de laboratorio que se elaboraron para su aprovechamiento en el contexto de un curso universitario de Máquina Hidráulicas. De igual manera y como complemento necesario, estas prácticas de laboratorio se llevan a cabo mediante las guías de trabajo que se elaboraron como parte de este trabajo para el personal docente que quiera usarlos como insumo para las actividades académicas que tenga a su cargo.

- Esto se logró luego de una serie de pasos que iniciaron con el planteamiento de los principios teóricos que se pretenden abordar con experiencias de laboratorio de este tipo; luego, se procedió a hacer entrevistas al cuerpo docente, visitas a las instalaciones, inventariado de equipos, materiales e instrumentos ya disponibles para el tema de máquinas hidráulicas en los laboratorios docentes de la Escuela de Ingeniería Mecánica. Posteriormente, se eligió la ubicación idónea para el tipo de experimento que se pretendía desarrollar, la elaboración y depuración del diseño del equipo principal, con los procesos consecuentes de presupuestado, compra de materiales, construcción y puesta en marcha del sistema, lo que involucró también aspectos de gestión de procesos internos de acondicionamiento de la infraestructura del recinto donde se instaló el equipo.

- Otra etapa que se cubrió de manera aproximadamente simultánea fue la elaboración de una serie de guías para las experiencias de laboratorio, pensadas para permitir al estudiante de ingeniería de un curso de Máquinas Hidráulicas de grado universitario experimentar de manera directa los temas analizados teóricamente en las lecciones relacionadas con el tema de turbinas y bombas centrífugas. Además, el sistema diseñado permitirá al estudiante de Mecánica de Fluidos observar ciertos fenómenos relacionados con hidrostática, conservación de la energía, cavitación y pérdidas, que se introducen en esa materia y también pueden iniciar su familiaridad con tópicos propios de máquinas hidráulicas.

- El sistema ensamblado funciona correctamente y en coherencia con el diseño propuesto; las bombas de manera individual, en serie y paralelo se ajustan a la intención de diseño, a los aspectos teóricos que se pretenden ilustrar y a las curvas de rendimiento esperado suministrados por el fabricante.

- Las guías de laboratorio asociadas a este proyecto fueron elegidas de acuerdo a los contenidos curriculares dispuestos en el programa del curso de Máquinas Hidráulicas, un curso de último año del plan de Licenciatura en Ingeniería Mecánica de la Universidad de Costa Rica. Se incorporaron en el proceso de redacción aspectos pedagógicos y el criterio del personal docente consultado según el propósito de este proyecto. También se comprobaron las prácticas siguiendo los pasos ideados para garantizar que el equipo e instrumentación fueran en efecto compatibles y practicables con cierta facilidad.

- Si bien las prioridades y enfoque de diseño del banco de pruebas para bombas centrífugas, se centraron en poder realizar pruebas prácticas de TDH, NPSH, potencia, bombas en serie y en paralelo. También fue necesario orientar el diseño a los materiales y equipo con el que ya se contaba, adaptándose así a tales circunstancias. Se agrega además que aparte de los laboratorios para los que fue diseñado el sistema, también se podrían realizar otros tipos de prácticas como por ejemplo utilizar un fluido con mayor densidad, llenar el tanque de descarga por su parte inferior, cebar las bombas cuando se encuentre seco el sistema, entre otras opciones según surga la necesidad.

- Será de suma importancia que la persona encargada de impartir los laboratorios sea profesional en el área de ingeniería mecánica pues debe de dominar tanto la teoría como la práctica relacionada a máquinas hidráulicas. Si bien las guías de laboratorio están redactadas paso a paso para poder realizar las prácticas, estas son una herramienta, pero la persona docente a cargo, tendrá la reponsabilidad guiar y acompañar al estudiante e incluso realizar ajustes o adaptaciones durante las prácticas con el fin de un mejor aprendizaje.

- En cuanto a aspectos técnicos del banco de pruebas en sí, es pertinente señalar que las válvulas de globo utilizadas no regulan el paso del fluido de manera uniforme; esto provoca que al ir cerrando la válvula por cantidad de vueltas al manubrio, a veces luego de cerrar el paso un tanto el fluido no se le restringe el paso de manera evidente, mientras que en ocasiones al dar media vuelta al manubrio el flujo se ve drásticamente estrangulado. Esto provoca que los puntos de medición no sean uniformes. Esto ocurre tanto en la válvula de succión como en ambas válvulas de descarga. Sin embargo, igualmente se puede crear la curva de operación utilizando los puntos en los que sí se nota, según la presión y el caudal medidos, cuando el flujo fue restringido. Un aspecto positivo de este detalle, es que permitirá al estudiante lidiar con ello, observando cuando ocurren cambios y cuando no, en los instrumentos de medición, además de brindarle el reto de solventar dicha situación.

- El banco de pruebas es muy favorable para la aplicación didáctica, pues permite observar diversos elementos asociados al uso de bombas centrífugas. Entre ellos se cuentan la cavitación, el aumento en la diferencia de presión total cuando se colocan bombas en serie o del caudal cuando se disponen en paralelo, el diseño de tubería y accesorios para obtener una configuración que permita operar las bombas en su punto de máxima eficiencia, los cambios ocasionados por pérdidas, el procedimiento de cebado de la bomba y los pasos a seguir para ponerla en funcionamiento. Todo lo anterior son detalles que se pueden leer en la teoría, pero que es mucho más enriquecedor que sea en contacto directo con el equipo para la formación académica y práctica del estudiantado.

- El laboratorio de fluidos de la Escuela de Ingeniería Mecánica ha sido dotado de equipo valioso para realizar prácticas de laboratorio, tanto para el cursos de Mecánica de Fluidos como el de Máquinas Hidráulicas. Este equipo lo componen una serie de módulos nuevos adquiridos en el 2021, el sistema de bombas centrífugas construido durante este proyecto y otros con los que ya se contaba y pueden continuar siendo de utilidad para estudiantes y docentes. Será de suma importancia iniciar a impartir las prácticas, con un sentido de auto-evaluación que permita mejorar de manera paulatina la experiencia del laboratorio. Analizar aspectos tales como el aprendizaje del estudiante, sus opiniones, su participación, duración de las sesiones, cantidad de personas por sesión, equipo didactico disponible, espacio dentro del laboratorio, entre otras, deberán ser consideradas como variables que permitan justificar cambios con el fin de mejorar la experiencia del curso.

- Con respecto a un posible siguiente paso para el desarrollo del laboratorio de Máquinas Hidráulicas, se indica que será de gran valor didáctico contar una alguna bomba de desplazamiento positivo y su respectivo sistema con el fin de hacerla operar y analizar su funcionamiento. Esto a razón de que las bombas de desplazamiento positivo abarcan todo un tema del curso de Máquinas Hidráulicas, por lo cual observar y operar dicha maquinaria permitirá al estudiante consolidar su previo aprendizaje teórico y ampliar su experiencia con el uso de este tipo de maquinaria hidráulica, la cual se utiliza con fluidos de mayor viscosidad y son altamente empledas en la industria.

Capítulo 7

Recomendaciones

- Como todo proceso o diseño es fundamental aplicarlo y retroalimentarlo para posteriormente mejorarlo. Es por eso que será de gran ayuda aplicar estas prácticas de laboratorio que sin lugar a duda aportaran al aprendizaje del estudiante pero que al ser aplicadas se podrán ver posibles mejoras (durante la práctica) dando la posibilidad de realizar mejoras puntuales que solo se pueden detectar al haber aplicado las guías con el estudiantado, esto permitirá depurar las guías y sus respectivos procedimientos con el fin de seguir mejorando.

- En vista de que actualmente el laboratorio de fluidos cuenta con equipo novedoso y muy adecuado para realizar las prácticas de laboratorio respectivas, se hace necesario contar con profesionales debidamente capacitados para impartirlos.

- Sustituir las válvulas de globo (implementadas con el fin de restringir el caudal) existentes (que son usadas y tienen cierto deterioro) por válvulas nuevas, con precisión demostrada y con un calibre amplio (rango de posiciones intermedios entre cerrado y abierto por completo). Esto con la intención de poder tomar los datos de al menos 8 puntos de medición siendo cada punto uniforme con los demás, de manera que cada vez que se cierre la válvula un tanto en esa misma proporción se restrinja al caudal hasta el cerrado completo.

- Sustituir los vacuo-manómetros y manómetros por instrumentos con sistema anti vibración y de preferencia digitales. Esto con la intención de obtener datos más precisos.

- Adquirir un vatímetro, con el fin de medir potencia de manera directa, aumentando la precisión. Actualmente se calcula por medio de una formula, utilizando los datos de medición de corriente y voltaje, lo cual resta precisión, en especial en el caso del amperímetro que es de aguja (muy impreciso) .

- Se recomienda, realizar algunas incorporaciones al equipo, tales como, agregar una placa de vórtice. Adquirir algún compuesto que aumente de manera significativa la viscosidad del agua y aplicar el ajuste necesario. Desarrollar una práctica de laboratorio en la cual el tanque de descarga sea llenado por su parte inferior.

- Ampliar las posibilidades del laboratorio, como por ejemplo, incluyendo nuevos sistemas (independientes) con bombas de desplazamiento positivo, los tipos de engranes y de diafragma aportarían mucho al conocimiento de los y las estudiantes.

- Aunque los laboratorios fueron pensados para estudiantes de ingeniería mecánica, es cierto que la producción de energía mediante turbinas y el trasiego de fluidos por medio de bombas centrífugas son temas sumamente importantes para la ingeniería y la humanidad en general. Sería recomendable habilitar algún programa (o sumarse a alguno existente, TCU por ejemplo) en el cual niños y jóvenes puedan observar cómo funcionan estos equipos, sin dar explicaciones muy complicadas resumir de manera agradable el principio de funcionamiento con el fin de que estas personas puedan entender porque ocurren estos fenómenos naturales y de paso los vean con sus propios ojos.

Bibliografía

- [1] BLAS ZAMORA PARRA Y ANTONIO VIEDMA ROBLES. *Máquinas hidráulicas teoría y problemas*. Primera edición, Universidad Politécnica de Cartagena, Colombia, 2016.
- [2] DÍAZ, MUSTAFÁ Y RÍOS. *Construcción y puesta en marcha de un banco de cavitación para bombas centrífugas pequeñas*, *Scientia et Technica Año XII, No 30*. 2006.
- [3] EDIBON INTERNACIONAL. *Banco de bombas en serie y paralelo*. Edibon internacional PBSPB, España, 2017.
- [4] ELETTRONICA VENETA. *Banco de pruebas de bombas centrífugas*. Veneta BPc/EV, Francia, 2022.
- [5] GOULDS PUMPS. *Ficha técnica*. Bombas centrífugas 1ST1E5E4, 2009.
- [6] GOULDS PUMPS. *Installation, Operation, and Maintenance Manual*. Model 3755, 2021.
- [7] GUNT HAMBURG. *Manual de experimentos, conexión en serie y paralelo de bombas*. G.U.N.T Geratebau, Alemania, 2014.
- [8] GUNT HAMBURG. *Manual de experimentos*. G.U.N.T Geratebau, Alemania, 2016.
- [9] GUNT HAMBURG. *Manual de experimentos, bomba centrífuga*. G.U.N.T Geratebau, Alemania, 2018.
- [10] GUNT HAMBURG. *Manual de experimentos, Principio de Funcionamiento de una Turbina Pelton*. G.U.N.T Geratebau, Alemania, 2018.
- [11] GUNT HAMBURG. *Manual de experimentos, Principio de Funcionamiento de una Turbina Francis*. G.U.N.T Geratebau, Alemania, 2019.
- [12] HERRAMIENTASINGENIERIA.COM <https://www.herramientasingeneria.com/onlinecalc/spa/altitud/altitud> 2020.
- [13] HYDRAULIC INSTITUTE. *Rotodynamic Pumps*. ANSI/HI 9.8-2018, 2018.
- [14] HYPERPHYSICS <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Kinetic/watvap.html>. 2020.
- [15] KSB PUMPS. *Manual de entrenamiento*. Primera edición, KSB Compañía Sudamericana de Bombas, 2002.
- [16] MONGE-GAPPER. *Programa IM-0423*. Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de Costa Rica, 2021.

-
- [17] MORENO Y CURBELO. *Análisis de circuitos trifásicos*. 2019.
- [18] MURILLO-GARCIA. *Programa IM-0409*. Escuela de Ingeniería Mecánica, Universidad de Costa Rica, 2019.
- [19] PIGNAT INTERNACIONAL. *Banco de bombas centrífugas*. Pignat BEP/2000, Francia, 2022.
- [20] ROBERT L. MOTT. *Mecánica de fluidos*. Sexta edición, Pearson educación, México, 2006.
- [21] SABIN CROCKER. *Piping Hand book, cuarta edición*. McGraw-Hill, Book Company, Inc, 1945.
- [22] YUNUS A CENGEL Y JOHN M CIMBALA. *Mecánica de fluidos fundamentos y aplicaciones*. Primera edición, McGraw-Hill, México, 2006.

Apéndice A

Anexo I: Ficha técnica de las bombas centrífugas



NPE Stainless Steel
 End Suction Stainless Steel Pumps
MODEL : 1ST1E5E4

Hydraulic Data					Motor Data		NPE Model	Qty.
Maximum Flow	Flow at Duty Point	Maximum TDH	TDH at Duty Point	NPSH _r	Voltage / Phase / Enclosure			
40 US g.p.m.	30 US g.p.m.	76 ft	51 ft	7 ft	208-230V 3PH TEFC		1ST1E5E4	1

Submittal Prepared for: _____ Job: _____
 Engineer: Daniel Murillo _____ Contractor: _____
 Submittal Prepared by: _____ Company: _____
 Submittal Date: 17.08.2009 _____ Approved by: _____ Date: _____

Engineering Data

Pump Code: 1ST1E5E4
 Pump Size: 1 x 1 1/4 - 6
 Pump Max Horsepower: 0.77682 hp
 Pump Horsepower at Rating Point: 0.76 hp
 Pump Shut Off Head: 76 ft
 Motor Speed: 3500 rpm
 Max. Temperature: 212 °F
 Liquid: Water
 Motor Code: ED8876S
 System Input Power: 3~ 230 V
 Motor Rated Horsepower: 1.00 hp
 Max. Frequency: 60
 Electrical Enclosures: TEFC
 Motor Standard: NEMA
 Suction Flange Standard: NPT
 Suction Flange Rating: 125 PSI
 Suction Size: 1 1/4"
 Discharge Flange Standard: NPT
 Discharge Flange Rating: 125 PSI
 Discharge: 1"
 Approximate Net Weight: 24 lb
 Impeller Size: 4 1/8"
 Impeller Construction: Cerrado
 Impeller Type: Roquete radial
 Impeller Material:
 AISI 316L Stainless Steel
 Sense of Rotation: en el sentido del reloj
 Shaft Seal: Carbon/Sil-Carbide/Viton

Standard Equipment / Capability:

High Efficiency Impeller:
 Enclosed impeller with unique floating seal ring design maintains maximum efficiencies over the life of the pump without adjustment.
 Mechanical Seal:
 Standard John Crane Type 21 with carbon versus silicon-carbide faces, Viton elastomers, and 316 stainless metal parts. Optional high temperature and chemical duty seals available.
 Motors:
 NEMA standard open drip-proof, totally enclosed fan cooled or explosion proof enclosures.
 Rugged ball bearing design for continuous duty under all operating conditions.
 Superior Materials of Construction:
 Complete AISI 316L stainless steel liquid handling components and mounting bracket for corrosion resistance, quality appearance, and improved strength and ductility.
 Casing and Adapter Features:
 Stainless steel construction with NPT threaded, centerline connections, easily accessible vent, prime and drain connections with stainless steel plugs.
 Optional seal face vent/flush available.

GOULDS PUMPS
Performance Data

NPE Stainless Steel
End Suction Stainless Steel Pumps
MODEL : 1ST1E5E4

Hydraulic Data					Motor Data		NPE Model	Qty.
Maximum Flow	Flow at Duty Point	Maximum TDH	TDH at Duty Point	NPSH _r	Voltage / Phase / Enclosure		1ST1E5E4	1
40 US g.p.m.	30 US g.p.m.	76 ft	51 ft	7 ft	208-230V 3PH TEFC			

Submittal Prepared for: _____
 Engineer: Daniel Murillo _____
 Submittal Prepared by: _____
 Submittal Date: 17.08.2009 _____

Job: _____
 Contractor: _____
 Company: _____
 Approved by: _____ Date: _____

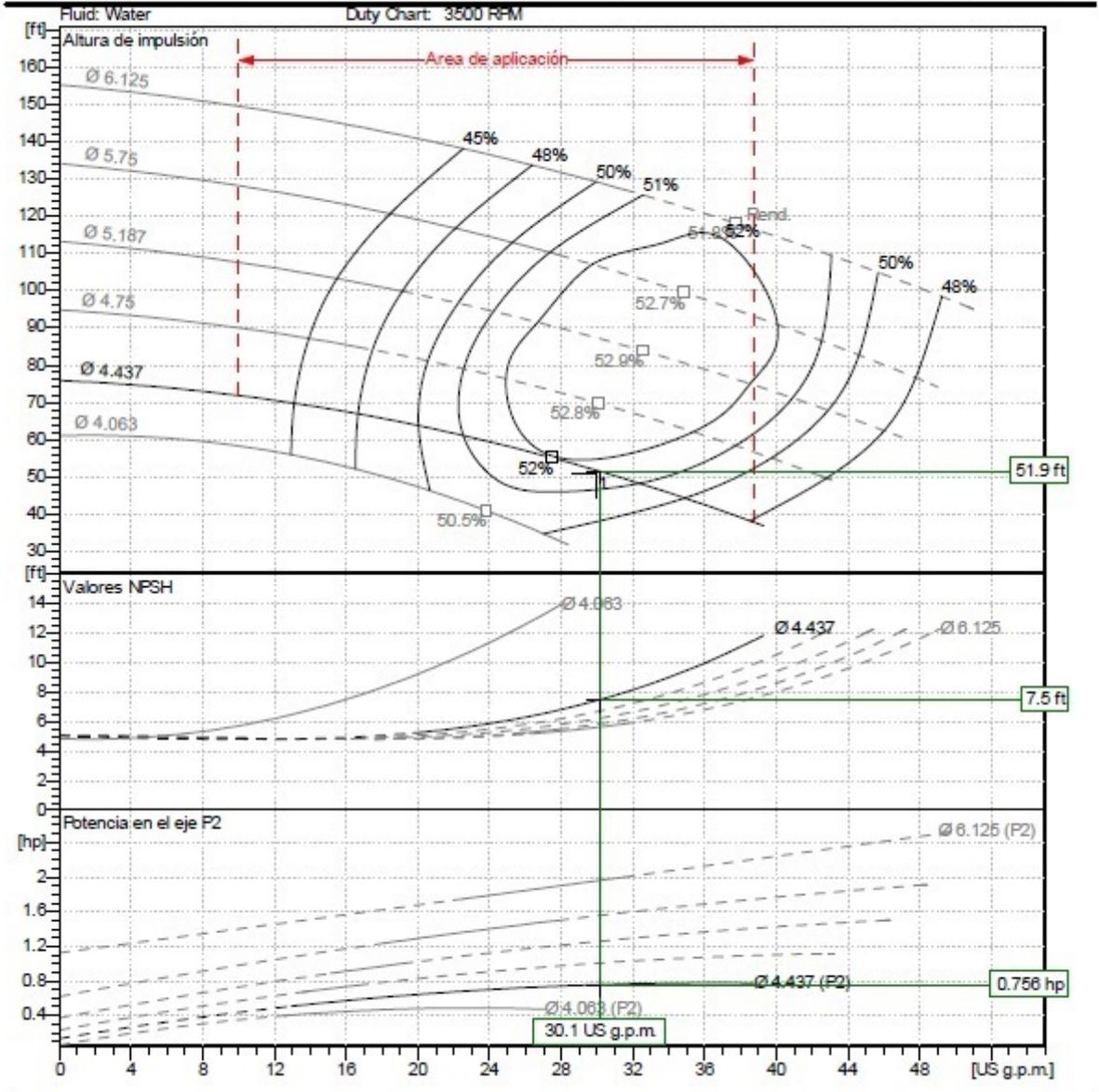


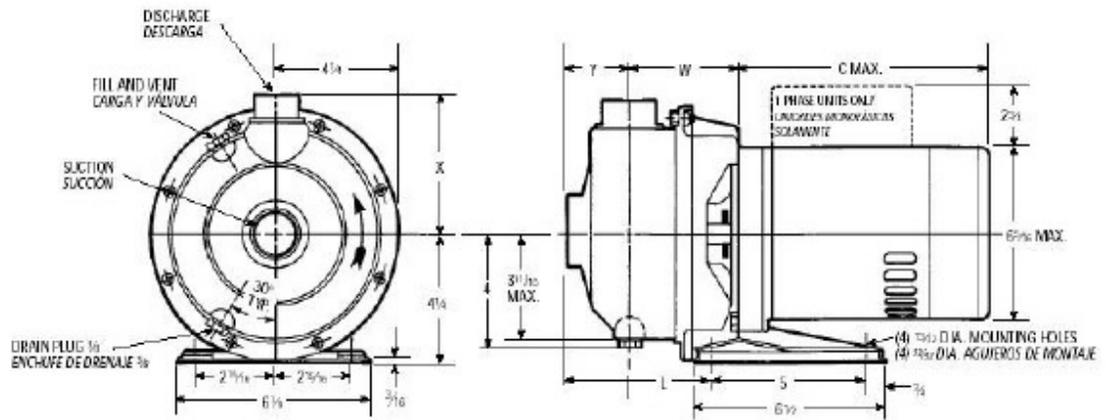
Figura A.2: Curvas de operación. (Goulds Pumps, 2009).

GOULDS PUMPS
Unit Dimensions

NPE Stainless Steel
End Suction Stainless Steel Pumps
MODEL : 1ST1E5E4

Hydraulic Data				Motor Data		NPE Model	Qty.
Maximum Flow	Flow at Duty Point	Maximum TDH	TDH at Duty Point	NPSH _r	Voltage / Phase / Enclosure		
40 US g.p.m.	30 US g.p.m.	76 ft	51 ft	7 ft	208-230V 3PH TEFC	1ST1E5E4	1

Submittal Prepared for: _____ Job: _____
 Engineer: Daniel Murillo _____ Contractor: _____
 Submittal Prepared by: _____ Company: _____
 Submittal Date: 17.08.2009 _____ Approved by: _____ Date: _____



Dimension	Value	Dimension	Value
C	11 5/8		
Cmax	11		
Discharge	1" NPT		
L	4 9/16		
M	7 5/16		
Suction	1.25" NPT		
W	3 5/16		
X	4 3/8		
Y	2		

Figura A.3: Dimensiones de las bombas centrífugas. (Goulds Pumps, 2009).

Apéndice B

Anexo II: Diagrama del diseño del sistema de tuberías

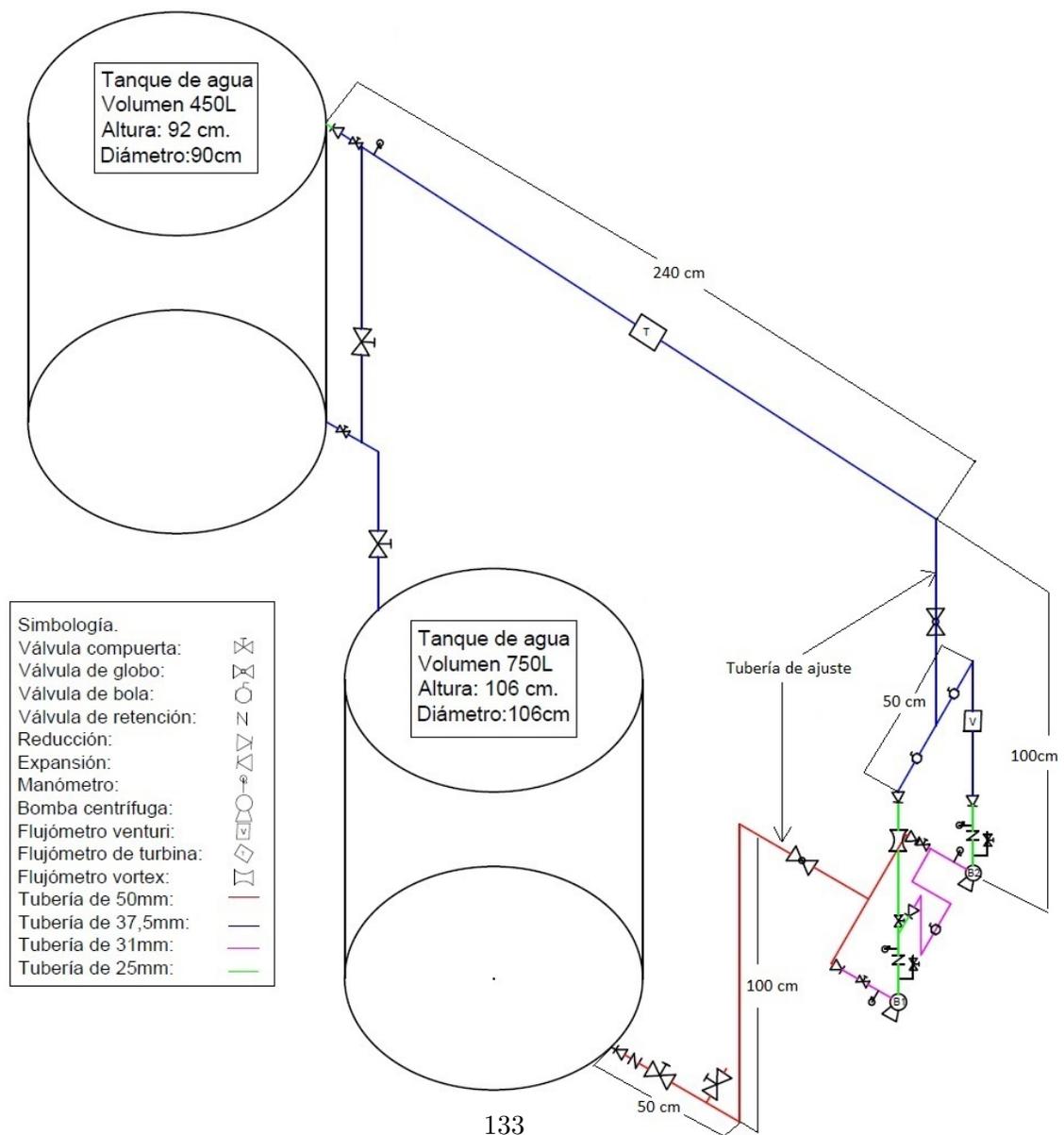


Figura B.1: Diagrama del diseño de sistema de tuberías. (Fuente propia).

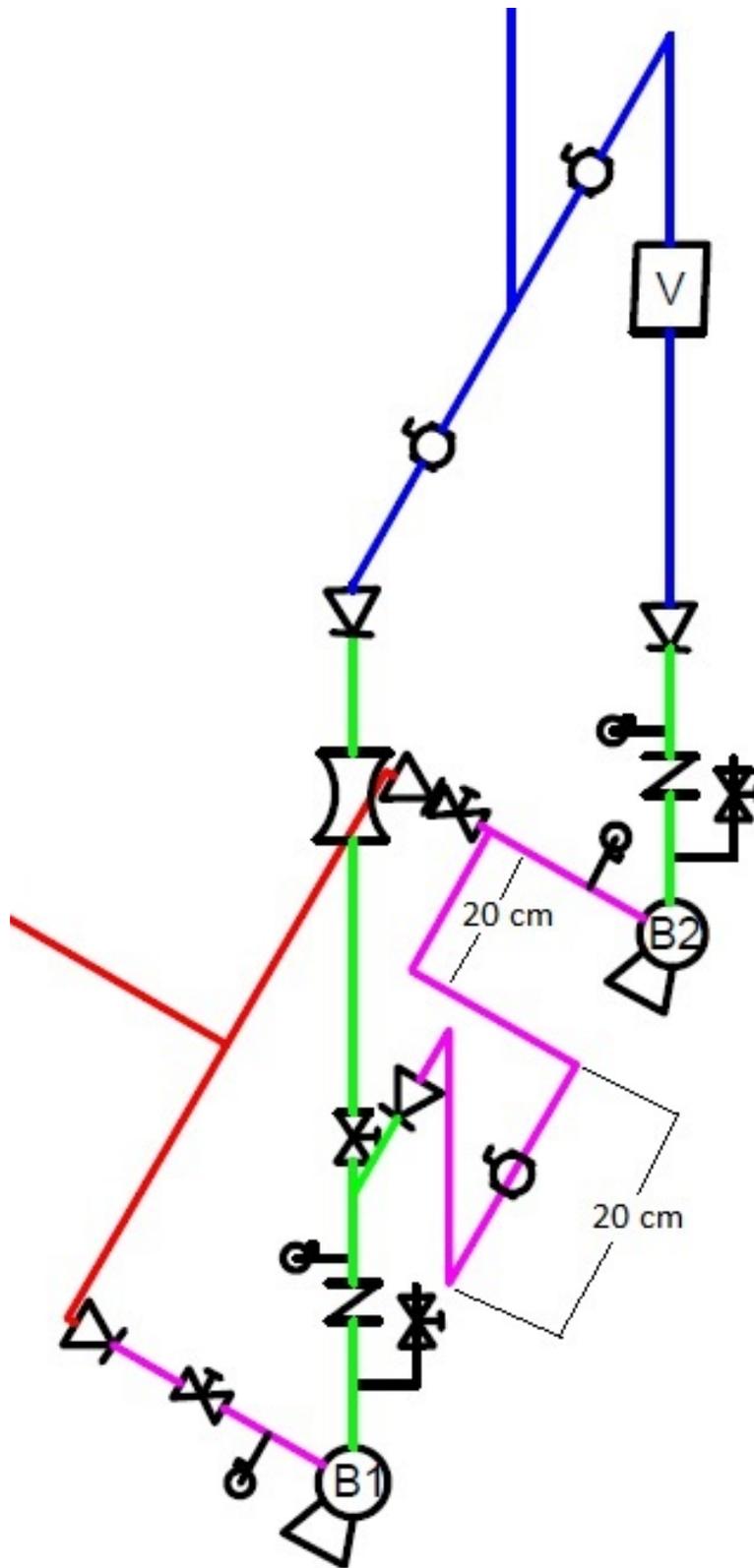


Figura B.2: Acercamiento a las bombas en el diagrama. (Fuente propia).