



Escuela de ingeniería
Ingeniería civil mecánica

Construcción y puesta en marcha de equipamientos de bombeo de laboratorio

Miguel Molina Méndez

Profesor guía: Enrique Ortiz-Vidal

Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Mecánico

Rancagua, Chile

07 de diciembre de 2023

Contenido

Resumen	1
Introducción	2
Objetivos	3
Objetivo general.....	3
Objetivos específicos	3
1. Planteamiento del problema.....	4
2. Marco teórico	5
2.1. Bancos de prueba.....	5
2.2. Bombas.....	6
2.3. Bomba Centrífuga	7
2.3.1. Partes de una bomba centrífuga.....	7
2.3.2 Leyes de afinidad	9
2.4. Motor eléctrico	10
2.4.1. Motor eléctrico monofásico	10
2.4.2. Motor eléctrico trifásico	11
2.4.3. Motor tipo jaula de ardilla	11
2.5. Pérdida de carga.....	12
2.5.1. Diagrama de Moody y ecuación de Colebrook	13
2.5.2. Factor de fricción de Darcy-Weisbach	13
2.5.3. Número de Reynolds	14
2.6. Instrumentación	14
2.6.1. Válvulas	14
3. Diseño y Construcción del aparato experimental	17
3.1. Diseño del aparato experimental de bombeo.....	17
3.2. Proceso constructivo.....	18
3.2.1. Costos del proyecto	18
3.2.2. Bitácora de construcción	18
3.3. Mejoras al equipamiento de bombeo	19
4. Validación del equipamiento de bombeo	20

4.1. Variación en la velocidad de giro del impulsor de la bomba con “HM150.29”	20
4.2. Variación del sentido de giro del impulsor de la bomba	22
4.3. Curva de la bomba	26
4.4. Curva de la bomba con el sentido de giro opuesto.....	29
5. Puesta en marcha “HM283 Ensayos en una Bomba Centrífuga”	33
5.1. Descripción del equipamiento.	33
5.2. Puesta en marcha del equipo “HM283”	35
5.3. Ensayo N°1: Determinación de la curva característica de la bomba	36
5.4. Ensayo N°2: Comportamiento del servicio al cambiar el número de revoluciones	38
5.5. Ensayo N°3: Sentido de giro	40
6. Discusión	43
7. Conclusión	43
6. Referencias.....	44
7. Anexos	46

Lista de figuras.

Figura 1 Banco experimental de bombeo extraído de (Blaauboer, 2016)	5
Figura 2 Esquema de los tipos de bombas	7
Figura 3 Comportamiento de la curva de la bomba según la disposición de los álabes extraído de (Murty, 2018).....	8
Figura 4 Diagrama esquemático de una bomba centrífuga extraído de (Lema Jami & Laurencio Alfonso, 2022)	9
Figura 5 Rotor jaula de ardilla extraído de (Chapman, 2012)	12
Figura 6 Diseño de aparato experimental	17
Figura 7 Equipamiento de bombeo ensamblado	19
Figura 8 Equipo “HM150.29 Pérdida de energía en elementos de tuberías”	20
Figura 9 Gráfica comparativa H-Q en la descarga del sistema.....	25
Figura 10 Gráfica comparativa H-Q en la entrada del equipo “HM150.29”.....	25
Figura 11 Gráfico H-Q del experimento curva de la bomba	28
Figura 12 Curva de la bomba generada con los datos del fabricante.....	29
Figura 13 Gráfico H-Q del experimento curva de la bomba con el sentido de giro opuesto.....	31
Figura 14 Grafica comparativa curvas H-Q del equipamiento de bombeo	32
Figura 15 Equipo “HM283 Ensayos en una Bomba Centrífuga”	33
Figura 16 Diagrama del equipo “HM283”	34
Figura 17 Válvula de desaireación extraído de (gunt, 2019).....	35

Figura 18 Pantalla principal del programa de adquisición de datos extraído de (gunt, 2023).....	36
Figura 19 Gráfico H-Q ensayo N°1 Curva de la bomba.....	38
Figura 20 Gráfico de comportamiento de la presión y el flujo volumétrico según la velocidad de giro de la bomba.....	40
Figura 20 Gráfico H-Q ensayo 3 sentido de giro.....	42
Figura 21 Gráfico comparativo según el sentido de giro del impulsor.....	42

Índice de tablas

Tabla 1 Cotización de elementos principales del equipamiento de bombeo	18
Tabla 2 Toma de datos del experimento Variación en la velocidad de giro del impulsor de la bomba.....	21
Tabla 3 Toma de datos del experimento Variación del sentido de giro del impulsor	24
Tabla 4 Toma de datos del experimento Curva de la bomba.....	27
Tabla 5 Toma de datos del experimento Curva de la bomba con el sentido de giro opuesto	30
Tabla 6 Componentes del equipo “HM283”	34
Tabla 7 Toma de datos del ensayo práctico N°1 Determinación de la curva característica de la bomba realizado en el módulo “HM283”	37
Tabla 8 Toma de datos del ensayo N°2 Comportamiento del servicio al cambiar el número de revoluciones	39
Tabla 9 Toma de datos del ensayo N°3 Sentido de giro	41

Resumen

La presente tesis se centra en la problemática de poseer un equipo de bombeo replicable que tenga la capacidad de abastecer secciones de ensayo experimentales tales como canales abiertos, canales anulares, tuberías, etc. En cuanto a la metodología, se centra en el diseño, construcción y validación de un equipamiento de bombeo, para ello, se abarcan las siguientes etapas. El diseño del equipamiento lo cual da paso a la identificación de los componentes necesarios para su construcción. Identificados los componentes, se realiza la cotización y compra para posteriormente comenzar con el ensamble.

Posterior a la construcción y ensamble, el objetivo es validar el equipamiento de bombeo. Para verificar el cumplimiento del objetivo se realizan ensayos experimentales conectando el equipamiento de bombeo con el equipo “HM150.29” fabricado por Gunt Hamburg (empresa en el área educativa de equipos de ingeniería) el cual muestra las pérdidas de carga que se generan por accesorios, y también, se realizan ensayos usando únicamente el aparato experimental. Se obtienen curvas del comportamiento del flujo en cuanto a presión y caudal en ambos sentidos de giro del impulsor de la bomba para posteriormente ser analizadas y comparadas con las mostradas por el fabricante de la bomba. Finalmente se realiza una breve discusión en la cual se concluye que el equipamiento de bombeo cuenta con las características suficientes para abastecer secciones de ensayo.

Además, se realiza la puesta en marcha de un equipamiento de bombeo comercial, el “HM283” también perteneciente a gunt, estas pruebas se realizaron principalmente para comprender el funcionamiento de una estación de bombeo y su comportamiento y con ello desarrollar experimentos para realizar en el aparato experimental. En la puesta en marcha del equipo HM283 se desarrollan experimentos en conjunto con estudiantes, en base a esto, se obtienen datos experimentales con los cuales se realizan gráficas características de la instalación.

Introducción

El suministro de agua de forma eficiente se encuentra presente en diferentes campos, puede verse tanto en la agricultura, en la minería y en la ingeniería desempeñando un rol crucial en diversas instalaciones. En cuanto al campo de la ingeniería y la hidráulica surge la problemática de poseer un equipo el cual pueda abastecer de agua secciones de ensayo como canales abiertos, canales anulares, tuberías circulares, etc. La presente tesis se centra en el diseño, construcción y validación de un equipamiento de bombeo para abastecer con agua secciones de ensayo construidas con propósitos experimentales.

En cuanto a la construcción, el proceso consta de la identificación de componentes, la cotización y compra, la construcción y la validación del equipamiento. La validación se realiza con base en 4 experimentos que abarcan el uso del equipamiento de bombeo experimental y en conjunto se acopla el equipo “HM150.29 Pérdidas de energía en elementos de tuberías”, un equipo de origen comercial de la marca *gunt*®. Con el equipo “HM150.29” se pueden obtener datos específicos de la presión que el equipamiento de bombeo experimental puede entregar a una sección de ensayo, puesto que cuenta con un manómetro en su entrada. Teniendo en cuenta que para la conexión se necesita una reducción de 1” a 3/4” lo cual puede generar un cambio en la presión en comparación a cuando se realizan experimentos conectados a secciones de ensayo sin reducción.

Además de la validación, se realiza la puesta en marcha del equipo “HM283 Ensayos en una bomba centrífuga”, también fabricado por *gunt*®, con el cual se realizan experimentos en conjunto con estudiantes de la carrera de ingeniería civil mecánica obteniendo datos experimentales con los cuales se realiza un análisis generando gráficos característicos de la instalación.

Objetivos

Objetivo general

Validar el funcionamiento de estaciones experimentales de bombeo de desarrollo *in-house/en casa* y de origen comercial.

Objetivos específicos

1. Construir un aparato experimental de bombeo para el suministro de agua en secciones de ensayo. Para ello se conceptualiza la estación experimental identificando los componentes necesarios para la construcción y aplicación. Se hace la cotización y compra de equipos y componentes necesarios para la construcción, luego, se realiza la construcción y ensamble de la estación experimental. Finalmente, se ejecuta la puesta en marcha y mejoras necesarias.
2. Poner en marcha el equipo comercial *gunt*® “HM283 Ensayos en una Bomba Centrífuga”. Para ello, se realiza una revisión del manual de funcionamiento proporcionado por *gunt*®, entendiendo los riesgos presentes al operar el equipo. Siguiendo el manual, se realizan pruebas preliminares en el equipo para posteriormente realizar ensayos con estudiantes de la carrera de ingeniería civil mecánica obteniendo datos que posteriormente serán analizados obteniendo información relevante de la bomba en cuestión.
3. Validar la estación de bombeo experimental con el uso del equipo de pérdida de carga *gunt*® “HM150.29”. Para ello se ejecutarán cuatro ensayos con la estación experimental, 2 de ellos se realizarán utilizando el equipo “HM150.29” y los otros únicamente utilizando la estación experimental. El primero consiste en tomar la presión en la succión de la bomba y en la descarga de la estación experimental y/o ingreso al equipo “HM150.29”. El ensayo 2 es igual al primero, sin embargo, se realiza con el impulsor girando en sentido contrario. El ensayo 3 consta de medir la presión en la succión y en la descarga de la bomba cerrando gradualmente la válvula de compuerta hasta que el caudal llegue a 0 L/min. El ensayo 4 es igual al ensayo 3, sin embargo, se realiza con el impulsor girando en el sentido contrario.

1. Planteamiento del problema.

En el ámbito de la investigación en ingeniería, principalmente en la experimentación con fluidos, se cuenta con el problema de la ausencia de un equipamiento a bajo costo para abastecer secciones de ensayo las cuales son esenciales para llevar a cabo experimentos y aplicaciones prácticas. El principal problema identificado es la falta de un equipamiento diseñado exclusivamente para abastecer con agua secciones de ensayo experimentales, que a su vez proporcione datos específicos del caudal y la presión a la cual se abastece la sección. Existen empresas las cuales fabrican equipamientos con este objetivo, sin embargo, algunos de ellos cuentan con una medición de caudal de tipo volumétrica con la cual se requiere un cronómetro para medir la cantidad de L/min que está proporcionando el equipo lo cual puede llegar a ser tardado y tedioso. El propósito es construir un aparato experimental de bombeo que permita abastecer secciones de ensayo, que sea replicable y a bajo costo para que sea accesible a proyectos que cuenten con un presupuesto limitado, la elaboración del equipamiento no solo beneficiará la ejecución de experimentos, sino que también contribuirá al avance en la educación e investigación en este campo.

2. Marco teórico

2.1. Bancos de prueba

Los bancos de prueba pueden dividirse en dos tipos, están los industriales y también los experimentales (*Blaauboer, 2016*). En el caso de los industriales, tienen la posibilidad de caracterizar la bomba hidráulica ensayada, esto bajo los parámetros de la norma ISO 9906 Bombas rotodinámicas, pruebas de aceptación de rendimiento hidráulico grados 1 y 2. La norma determina que las mejores condiciones de medición se obtienen cuando el flujo posee una distribución de velocidad axialmente simétrica, una distribución uniforme de la presión estática y libertad de remolino inducido por la instalación (*ISO, 1999*). Para el caso de los bancos de prueba experimentales de laboratorio, no necesariamente necesitan cumplir la norma a cabalidad. La flexibilidad en cuanto a la norma hace posible el estudio de bombas en arreglos de serie paralelo, determinar la curva característica de la bomba, etc. (*Blaauboer, 2016*)

En la Figura 1 se aprecia un banco de pruebas de tipo experimental perteneciente a la empresa francesa DELTALAB-SMT. Este banco permite realizar pruebas de hasta 6 bar de presión, fue diseñado para la instrucción de estudiantes, por lo cual no consta de un rápido intercambio de bombas (*Blaauboer, 2016*). El banco de pruebas cuenta con 2 bombas que permiten un montaje tanto en serie como en paralelo obteniendo flujo de un único estanque, cuenta con válvulas para controlar el paso del flujo, con instrumentos de medición de presión y un tablero el cual alberga el controlador del sistema.

Figura 1.

Banco experimental de bombeo extraído de (Blaauboer, 2016)



2.2. Bombas

Las bombas son máquinas de fluido las cuales transforman energía mecánica y comunican energía cinética de presión al líquido que la atraviesa. Mediante el uso de esta energía el líquido puede remontar el desnivel entre un depósito ubicado a una altura superior a otro depósito. En cuanto al elemento encargado de mover el fluido presente en la bomba, este puede ser de diversas configuraciones dependiendo del tipo de bomba, entre ellos bombas de uno o varios émbolos, engranajes, paletas deslizantes y álabes de diversas formas. Las condiciones de trabajo de una bomba pueden ser diversos desde un ambiente esterilizado hasta en pozos de petróleo de 3000 m de profundidad, bombeando todo tipo de fluidos sin excepción, desde los más volátiles hasta fluidos viscosos, incluidos lodos y líquidos que llevan consigo sólidos en suspensión. (Mataix, 2009)

Tipo de bombas

Existen criterios los cuales permiten clasificar las máquinas de fluidos, entre ellos se encuentran, el principio de funcionamiento (desplazamiento positivo/rotodinámico), la compresibilidad del fluido y el sentido de transmisión de la energía (Mataix, 2009). En esta tesis se considera el criterio de principio de funcionamiento para la clasificación de las máquinas de fluido en máquinas de desplazamiento positivo y rotodinámicas.

Desplazamiento positivo

Las máquinas de desplazamiento positivo, también denominadas volumétricas, llevan su nombre debido a que su principio de funcionamiento consiste en desplazar un volumen fijo de fluido en cada ciclo, independiente de las condiciones presentes en el sistema. Entre las bombas de desplazamiento positivo se incluyen las máquinas de émbolo (bombas, compresores, máquinas de vapor, cilindros hidráulicos y neumáticos, etc.), Máquinas de membrana y rotativas. Este principio especifica que una cantidad de flujo es retenida positivamente durante su paso por la máquina, esto quiere decir que el flujo se mantiene dentro del sistema y no se le permite que fluya en la dirección opuesta, generando así, un cambio en la presión debido a una variación en el volumen del órgano de retención. (Mataix, 2009)

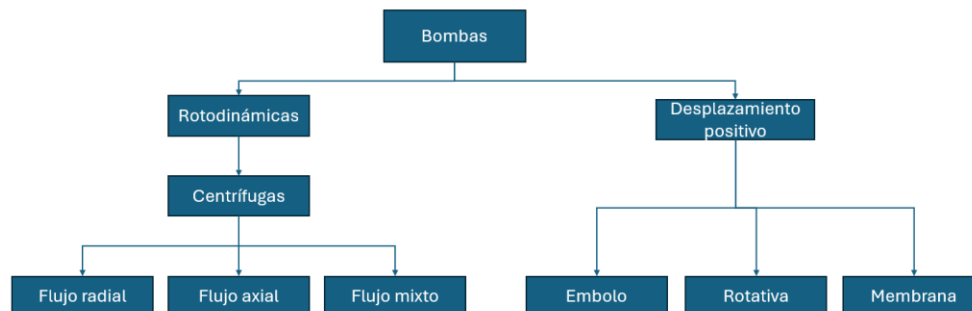
Rotodinámica

Las máquinas rotodinámicas, también denominadas cinéticas, basan su funcionamiento en la ecuación de Euler la cual indica la altura útil entregada por la bomba teniendo en cuenta las velocidades del fluido en la succión y en la descarga además de la velocidad relativa del fluido (Mataix, 2009). Estas máquinas pueden agruparse según diversos conceptos, entre ellos, número y disposición de etapas, posición del eje y el tipo de accionamiento. Sin embargo, la característica que es más utilizada para describirlas es la dirección del flujo a la salida del impulsor, siendo

clasificadas en bombas centrífugas o radiales, bombas axiales y bombas de flujo mixto. (De las Heras, 2011)

Figura 2.

Esquema de los tipos de bombas



Fuente: Elaboración propia

2.3. Bomba Centrífuga

La bomba centrífuga es una de las bombas más usadas según (Cano, 2003). Las hay con caudales desde 1 L/min hasta 10^6 (L/min), con alturas desde algunos metros hasta centenas de metros. El funcionamiento de la bomba centrífuga consiste en la entrada del fluido de forma axial por la tubería de aspiración hasta llegar al centro del impulsor, este genera un cambio brusco en la dirección del flujo pasando a radial o axial según la bomba. Los álabes proyectan las partículas del fluido hacia la voluta debido a la fuerza centrífuga. En la voluta, parte de la energía cinética se transforma en energía de presión y el fluido es expulsado por la tubería de impulsión. (Dominguez, 2020)

2.3.1. Partes de una bomba centrífuga

A continuación, se describen las partes y/o componentes presentes en una bomba centrífuga, las cuales se muestran en la Figura 4

1. Tubería de aspiración (Entrada)

La tubería de aspiración se encuentra en la entrada de la bomba, es la cual permite el ingreso del fluido a la voluta mediante succión. (Lema Jami & Laurencio Alfonso, 2022)

2. Voluta

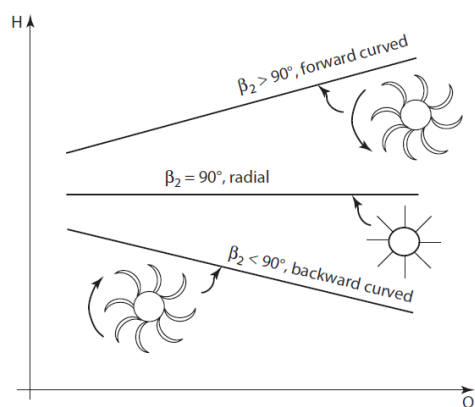
La voluta o carcasa, es una parte fija de la bomba, su objetivo es cambiar el sentido del fluido que sale del impulsor a alta velocidad para dirigirlo hacia la tubería de descarga de la bomba. (Lema Jami & Laurencio Alfonso, 2022)

3. Impulsor o rodete

El impulsor se conforma por un conjunto de álabes que pueden tomar distintas formas, entre ellas los álabes pueden ser rectos a 90° , con un ángulo mayor a 90° y con un ángulo menor a 90° , este es impulsado mediante la conexión al eje de un motor siendo la parte móvil principal de la bomba. El líquido entra en forma axial al impulsor mediante la tubería de aspiración, mediante la acción centrífuga el fluido cambia su dirección volviéndose radial. Los álabes son los encargados de dirigir el fluido a alta velocidad para dirigirlo hacia la voluta y con ella hacia la descarga de la bomba. (Lema Jami & Laurencio Alfonso, 2022)

Figura 3

Comportamiento de la curva de la bomba según la disposición de los álabes



Nota: Extraído de (Murty, 2018)

4. Tubería de impulsión (Salida)

La tubería de impulsión es por donde el fluido sale del interior de la bomba luego de haber adquirido una fuerza centrífuga al interior de la voluta. (Lema Jami & Laurencio Alfonso, 2022)

5. Eje

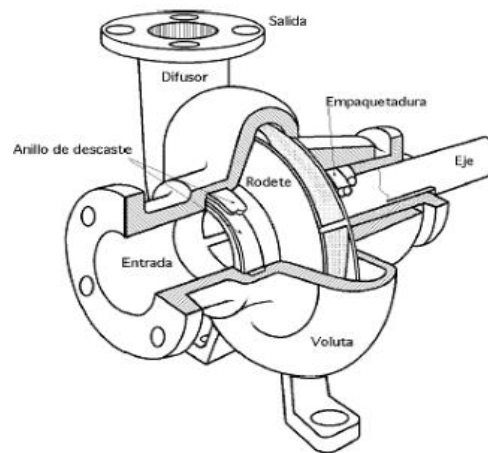
El eje es una barra de sección transversal circular, no uniforme, la cual va fija al impulsor y transmite la fuerza desde el motor hacia la bomba. El eje puede estar en posición horizontal o vertical según el tipo de bomba. (Dominguez, 2020)

6. Difusor

El difusor, en conjunto con el impulsor se encuentran al interior de la voluta, el difusor está conformado por álabes fijos divergentes. Cuando aumenta la sección de la voluta, la velocidad del agua se reduce y el difusor ayuda a transformar la energía cinética en energía de presión. (Dominguez, 2020)

Figura 4.

Diagrama esquemático de una bomba centrífuga



Nota: Extraído de (Lema Jami & Laurencio Alfonso, 2022)

2.3.2 Leyes de afinidad

El comportamiento de las bombas centrífugas puede ser representado por sus curvas características, estas son representaciones gráficas donde se representa la carga o altura, el flujo, la potencia y la eficiencia de la bomba. Entre las curvas más representativas se encuentra la curva caudal-altura (Q-H) que representa la altura que la bomba genera en relación con el caudal, cuando el caudal es máximo la carga es mínima, en el caso de que el caudal sea nulo la carga es máxima. Las leyes de afinidad muestran que bombas con características similares poseen curvas características que se comportan de la misma manera. Estas representan la relación entre el caudal, la potencia y la carga con la velocidad de giro del impulsor. (Tolentino, Huerta, & Torres, 2020)

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad (1)$$

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^2 \quad (2)$$

$$\frac{P_1}{P_2} = \left(\frac{N_1}{N_2} \right)^3 \quad (3)$$

Para el caso de las ecuaciones 1, 2 y 3, Q representa el caudal, N la velocidad de giro, H es la altura y P la potencia de la bomba.

2.4. Motor eléctrico

Un motor eléctrico es una máquina capaz de transformar la energía eléctrica en energía mecánica, esto lo hacen mediante la interacción de campos electromagnéticos. Entre los motores eléctricos están presentes los motores síncronos y los motores de inducción. Los motores de inducción se encuentran divididos entre motores monofásicos y motores trifásicos. (Chapman, 2012)

El estator es la parte fija del motor, en este se encuentra la capacidad magnética del motor, consta de polos magnéticos (imanes) y un embobinado de alambres de cobre. Este tiene la capacidad de generar la rotación en el rotor, esto debido a que en el bobinado circula corriente eléctrica, generando así un campo magnético, los imanes del estator con el rotor se encuentran en repulsión lo que genera el movimiento circular del rotor expresado físicamente como el torque. (PEER, 2019)

En el motor eléctrico, el rotor es el componente que gira a gran velocidad debido a la acción de los campos magnéticos que se generan en el motor, su velocidad de giro se mide en rpm y está relacionada de forma directa con el número de polos del estator, el rotor se asienta en los rodamientos presentes en el motor. El espacio presente entre el rotor y el estator se denomina entrehierro y no varía su dimensión. El par de arranque es el torque que el motor realiza al momento de partir para romper las condiciones iniciales de inercia y así dar inicio a la operación. (PEER, 2019)

2.4.1. Motor eléctrico monofásico

Los motores eléctricos monofásicos constan de un juego simple de bobinas en el estator. En cuanto a su rotor, posee similitudes con el motor de inducción trifásico, a diferencia de que este posee una única fase o línea de corriente, debido a esto, el motor eléctrico monofásico no presenta un campo magnético giratorio, sino, más bien, un campo magnético oscilante el cual se agranda y se reduce manteniendo una única dirección. Como consecuencia, el motor eléctrico monofásico no cuenta

con un par de arranque, es por ello que debe contener un sistema de arranque, por ejemplo, el uso de un variador de frecuencia. Las aplicaciones más frecuentes de motores monofásicos constan en el uso de electrodomésticos y herramientas manuales, entre ellos ventiladores, lavadoras, batidoras, máquinas de coser, etc. (Chapman, 2012)

2.4.2. Motor eléctrico trifásico

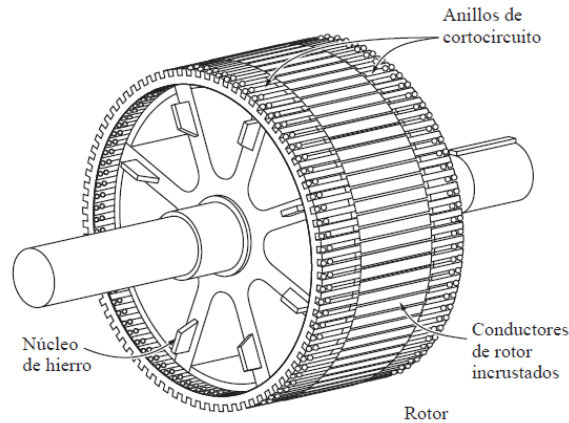
El funcionamiento de los motores trifásicos se basa en el principio de Faraday, las bobinas que conforman el estator, al ser energizadas generan un campo magnético rotatorio que inducirá una corriente al rotor generando un movimiento rotatorio. Los motores trifásicos son de los más utilizados en el sector industrial, esto por su alta resistencia y baja necesidad de mantenimiento. Las aplicaciones varían según la potencia y tamaño, por lo general se da en actividades industriales como el accionamiento de bombas centrífugas, grúas, correas transportadoras, etc. (Aguirre Ramos & Gonzalez Garcias, 2022)

2.4.3. Motor tipo jaula de ardilla

El motor jaula de ardilla, es un motor de inducción en el cual los conductores del rotor que son una serie de barras presentes en las ranuras del rotor teniendo sus extremos cortocircuitados mediante anillos de cortocircuito, fabricados en aluminio fundido a baja presión para baja y mediana potencia, y en cobre o latón para altas potencias (Pacheco-Chica & Santos-Moreira, 2020). Este tipo de motor lleva su nombre debido a la forma en la cual están dispuestos sus conductores, estos tienen similitud a las ruedas de ejercicio donde corren los hámster o ardillas. La forma moderna del motor de inducción fue entre 1888 y 1895, en ese periodo fueron desarrolladas las fuentes de potencia bifásicas y trifásicas produciendo con esto campos magnéticos giratorios dentro del motor. El desarrollo de los devanados distribuidos en el estator produjo el desarrollo del rotor jaula de ardilla el cual desde ese periodo hasta principios de la década de 1970 ha presentado mejoras continuas en técnicas de fundición, calidad del acero, aislamiento y técnicas de construcción. (Chapman, 2012)

Figura 5.

Rotor jaula de ardilla



Nota: Extraído de (Chapman, 2012)

2.5. Pérdida de carga

Uno de los elementos más importantes a la hora de analizar el flujo en tuberías es la caída de presión, esto debido a que está directamente relacionada con la potencia necesaria para que el ventilador o la bomba mantengan el flujo. En el caso de los fluidos, se utiliza ΔP para designar la caída de presión, si la caída es por efectos viscosos esta es irreversible. Cuando se analizan los sistemas de tuberías, las pérdidas de presión se expresan en términos de la altura de la columna del fluido en cuestión, llamada pérdida de carga siendo representada por h_L . La ecuación de la pérdida de carga se da a partir de la estática de fluidos, la cual dice que $\Delta P = \rho gh$, que también es representada por la ecuación 4. Es por ello que la pérdida de carga se obtiene cuando se divide la pérdida de presión en ρg obteniendo así la ecuación 5 (Cengel & Cimbala, 2020):

$$\Delta P = f \frac{L}{D} \frac{\rho V_{prom}^2}{2} \quad (4)$$

$$h_L = f \frac{L}{D} \frac{V_{prom}^2}{2g} \quad (5)$$

En la cual f es el factor de fricción de Darcy, L es el largo de la tubería, D es su diámetro, V_{prom} es la velocidad promedio del flujo, ρ es la densidad del fluido y g es la aceleración de gravedad.

2.5.1. Diagrama de Moody y ecuación de Colebrook

Con los datos disponibles de flujo en transición y turbulento en tuberías tanto rugosas como lisas, en 1939, Cyril F. Colebrook, combinó los datos y entregó la siguiente relación implícita que hoy se conoce como la ecuación de Colebrook:

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2.0 \log \left(\frac{\varepsilon/D}{3.7} + \frac{2.51}{Re \sqrt{f}} \right) \quad (6)$$

En la cual ε/D es la rugosidad relativa, $\log$ es el logaritmo en base 10 y Re es el número de Reynolds.

En 1492, Hunter Rouse, ingeniero estadounidense, realizó la verificación de la ecuación de Colebrook e hizo una expresión gráfica de f como función de Re y el producto de $Re \sqrt{f}$. Dos años después de eso, Lewis F. Moody hizo una modificación en el diagrama de Rouse, transformándolo en la forma en que se conoce en la actualidad. El diagrama de Moody (anexo 2), representa el factor de fricción de Darcy como función del número de Reynolds y la rugosidad relativa. Originalmente el diagrama fue concebido para tuberías circulares, sin embargo, este puede ser utilizado en tuberías no circulares sustituyendo D por el diámetro hidráulico definido por la ecuación (6). (Cengel & Cimbala, 2020)

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \quad (7)$$

Donde D_h es el diámetro hidráulico, A_c es el área de la sección transversal de la tubería y P su perímetro mojado. (Cengel & Cimbala, 2020)

2.5.2. Factor de fricción de Darcy-Weisbach

El factor de fricción en tuberías circulares de un flujo turbulento totalmente desarrollado depende del número de Reynolds, de la rugosidad relativa, la cual es la razón de la altura media de rugosidad de la tubería (ε) dividido en su diámetro (D). Existen números obtenidos de la relación de la rugosidad relativa, los resultados se obtienen en base a experimentación, esto debido a que esta relación no se puede obtener a partir de un análisis teórico. Parte de los experimentos fueron

realizados en 1933 por J. Nikuradse, utilizando una superficie rugosa hecha de forma artificial con el uso de granos de arena de tamaño conocido. (Cengel & Cimbala, 2020)

2.5.3. Número de Reynolds

Osborne Reynolds descubrió que existe una relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas del fluido las cuales dominan el régimen del fluido que se comporta entre flujo laminar y flujo turbulento, a esto se le llamó el Numero de Reynolds para el flujo en tuberías circulares como:

$$Re = \frac{\text{Fuerzas_inerciales}}{\text{Fuerzas_viscosas}} = \frac{V_{prom} D}{\nu} = \frac{\rho V_{prom} D}{\mu} \quad (8)$$

En donde V_{prom} es la velocidad de flujo promedio (m/s), D es el diámetro de la tubería (interno) en metros, ν es la viscosidad cinemática del fluido, μ es la viscosidad dinámica del fluido y ρ es la densidad del fluido. Para los casos en que el número de Reynolds es grande (mayor a 2300), las fuerzas inerciales son grandes en comparación a las fuerzas viscosas, por lo cual las fuerzas viscosas no pueden evitar alteraciones rápidas y aleatorias en el fluido, en cambio, a números de Reynolds pequeños (menor a 2300), las fuerzas viscosas pueden suprimir estas fluctuaciones y tener al fluido “en línea”. Esta es la diferencia entre el flujo turbulento y el flujo laminar respectivamente. (Cengel & Cimbala, 2020)

El número de Reynolds al cual el flujo cambia de régimen se conoce como número de Reynolds crítico. Para el caso específico de tuberías, el valor generalmente aceptado para número de Reynolds crítico es $Re_{cr} = 2300$. (Cengel & Cimbala, 2020)

2.6. Instrumentación

La instrumentación presente en el banco experimental consta principalmente de válvulas, entre ellas válvulas de bola, válvulas de compuerta y válvulas check, además cuenta con dos tipos de caudalímetros de turbina, uno análogo y otro digital, y con la presencia de 2 manovacuómetros de bourdon.

2.6.1. Válvulas

Válvula de Bola

La válvula de bola es un tipo de válvula que posee un elemento con forma esférica en su interior el cual regula la circulación del líquido, es una de las válvulas más utilizadas en la industria por su manejo sencillo y de cierre rápido. Las posiciones más frecuentes son las de apertura y cierre total. No es recomendable utilizarlas parcialmente abiertas, ya que, con la presión del fluido se genera desgaste y esto puede generar fugas. Una de las desventajas de este tipo de válvulas es que su manejo rápido (cierre) produce golpes de ariete los cuales son una variación de la presión generado

por un cambio repentino en la velocidad del fluido transportado, es por ello que se deben tomar precauciones previo a su instalación. (Daza Salinas, 2019)

Válvula de Compuerta

La válvula de compuerta está compuesta por un cuerpo totalmente cerrado el cual en su interior posee un elemento de forma rectangular o circular, el cual se mueve en dirección perpendicular al flujo actuando como una puerta. Es utilizada en sectores donde se requiera interrumpir la circulación del flujo generando poca caída de presión. En el momento en que la válvula se encuentra completamente abierta, se eleva por completo la compuerta por encima del conducto de flujo, el cual pasa en línea recta por el conducto el cual por lo general posee el mismo diámetro que la tubería. (Cruz Rangel, 2009)

Válvula de retención (check)

Es un tipo de válvula integral, su función principal es impedir la inversión de la dirección del flujo en una tubería. La presión del fluido abre la válvula, y la fuerza del mecanismo de retención más cualquier inversión en el sentido del flujo hacen que esta se cierre. Los componentes de cierre de la válvula pueden estar en constante movimiento en el caso de que la fuerza del flujo no sea suficiente para mantenerlas en una posición estable. Existen dos tipos de válvula check, la de bisagra y la de retención horizontal, su selección depende de la aplicación, puesto que se necesita información de temperatura, caída de presión y composición o limpieza del fluido. (Cruz Rangel, 2009)

Medidores de flujo volumétrico

El medidor de flujo es el aparato destinado a registrar el paso del fluido correspondiente a la conexión de tubería en la cual está inserto el mismo. Esto se da con el fin de conocer la cantidad de fluido entregada por el sistema. Entre los medidores de flujo volumétrico se encuentra el medidor de turbina, siendo de los más utilizados el de tipo Woltman. Los medidores de turbina basan su funcionamiento en la inserción de una rueda de paletas al interior del medidor por el cual pasa el flujo, de esta forma, cada giro en la rueda representa un volumen de agua determinado que se va acumulando en el medidor. Los medidores de turbina pueden presentarse tanto en formato analógico como digital. (Hansen Rodriguez, 2001)

Medidores de presión manométrica

Manómetro

El manómetro es un instrumento ampliamente utilizado para realizar mediciones de presión positiva en recipientes cerrados que contengan gases o líquidos, existen manómetros de tipo

abierto los cuales sirven para medir presiones manométricas o relativas, y los manómetros de tipo diferencial, los cuales miden diferencias de presión entre un sistema y/o sección de otro. (Carriel Montoya & Villacís Vargas, 2015)

Vacuómetro

A diferencia del manómetro, el vacuómetro está destinado a medir presiones por debajo de la presión atmosférica, también llamadas presiones de vacío. La medición del vacuómetro es útil a la hora de detectar caídas de presión en el sistema. Su uso está principalmente ligado a la industria y al campo de la investigación técnica y científica. (Carriel Montoya & Villacís Vargas, 2015)

Manovacuómetro

El manovacuómetro posee la ventaja de ser capaz de cuantificar tanto presiones positivas como negativas en su visualizador, la aguja que indica la presión en el manovacuómetro, a diferencia del manómetro y el vacuómetro, no parte en los extremos de este instrumento, sino más bien en la mitad, su principio de funcionamiento es el mismo que poseen los instrumentos anteriormente mencionados. (Carriel Montoya & Villacís Vargas, 2015)

Variador de frecuencia

Cuando se tiene una máquina (motor) en la cual la velocidad de giro depende de la frecuencia, cuando esta se modifica, la velocidad del motor también cambia. Los variadores de frecuencia son utilizados en múltiples aplicaciones de procesos industriales teniendo como ventaja el control que le pueden otorgar a los procesos. El modo de manejo de un variador de frecuencia puede ser de tipo manual o automático según las necesidades, estos pueden ser manejados por señales digitales, ordenador, PLC, etc. Existen proveedores los cuales ofrecen protecciones para el motor como protecciones contra temperatura, sobre intensidad, desequilibrios y defectos a tierra, además de poseer un arranque y frenado suave del motor. (Valencia Vargas & López Ati, 2014)

Principio de funcionamiento de un variador de frecuencia

En la entrada del variador, el convertidor de entrada transforma la corriente alterna en corriente continua, la cual es necesaria para los transistores de potencia controlados electrónicamente. El enlace de DC es la fuente de potencia del inversor de salida. Cuando se cuenta con un variador de frecuencia de potencia considerable, este posee un banco de condensadores que almacenan carga eléctrica de la entrada. El inversor de salida proporciona una tensión y frecuencia variable en AC, las cuales se varían de forma simultánea para obtener un par constante de velocidad variable, o también, se varían en una proporción distinta y con ello se obtiene un par variable a diferentes velocidades. (Valencia Vargas & López Ati, 2014)

3. Diseño y Construcción del aparato experimental

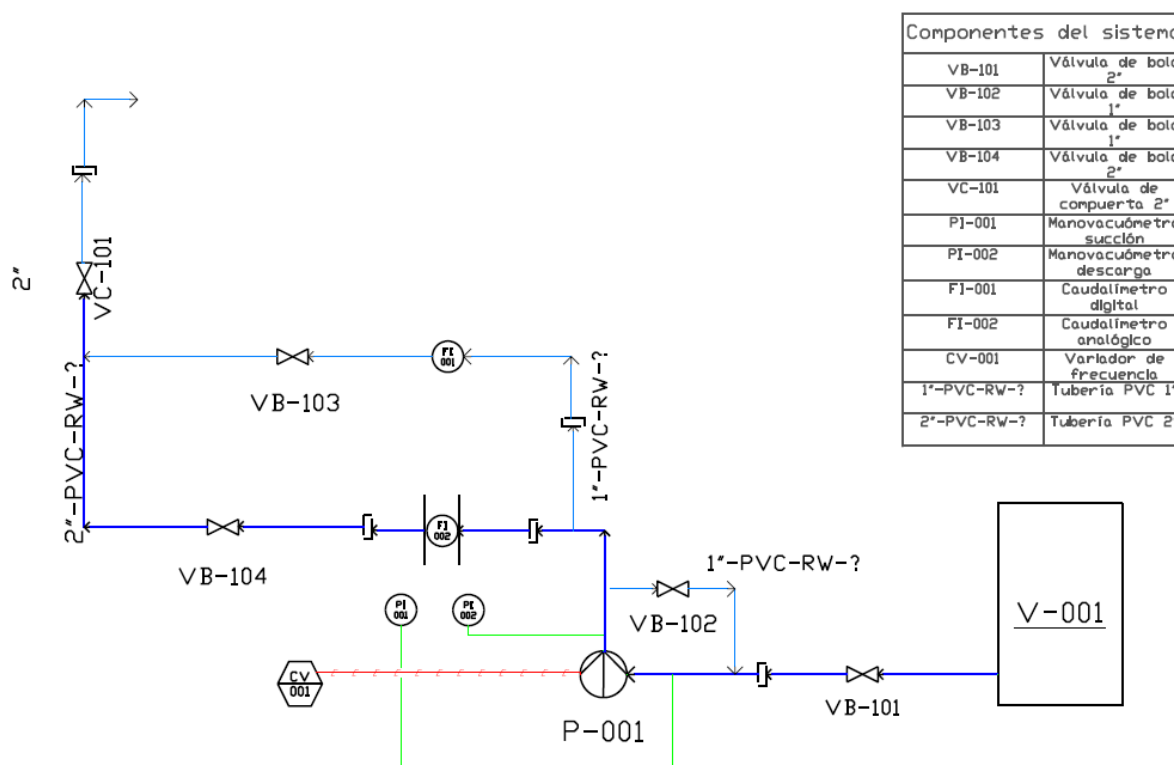
A continuación, se presenta parte de lo que fue el diseño del equipamiento de bombeo, sus componentes principales entre los cuales se presenta una bomba centrífuga trifásica con potencia de 1Hp, y los pasos para su construcción y montaje.

3.1. Diseño del aparato experimental de bombeo

A continuación, se presenta la Figura 6 la cual representa un esquema del equipamiento de bombeo presentando su distribución y componentes.

Figura 6.

Diseño de aparato experimental



Nota: Elaboración propia

3.2. Proceso constructivo.

Para construir el equipamiento de bombeo se llevó a cabo la revisión de componentes necesarios, entre los principales elementos se encontró una bomba centrífuga la cual cuenta con un motor eléctrico trifásico con potencia de 1HP, un variador de frecuencia, caudalímetros, estanque y tuberías, además de instrumentos de medición y demás. A continuación, en la Tabla 2 se encuentra la cotización de los principales elementos presentes en el equipamiento de bombeo.

3.2.1. Costos del proyecto

Tabla 1

Cotización de elementos principales del equipamiento de bombeo

Ítem	Precio unitario (CLP)	Cantidad	Precio total (CLP)	Precio total (UF)
Bomba centrífuga	260360	1	260360	7,13
Caudalímetro analógico	130290	1	130290	3,57
Caudalímetro digital	35990	1	35990	0,99
Estanque	55000	1	55000	1,51
Tubería 1"	4800	1	4800	0,13
Tubería 2"	10080	1	10080	0,28
Variador de frecuencia	190000	1	190000	5,21

Nota: la tabla completa con todos los componentes y la descripción se encuentra en el anexo 1.

3.2.2. Bitácora de construcción

La conexión de la bomba se llevó a cabo utilizando terminales con hilo externo, los cuales fueron adheridos a la tubería mediante adhesivo PVC (HE-CEM). La conexión entre la bomba P-001 y el estanque de agua V-001 se realizó mediante un segmento de tubería de 2". Este segmento cuenta con una válvula de bola VB-101 y una unión americana que facilita el desmontaje y traslado del estanque pues permite la separación del estanque con el sistema.

La válvula de compuerta VC-101 y el caudalímetro FI-001 fueron conectados mediante terminales con hilo interno y adhesivo PVC (HI-CEM). La conexión del caudalímetro FI-002 se efectuó mediante bridas apernadas y pegadas a la tubería con adhesivo PVC.

Durante el proceso constructivo, se instalaron 3 uniones americanas de 2" y dos de 1". Las uniones de 2" se ubicaron después de la válvula de bola VB-101, y en la entrada y salida del caudalímetro FI-002. Las uniones de 1" se colocaron antes del caudalímetro FI-001 y después de la válvula VC-101, permitiendo un giro de 360 grados para la conexión de cualquier equipo.

El estanque V-001 y el caudalímetro FI-002 se asentaron sobre bases de madera, mientras que la bomba se fijó mediante pernos a otra base de madera. Esto garantiza la estabilidad y seguridad en la operación.

Para medir la presión en la succión y descarga de la bomba, se diseñaron abrazaderas impresas en 3D utilizando material PETG. Estas abrazaderas permiten la inserción de manómetros para una medición precisa.

Nota: En el sistema se emplearon reducciones cortas y largas para adaptar las tuberías según las necesidades del sistema. Además, se utilizaron tees y codos para realizar las conexiones y reducir el espacio utilizado.

Figura 7.

Equipamiento de bombeo ensamblado



Nota: Elaboración propia

3.3. Mejoras al equipamiento de bombeo

Debido a la disponibilidad de tiempo, hay mejoras evidentes en el equipo que no se pudieron llevar a cabo. Una de las principales fue la instalación de 2 uniones americanas tanto en la succión como en la descarga de la bomba para facilitar su desmontaje para traslado, cambio y/o reemplazo. Además, no se realizó un soporte fijo para el variador de frecuencia y los manómetros fueron fijados al soporte del caudalímetro de 2" mediante soportes realizados en impresión 3D.

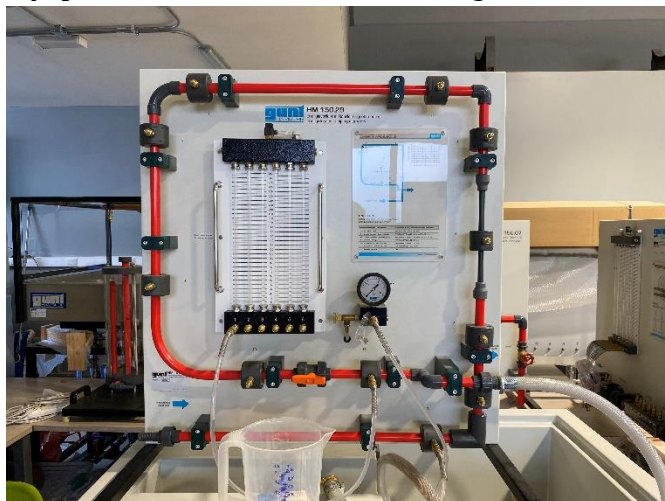
Otra de las mejoras significativas es realizar el cambio del caudalímetro de 2", esto debido a que sus mediciones son imprecisas, enviando únicamente un pulso cada 100 litros.

4. Validación del equipamiento de bombeo

Para realizar la validación del equipamiento se realizaron 4 experimentos, para dos de ellos se utilizó el instrumento "HM150.29 Pérdida de energía en elementos de tuberías" en el cual se encuentran varios elementos de tuberías con diferentes resistencias al flujo, entre ellas contracciones y expansiones, codos y válvulas. Cuenta con un manómetro de tubos y un manómetro de aguja el cual será usado para los experimentos. El manómetro de aguja será conectado a la cámara anular de la entrada para ver la presión con la cual llega el flujo al sistema desde el equipamiento de bombeo.

Figura 8

Equipo "HM150.29 Pérdida de energía en elementos de tuberías"



4.1. Variación en la velocidad de giro del impulsor de la bomba con "HM150.29"

El experimento de variación de velocidad de giro tiene por objetivo determinar la curva del sistema alimentando a una sección de ensayo, en este caso al equipo "HM150.29", para esto el experimento se realiza utilizando el variador de frecuencia iniciando en 50 Hz y disminuyendo en pasos de 2 Hz hasta que cese el flujo volumétrico, registrar los valores en la succión y descarga de la bomba, y en la entrada del equipo "HM150.29". Cabe destacar que este es el ensayo más importante hecho con el aparato experimental, pues determina directamente si el equipo tiene la capacidad de abastecer secciones de ensayo de forma satisfactoria o no.

Ejecución del ensayo

- 1) Llenar el estanque del sistema con agua potable.
- 2) Realizar el cebado de la bomba con ayuda de una llave francesa aflojando el tornillo presente en la parte superior de la voluta hasta que comience a salir agua.
- 3) Asegurarse de que las válvulas VB-102, VB-103, VB-104 y VC-101 estén completamente cerradas.
- 4) Iniciar la operación de la bomba a una frecuencia de 50 Hz con la tecla “Run”.
- 5) Abrir lentamente la válvula VB-103 hasta que esté completamente abierta.
- 6) Abrir la válvula VC-101 lentamente para evitar el golpe de ariete hasta que la válvula se encuentre completamente abierta.
- 7) En una tabla registrar los datos de la frecuencia, la presión de succión y descarga de la bomba, la presión en la entrada del equipo “HM150.29” y el flujo volumétrico.
- 8) Realizar una disminución en la frecuencia de 2 Hz y registrar los datos como se indica en el punto 6.
- 9) Repetir el paso 7 hasta que el registro del flujo volumétrico sea cero.

Tabla 2

Toma de datos del experimento Variación en la velocidad de giro del impulsor de la bomba

Frecuencia (Hz)	Presión en la succión de la bomba (bar)	Presión en la descarga de la bomba (bar)	Presión HM150.29 (bar)	Caudal (L/min)	$\Delta P1$	$\Delta P2$
50	0	1,55	1,1	43,6	1,55	1,1
48	0	1,45	1,02	42	1,45	1,02
46	0	1,34	0,94	40,4	1,34	0,94
44	0	1,21	0,8	38,5	1,21	0,8
42	0	1,1	0,76	36,5	1,1	0,76
40	0	1	0,7	34,9	1	0,7
38	0	0,93	0,62	32,9	0,93	0,62
36	0	0,81	0,55	31,3	0,81	0,55
34	0	0,75	0,49	29,3	0,75	0,49
32	0	0,65	0,43	27,3	0,65	0,43

Frecuencia (Hz)	Presión en la succión de la bomba (bar)	Presión en la descarga de la bomba (bar)	Presión HM150.29 (bar)	Caudal (L/min)	$\Delta P1$	$\Delta P2$
30	0	0,58	0,36	25,7	0,58	0,36
28	0	0,5	0,3	23,8	0,5	0,3
26	0	0,43	0,25	22,2	0,43	0,25
24	0	0,36	0,2	20,2	0,36	0,2
22	0	0,3	0,16	18,6	0,3	0,16
20	0	0,26	0,12	16,2	0,26	0,12
18	0	0,21	0,08	14,2	0,21	0,08
16	0	0,15	0,05	12,7	0,15	0,05
14	0	0,13	0	10,3	0,13	0
12	0	0,1	0	8,3	0,1	0
10	0	0,05	0	5,9	0,05	0
8	0	0,02	0	3,1	0,02	0
6	0	0	0	0	0	0

Fuente: Elaboración propia

4.2. Variación del sentido de giro del impulsor de la bomba

El experimento de variación de sentido de giro del impulsor tiene por objetivo determinar la curva del sistema con el impulsor girando en el sentido contrario alimentando a una sección de ensayo, en este caso al equipo “HM150.29”, para esto el experimento se realiza utilizando el variador de frecuencia iniciando en 50 Hz y disminuyendo en pasos de 2 Hz hasta que cese el flujo volumétrico, registrar los valores en la succión y descarga de la bomba, y en la entrada del equipo “HM150.29”. El procedimiento es igual al de Variación en la velocidad de giro del impulsor de la bomba con “HM150.29”.

Ejecución del ensayo

- 1) Llenar el estanque del sistema con agua potable.
- 2) Realizar el cebado de la bomba con ayuda de una llave francesa aflojando el tornillo presente en la parte superior de la voluta hasta que comience a salir agua.
- 3) Asegurarse de que las válvulas VB-102, VB-103, VB-104 y VC-101 estén completamente cerradas.
- 4) Iniciar la operación de la bomba en sentido inverso a una frecuencia de 50 Hz con la tecla "Run".
- 5) Abrir lentamente la válvula VB-103 hasta que esté completamente abierta.
- 6) Abrir la válvula VC-101 lentamente para evitar el golpe de ariete hasta que la válvula se encuentre completamente abierta.
- 7) En una tabla registrar los datos de la frecuencia, la presión de succión y descarga de la bomba, la presión en la entrada del equipo "HM150.29" y el flujo volumétrico.
- 8) Realizar una disminución en la frecuencia de 2 Hz y registrar los datos como se indica en el punto 7.
- 9) Repetir el paso 8 hasta que el registro del flujo volumétrico sea cero.

Tabla 3

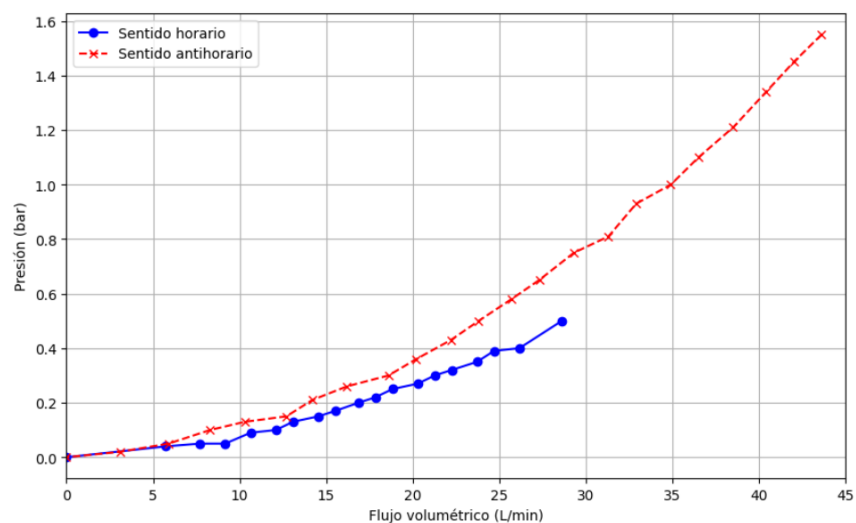
Toma de datos del experimento Variación del sentido de giro del impulsor

Frecuencia (Hz)	Presión en la succión de la bomba (bar)	Presión en la descarga de la bomba (bar)	Presión HM150.29 (bar)	Caudal (L/min)	$\Delta P1$	$\Delta P2$
50	0	0,5	0,27	23,4	0,5	0,27
48	0	0,4	0,25	21,4	0,4	0,25
46	0	0,39	0,22	20,2	0,39	0,22
44	0	0,35	0,19	19,4	0,35	0,19
42	0	0,32	0,17	18,2	0,32	0,17
40	0	0,3	0,15	17,4	0,3	0,15
38	0	0,27	0,13	16,6	0,27	0,13
36	0	0,25	0,11	15,4	0,25	0,11
34	0	0,22	0,09	14,6	0,22	0,09
32	0	0,2	0,08	13,8	0,2	0,08
30	0	0,17	0,06	12,7	0,17	0,06
28	0	0,15	0,05	11,9	0,15	0,05
26	0	0,13	0,02	10,7	0,13	0,02
24	0	0,1	0,01	9,9	0,1	0,01
22	0	0,09	0	8,7	0,09	0
20	0	0,05	0	7,5	0,05	0
18	0	0,05	0	6,3	0,05	0
16	0	0,04	0	4,7	0,04	0
14	0	0	0	0	0	0

A continuación, se presentan dos gráficas comparativas H-Q las cuales representan el comportamiento de la curva del sistema al variar el sentido de giro del impulsor, estas mediciones se realizaron en la descarga del sistema y en el ingreso al equipo “HM150.29”.

Figura 9.

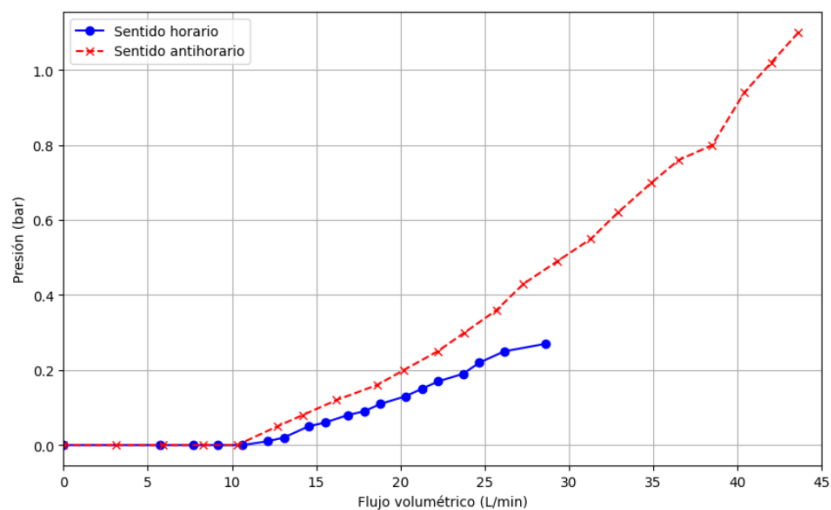
Gráfica comparativa H-Q en la descarga del sistema



Nota: Elaboración propia

Figura 10.

Gráfica comparativa H-Q en la entrada del equipo "HM150.29"



Nota: Elaboración propia

Los datos fueron tomados desde la tabla 2 y 3 haciendo la comparativa de los $\Delta P1$ y $\Delta P2$ en sentido horario y antihorario que representan la presión en la descarga del sistema. En la Figura 9 y Figura 10 se presentan las curvas del comportamiento del flujo del sistema, en la primera se toma la variación de presión desde la succión hasta la descarga de la bomba, y en la segunda la variación de presión desde la succión de la bomba hasta la entrada del equipo “HM150.29”. Se observa en ambos que, en el sentido antihorario, el sistema tiene la capacidad de entregar un caudal mayor en comparación con el sentido de giro horario. Otra de las observaciones a destacar es la pérdida de presión que hay entre la descarga del sistema y la entrada al equipo “HM150.29”. La pérdida de presión se debe principalmente a la reducción que existe entre la descarga y la entrada puesto que se realiza mediante una reducción que va de 1” a $\frac{3}{4}$ ”, considerando esto, el sistema alimenta al equipo con un caudal de 43,6 L/min y una presión de 1,1 bar.

Nota: Los experimentos fueron realizados únicamente para comparar el comportamiento del flujo, no usar la bomba en el sentido contrario al que fue diseñada puesto que puede generar daños en el equipo.

4.3. Curva de la bomba

El objetivo del experimento es registrar la curva característica de la bomba, esto se realiza con la operación de la bomba centrífuga a 50 Hz y mediante la estrangulación del flujo con la válvula de compuerta VC-101 ubicada en la descarga del sistema.

Ejecución del ensayo

- 1) Llenar el estanque del sistema con agua potable.
- 2) Realizar el cebado de la bomba con ayuda de una llave francesa aflojando el tornillo presente en la parte superior de la voluta hasta que comience a salir agua.
- 3) Asegurarse de que las válvulas VB-102, VB-103, VB-104 y VC-101 estén completamente cerradas.
- 4) Iniciar la operación de la bomba a una frecuencia de 50 Hz con la tecla “Run”.
- 5) Abrir lentamente la válvula VB-103 hasta que esté completamente abierta.
- 6) Abrir la válvula VC-101 lentamente para evitar el golpe de ariete hasta que la válvula se encuentre completamente abierta.
- 7) En una tabla registrar los datos de la frecuencia, la presión de succión y descarga de la bomba, y el flujo volumétrico.
- 8) Realizar una disminución del caudal con el cierre controlado de la válvula VC-101 (intentar no superar pasos de 10 L/min) y registrar los datos como se indica en el punto 7.
- 9) Repetir el paso 8 hasta que el registro del flujo volumétrico sea cero.

Tabla 4

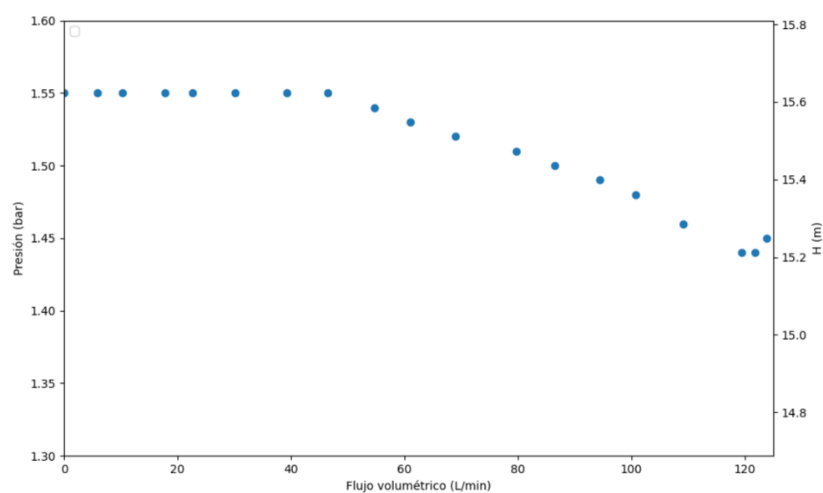
Toma de datos del experimento Curva de la bomba

Frecuencia (Hz)	Caudal (L/min)	Presión succión (bar)	Presión descarga (bar)	ΔP
50	123,8	0	1,45	1,45
50	121,8	0	1,44	1,44
50	119,4	0	1,44	1,44
50	109,1	0	1,46	1,46
50	100,8	0	1,48	1,48
50	94,4	0	1,49	1,49
50	86,5	0	1,5	1,5
50	79,7	0	1,51	1,51
50	69	0	1,52	1,52
50	61,1	0	1,53	1,53
50	54,7	0	1,54	1,54
50	46,4	0	1,55	1,55
50	39,2	0	1,55	1,55

Frecuencia (Hz)	Caudal (L/min)	Presión succión (bar)	Presión descarga (bar)	ΔP
50	30,1	0	1,55	1,55
50	22,6	0	1,55	1,55
50	17,8	0	1,55	1,55
50	10,3	0	1,55	1,55
mn50	5,9	0	1,55	1,55
50	0	0	1,55	1,55

Figura 11.

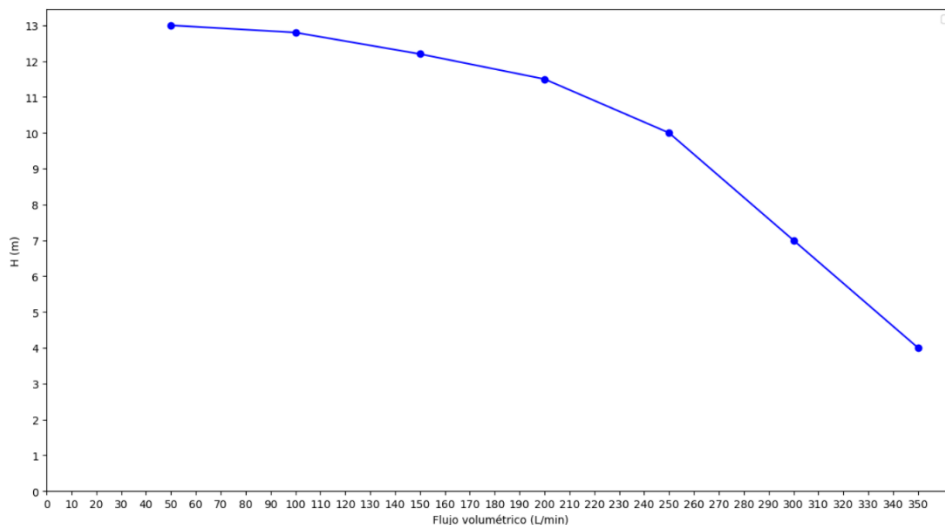
Gráfico H-Q del experimento curva de la bomba



Nota: La equivalencia de los ejes del grafico se obtiene de que 1 bar $\approx$ 10,2 metros de columna de agua.

Figura 12.

Curva de la bomba generada con los datos del fabricante



Nota: Los datos se encuentran en el anexo 4

La curva de la bomba del aparato experimental se puede apreciar con poca variación en cuanto a la presión, lo cual apreciado en una escala mayor (Figura 14) tiende a ser similar a una recta. Esto se genera debido a que la bomba centrífuga tiene una capacidad máxima de 350 L/min y el caudalímetro utilizado para los experimentos tiene una capacidad de medición de 120 L/min $\pm 1\%$ lo cual no permite que se pueda visibilizar la curvatura de la gráfica. Al acotar los segmentos, se puede apreciar la similitud entre la curva experimental y la curva teórica en las cuales se presentan variaciones de aproximadamente 0,4 metros de columna de agua. En cuanto a la presión, esta puede variar por factores como la densidad del agua, la cual en distintos lugares presenta pequeñas diferencias, y en el tipo de tubería que se utiliza en la experimentación. La bomba tanto en la succión como en la descarga presenta dimensiones de 2", en el caso del aparato experimental, se encuentran presentes tuberías de 1" y de 2".

4.4. Curva de la bomba con el sentido de giro opuesto

El objetivo del experimento es registrar la curva característica de la bomba con el sentido de giro opuesto, esto se realiza con la operación de la bomba centrífuga a 50 Hz y el variador de frecuencia en "Rev" y mediante la estrangulación del flujo con la válvula de compuerta VC-101 ubicada en la descarga del sistema.

Ejecución del ensayo

- 1) Llenar el estanque del sistema con agua potable.
- 2) Realizar el cebado de la bomba con ayuda de una llave francesa aflojando el tornillo presente en la parte superior de la voluta hasta que comience a salir agua.

- 3) Asegurarse de que las válvulas VB-102, VB-103, VB-104 y VC-101 estén completamente cerradas.
- 4) Iniciar la operación de la bomba con el sentido de giro opuesto a una frecuencia de 50 Hz con la tecla "Run".
- 5) Abrir lentamente la válvula VB-103 hasta que esté completamente abierta.
- 6) Abrir la válvula VC-101 lentamente para evitar el golpe de ariete hasta que la válvula se encuentre completamente abierta
- 7) En una tabla registrar los datos de la frecuencia, la presión de succión y descarga de la bomba, y el flujo volumétrico.
- 8) Realizar una disminución del caudal con el cierre controlado de la válvula VC-101 (intentar no superar pasos de 10 L/min) y registrar los datos como se indica en el punto 7
- 9) Repetir el paso 8 hasta que el registro del flujo volumétrico sea cero.

Tabla 5

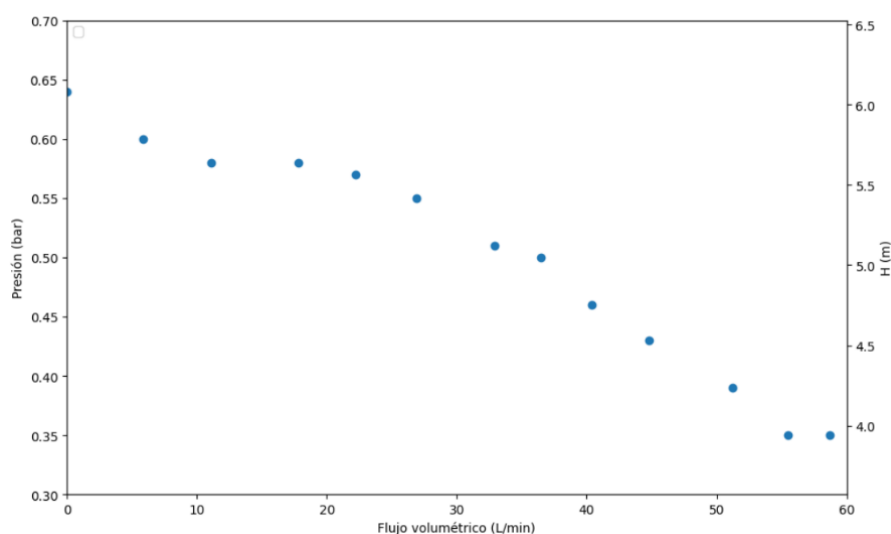
Toma de datos del experimento Curva de la bomba con el sentido de giro opuesto

Frecuencia (Hz)	Caudal (L/min)	Presión succión (bar)	Presión descarga (bar)	ΔP
50	58,7	0	0,35	0,35
50	55,5	0	0,35	0,35
50	51,2	0	0,39	0,39
50	44,8	0	0,43	0,43
50	40,4	0	0,46	0,46
50	36,5	0	0,5	0,5
50	32,9	0	0,51	0,51
50	26,9	0	0,55	0,55
50	22,2	0	0,57	0,57

Frecuencia (Hz)	Caudal (L/min)	Presión succión (bar)	Presión descarga (bar)	ΔP
50	17,8	0	0,58	0,58
50	11,1	0	0,58	0,58
50	5,9	0	0,6	0,6
50	0	0	0,64	0,64

Figura 13.

Gráfico H-Q del experimento curva de la bomba con el sentido de giro opuesto

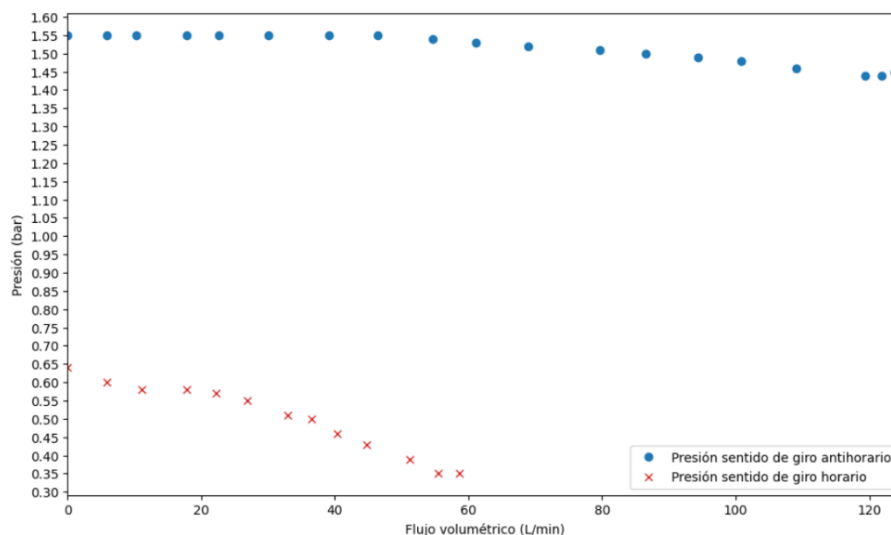


Nota: Elaboración propia

Para el caso de la curva generada en sentido horario, se puede apreciar una mayor concavidad, esto se debe a que la presión generada por la bomba es de una menor magnitud a la que se genera con el impulsor girando en sentido antihorario, es por ello que, al generar la curva con el cierre gradual de la válvula, se puede apreciar una variación mayor en la presión de aproximadamente 0,3 bar.

Figura 14.

Grafica comparativa curvas H-Q del equipamiento de bombeo



Nota: Elaboración propia

En la Figura 13 se puede apreciar la gran variación en la curva de la bomba, esta en su sentido de giro por defecto (antihorario) tiene la capacidad de bombear más de 120 L/min y obtiene una presión máxima de 1.55 bar, en comparación con el sentido horario que solo bombea cerca de 60 L/min con una presión máxima de 0.64 bar. Además de esto, se observa que la curva de la bomba presenta menor curvatura en el caso del sentido antihorario, esto se debe a que la bomba alcanza el máximo caudal en el caso del sentido de giro horario por lo cual puede apreciarse su curvatura a diferencia del sentido antihorario.

5. Puesta en marcha “HM283 Ensayos en una Bomba Centrífuga”

5.1. Descripción del equipamiento.

El equipo “HM283 Ensayos en una bomba centrífuga” es parte de la serie de equipos “Máquinas de la Energía del Fluido” de la marca *gunt*[®]. Su composición consta de una bomba centrífuga en la cual se pueden realizar variaciones en la velocidad y sentido de giro con una velocidad máxima de 3300 RPM. La bomba aspira agua desde el depósito de agua B1 y la bombea por tuberías a través del circuito. Utilizando la válvula presente en la descarga de la bomba V2 se puede ajustar la presión contra la que la bomba trabaja. Además, en la succión está presente la válvula V1 que permite ajustar la presión en el lado de aspiración. Con el cierre y/o apertura de las válvulas, se genera una relación directa con el caudal, el cual es medido con el sensor de flujo volumétrico FI-1 y la temperatura del flujo es determinada con el sensor de temperatura TI-1. Teniendo en cuenta estos valores, se realizan análisis del comportamiento de las presiones en la succión y descarga de la bomba, además del caudal que circula por la instalación. A continuación, las figuras 14 y 15 representan el equipo “HM283” con una fotografía tomada in situ y un esquema para describir los componentes del sistema respectivamente.

Figura 15.

Equipo “HM283 Ensayos en una Bomba Centrífuga”

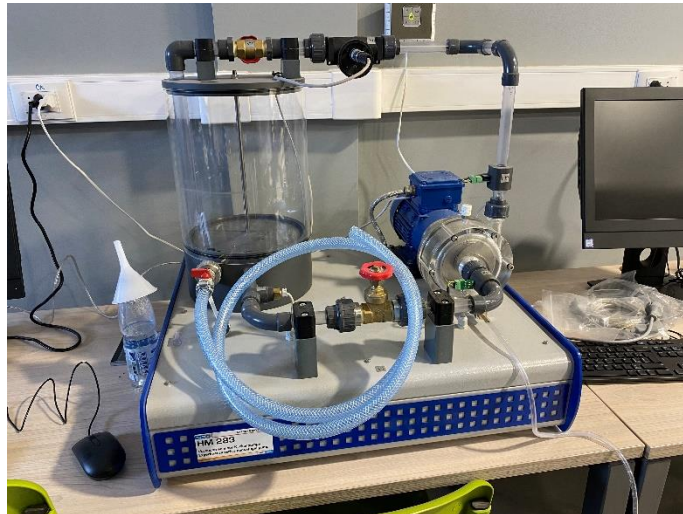
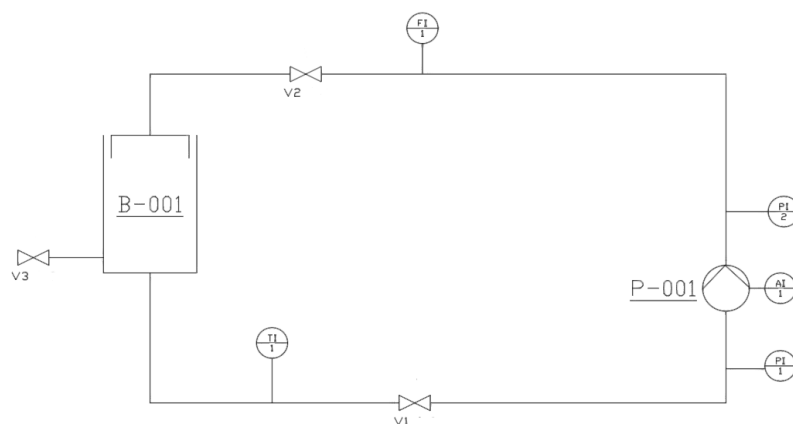


Figura 16.

Diagrama del equipo "HM283"



Nota: Elaboración propia

Tabla 6

Componentes del equipo "HM283"

Puntos de medición	Componentes
AI-1 Consumo de energía P_{el} de la bomba	B-001 Depósito de agua
FI-1 Flujo volumétrico $\dot{V}$	P-001 Bomba centrífuga
PI-1 Presión P_1 antes de la bomba	V1 Válvula para estrangular el lado de aspiración
PI-2 Presión P_2 después de la bomba	V2 Válvula para estrangular el lado de presión
TI-1 Temperatura del agua	V3 Válvula de salida

5.2. Puesta en marcha del equipo “HM283”

Para operar el equipo, instalar el equipo sobre una mesa en una sala cerrada, libre de polvo y humedad debido a que pueden generar contaminación y daños en el equipo. Previo a la operación, instalar el programa de adquisición de datos de medición en un ordenador, el programa viene incluido en el CD-ROM entregado por *gunt*®. Al poner en marcha el equipo considerar los riesgos presentes, principalmente el contacto con energías peligrosas como energía eléctrica e hidráulica. Instalado el programa, llenar el estanque B1 con agua potable hasta cubrir la tubería de retorno del sistema, además pueden añadirse alguicidas, abrir las válvulas V1 y V2, y con ayuda de la válvula de desaireación ubicada en la parte superior de la voluta de color blanco, cebar la bomba, esto se realiza abriendo la válvula hasta que se presenten gotas de agua, luego volver a cerrar la válvula de desaireación. Conectar el equipo a la red eléctrica y encender mediante el interruptor ubicado en la parte posterior de la carcasa, encender el ordenador e iniciar el software de adquisición de datos, en el software, presionar la tecla “Tara” para realizar la puesta en cero del equipo, se enciende la desde el equipo en sentido antihorario u horario y se comprueba el funcionamiento de cada uno de los componentes del sistema (Válvulas, medidores de flujo, sensor de temperatura, sensores de presión, bomba y estanque). Finalmente, se apaga la bomba presionando la tecla “Stop”, se conmuta el interruptor principal a “0” y se desconecta el equipo de la red eléctrica.

Nota: La puesta en marcha del equipo presente en esta tesis fue guiada por el manual de experimentos “HM283 Ensayos en una Bomba Centrífuga” de *gunt*®.

Figura 17.

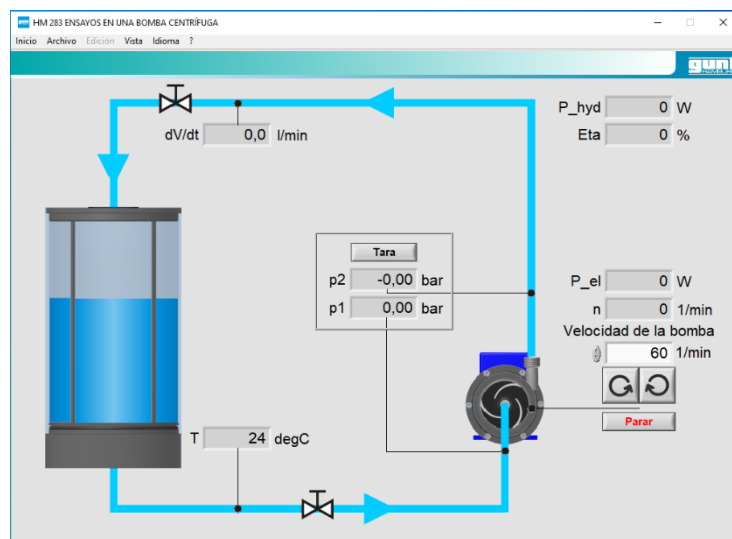
Válvula de desaireación



Nota: Elaboración propia

Figura 18.

Pantalla principal del programa de adquisición de datos



5.3. Ensayo N°1: Determinación de la curva característica de la bomba

El objetivo del ensayo N°1 es la generación de una o más curvas características de la bomba, esto se hace mediante la influencia de la válvula V2 sobre el flujo, la cual permite accionar la bomba con distintas resistencias por parte de la instalación al flujo generadas por el cierre gradual de la válvula V2, y con ello, trazar la relación de diferencia de presión en función de la bomba y del flujo volumétrico

Ejecución del ensayo

Al momento de registrar la curva característica de la bomba se deben seguir los siguientes pasos.

- 1) Mediante el uso de la válvula de desaireación, realizar el cebado de la bomba verificando que no queden burbujas de aire en la voluta.
- 2) Asegurarse de que la válvula V2 esté completamente abierta
- 3) Realizar la puesta en cero de los parámetros con la tecla “Tara”
- 4) Poner en marcha la bomba a una velocidad $n = 3300 \text{ Rev/min}$
- 5) Registrar los valores mostrados en una tabla de la presión de aspiración p_1 , la presión de salida de la bomba p_2 , la potencia hidráulica y eléctrica P_{hyd} , P_{el} , el rendimiento η_{ha} , así como el flujo volumétrico V

- 6) Reducir el flujo volumétrico de forma controlada (Pasos de entre 1 y 3 L/min) con el cierre gradual de la válvula V2, luego volver a registrar los valores de medición como se indica en el punto 5.
- 7) Repetir los pasos 5 y 6 hasta la estrangulación total del flujo. (Es posible registrar otras curvas de la bomba con diferentes números de revoluciones). (gunt, 2019)

Tabla 7

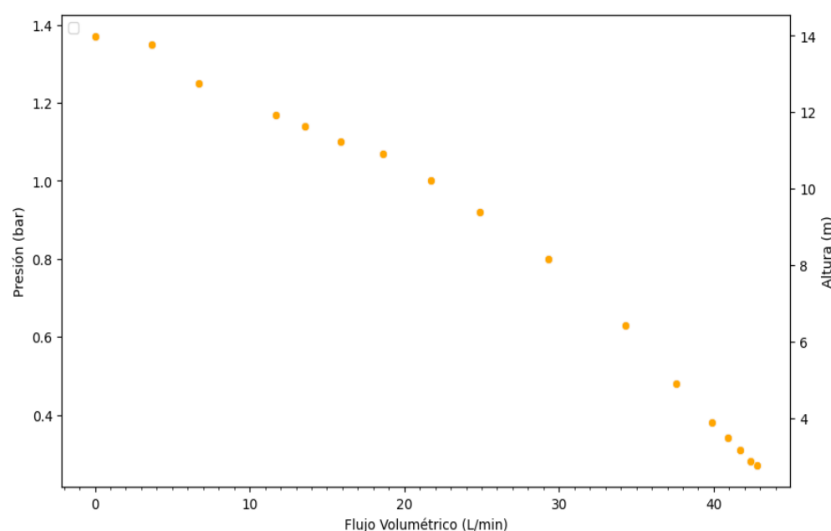
Toma de datos del ensayo práctico N°1 Determinación de la curva característica de la bomba realizado en el módulo "HM283"

Número de revoluciones bomba P1 (L/min)	Flujo volumétrico (L/min)	Presión P1 (bar)	Presión P2 (bar)	Potencia hidráulica (w)	Potencia eléctrica (w)	Rendimiento (%)	ΔP	Altura (m)
3300	42,8	-0,15	0,12	20	320	6	0,27	2,754
3300	42,4	-0,16	0,12	19	312	6	0,28	2,856
3300	41,7	-0,15	0,16	22	310	7	0,31	3,162
3300	40,9	-0,14	0,2	23	309	8	0,34	3,468
3300	39,9	-0,14	0,24	25	340	8	0,38	3,876
3300	37,6	-0,12	0,36	30	314	10	0,48	4,896
3300	34,3	-0,11	0,52	35	300	12	0,63	6,426
3300	29,3	-0,08	0,72	39	289	13	0,8	8,16
3300	24,9	-0,05	0,87	38	278	14	0,92	9,384
3300	21,7	-0,05	0,95	36	270	13	1	10,2
3300	18,6	-0,03	1,04	32	263	12	1,07	10,914
3300	15,9	-0,02	1,08	30	258	11	1,1	11,22
3300	13,6	-0,02	1,12	26	253	10	1,14	11,628
3300	11,7	-0,01	1,16	23	248	9	1,17	11,934
3300	6,7	-0,01	1,24	14	235	6	1,25	12,75
3300	3,7	0	1,35	9	231	4	1,35	13,77
3300	0	0	1,37	0	220	0	1,37	13,974

En la Figura 19 se muestra la curva característica de la bomba presente en el módulo de ensayos “HM283” generada a 3300 R.P.M con un caudal máximo de 42,8 (L/min).

Figura 19.

Gráfico H-Q ensayo N°1 Curva de la bomba



Nota: Elaboración propia

5.4. Ensayo N°2: Comportamiento del servicio al cambiar el número de revoluciones

El objetivo del ensayo N°2, es demostrar la relación que existe entre el número de revoluciones a las cuales funciona la bomba, con parámetros como la presión, el flujo volumétrico, la potencia hidráulica, etc.

Ejecución del ensayo

Para la ejecución del ensayo N°2 se deben tener en consideración los siguientes puntos a llevar a cabo.

- 1) Mediante el uso de la válvula de desaireación, realizar el cebado de la bomba verificando que no queden burbujas de aire en la voluta.
- 2) Asegurarse de que las válvulas V1 y V2 estén completamente abiertas
- 3) Realizar la puesta en cero del equipo con la tecla “Tara”
- 4) Iniciar la operación de la bomba a 3300 Rev/min
- 5) Registrar los valores mostrados en una tabla de la presión de succión P_1 , presión de descarga P_2 y del flujo volumétrico $\dot{V}$

- 6) Reduzca gradualmente el número de revoluciones de la bomba (pasos de 300 Rev/min dan buenos resultados) reduciendo con esto el flujo volumétrico, registre los valores como se indica en el punto 5
- 7) Repita los pasos 5 y 6 hasta el cese del flujo volumétrico (Valor mínimo 300 Rev/min)
- 8) Se pueden realizar más curvas generando una resistencia en la instalación con el cierre de la válvula V2. (gunt, 2019)

Tabla 8

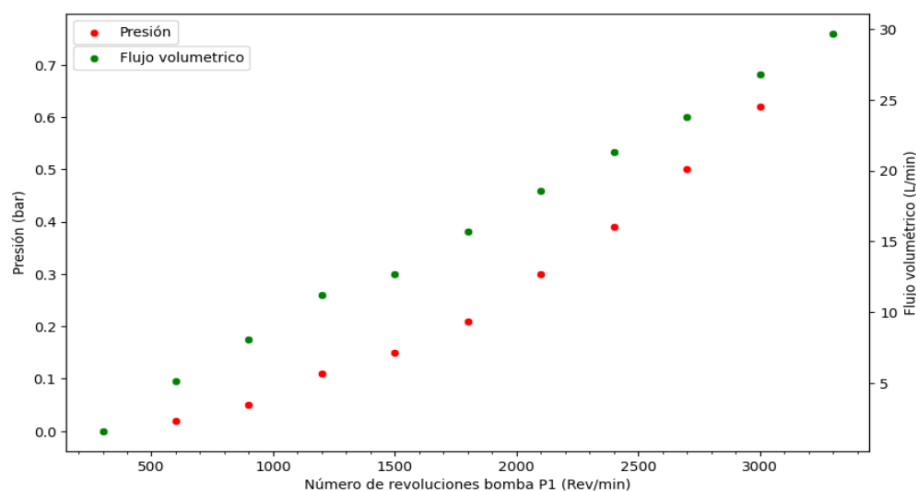
Toma de datos del ensayo N°2 Comportamiento del servicio al cambiar el número de revoluciones

Número de revoluciones bomba P1 (L/min)	Flujo volumétrico (L/min)	Presión P1 (bar)	Presión P2 (bar)	Potencia hidráulica (w)	ΔP
3300	29,7	-0,08	0,68	37	0,76
3000	26,8	-0,06	0,56	28	0,62
2700	23,8	-0,05	0,45	20	0,5
2400	21,3	-0,04	0,35	14	0,39
2100	18,6	-0,03	0,27	9	0,3
1800	15,7	-0,02	0,19	6	0,21
1500	12,7	-0,02	0,13	3	0,15
1200	11,2	-0,01	0,1	2	0,11
900	8,1	-0,01	0,04	1	0,05
600	5,1	0	0,02	0	0,02
300	1,6	0	0	0	0

En la Figura 20 se aprecia el comportamiento de la presión y del flujo volumétrico en relación con la velocidad de giro del impulsor de la bomba. El comportamiento del flujo volumétrico tiende a ser lineal y el de la presión tiende a ser cuadrático, tal como indican las leyes de afinidad.

Figura 20.

Gráfico de comportamiento de la presión y el flujo volumétrico según la velocidad de giro de la bomba



Nota: Elaboración propia

5.5. Ensayo N°3: Sentido de giro

Este ensayo tiene como objetivo crear una curva característica de la instalación y compararla con la curva de la bomba generada en el primer ensayo. Con la influencia de la válvula V2, se puede accionar la bomba con diferentes resistencias de la instalación, con ello trazar la relación entre la diferencia de presión en función de la bomba y del flujo volumétrico. El ensayo simula el funcionamiento de una bomba centrífuga girando en sentido inverso.

Ejecución del ensayo

Explicar los pasos detalladamente

Para realizar el ensayo “Sentido de giro”, se deben llevar a cabo los siguientes pasos.

- 1) Mediante el uso de la válvula de desaireación, realizar el cebado de la bomba verificando que no queden burbujas de aire en la voluta.
- 2) Asegurarse de que la válvula V2 se encuentre completamente abierta
- 3) Realizar la puesta en cero con la tecla “Tara”
- 4) Iniciar la operación de la bomba en sentido inverso (horario) a $n = 3300$ Rev/min
- 5) Registrar los valores mostrados en una tabla de la presión de aspiración P_1 , la presión de salida de la bomba P_2 , la potencia hidráulica y eléctrica P_{hyd} , P_{el} , el rendimiento η así como el flujo volumétrico $\dot{V}$.
- 6) Con el cierre gradual de la válvula V2, reducir paulatinamente el flujo volumétrico y registrar los valores indicados en el punto 5.

- 7) Repetir los pasos 5 y 6 hasta llegar a la estrangulación completa del flujo volumétrico.
- 8) Es posible obtener otras curvas con un número de revoluciones modificado. (gunt, 2019)

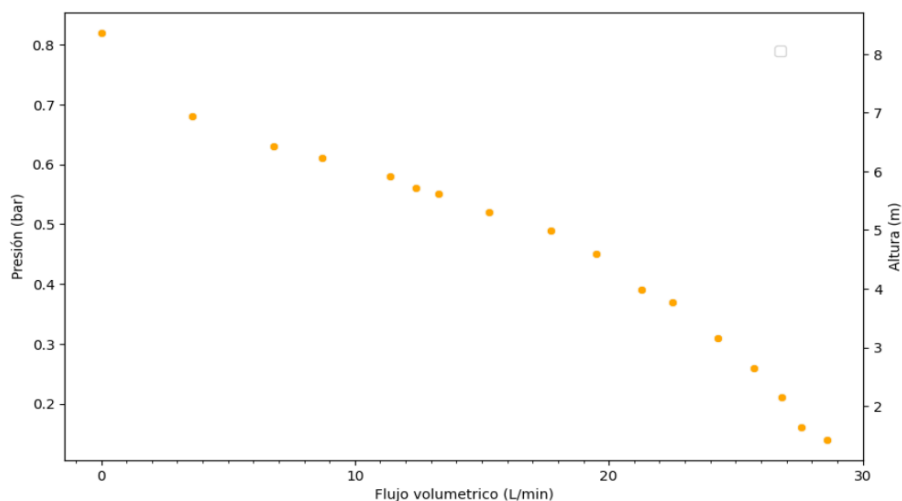
Tabla 9

Toma de datos del ensayo N°3 Sentido de giro

Número de revoluciones bomba P1 n (L/min)	Flujo volumétrico V (L/min)	Presión P1 (bar)	Presión P2 (bar)	Potencia hidráulica (w)	Potencia eléctrica (w)	Rendimiento (%)	ΔP	Altura (m)
3300	28,6	-0,08	0,06	6	360	2	0,14	1,428
3300	27,6	-0,07	0,09	7	349	2	0,16	1,632
3300	26,8	-0,07	0,14	9	343	3	0,21	2,142
3300	25,7	-0,07	0,19	10	334	3	0,26	2,652
3300	24,3	-0,06	0,25	12	323	4	0,31	3,162
3300	22,5	-0,05	0,32	14	312	4	0,37	3,774
3300	21,3	-0,04	0,35	14	304	5	0,39	3,978
3300	19,5	-0,04	0,41	14	293	5	0,45	4,59
3300	17,7	-0,04	0,45	14	286	5	0,49	4,998
3300	15,3	-0,02	0,5	13	276	5	0,52	5,304
3300	13,3	-0,02	0,53	12	263	5	0,55	5,61
3300	12,4	-0,02	0,54	11	260	4	0,56	5,712
3300	11,4	-0,02	0,56	10	253	4	0,58	5,916
3300	8,7	-0,01	0,6	9	242	4	0,61	6,222
3300	6,8	-0,01	0,62	7	233	3	0,63	6,426
3300	3,6	0	0,68	4	222	2	0,68	6,936
3300	0	0	0,82	0	214	0	0,82	8,364

Figura 21.

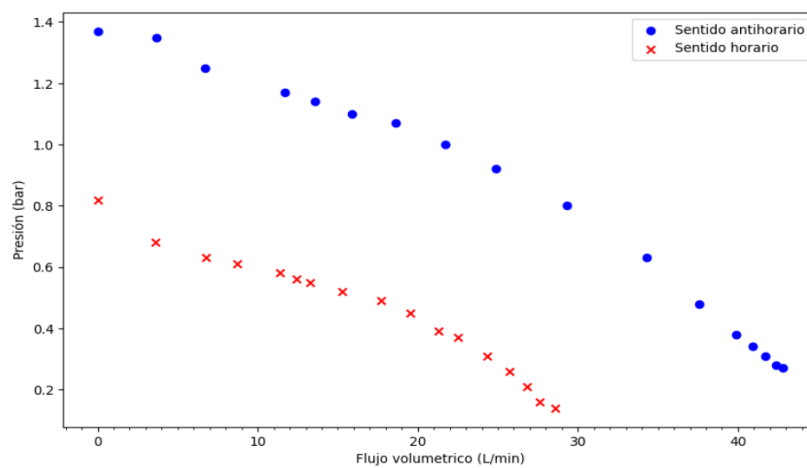
Gráfico H-Q ensayo 3 sentido de giro



Nota: Elaboración propia

Figura 22.

Gráfico comparativo según el sentido de giro del impulsor



Nota: Elaboración propia

Al igual que en la Figura 14, la Figura 22 muestra una diferencia significativa en la presión en comparación de los sentidos de giro del impulsor, teniendo una presión máxima de 0,82 bar en comparación con el sentido antihorario que es de 1.37 bar.

6. Discusión

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de los experimentos realizados en el equipamiento de bombeo, se aprecia una similitud en la curva de la bomba realizada experimentalmente y la curva de la bomba generada con los datos del fabricante (Anexo 4). La curva de la bomba, del aparato experimental, puede presentar poca curvatura debido a la capacidad del caudalímetro utilizado, la cual es de 120 L/min y la capacidad de la bomba llega hasta 350 L/min. Los experimentos no fueron realizados en el caudalímetro de 2 pulgadas debido a que, al ser análogo, genera una mayor dificultad en la precisión de la toma de datos, además, la parte electrónica que posee el caudalímetro no pudo ser configurada en intentos anteriores. La medición de caudal implica el uso de un cronómetro para medir la cantidad de vueltas que marca la aguja y realizar el cálculo del flujo.

En cuanto a la presión, la diferencia puede deberse a la disminución del diámetro de la tubería por la cual pasa el flujo, sin embargo, esta hipótesis puede ser descartada, puesto que, al cerrar por completo la válvula de compuerta, la velocidad del flujo es cero y lleva la ecuación 4 de variación de presión a cero. Sin embargo, según la ecuación 5 (ecuación de pérdida de carga), el sistema genera una mayor pérdida de carga al utilizar una tubería de diámetro inferior al de la bomba, puesto que, al disminuir el diámetro también aumenta la velocidad promedio, algo que se puede minimizar utilizando la tubería de 2 pulgadas.

La validación del aparato experimental se basa principalmente en el objetivo específico 3, teniendo como fin el demostrar que el sistema tiene la capacidad de abastecer de flujo una sección de ensayos, se muestra, en base a experimentación, que el aparato experimental abastece de agua al equipo HM150.29 con un caudal aproximado de 45 L/min y una presión superior a 1 bar.

7. Conclusión

Para finalizar, se concluye que el aparato experimental cuenta con las características suficientes para abastecer secciones de ensayo para estudios experimentales con un caudal máximo que ronda entre los 120 y 130 l/min. El equipo alimentó al instrumento de pérdida de presión en tuberías “HM150.29” con un caudal de 43.6 l/min permitiendo mediciones de presión en él. El aparato experimental requiere mejoras, entre ellas la implementación de un caudalímetro de alto caudal que pueda medir la capacidad total de la bomba centrífuga, pudiendo así aumentar el rango de secciones de ensayo en los cuales se puede utilizar. En comparación con el equipo “HM283” Ensayos en una bomba centrífuga posee pequeñas similitudes en sus curvas, aunque la bomba del equipo “HM283” levanta una mayor columna de agua, pero con un caudal inferior en el sentido horario. Se observa que la curva de la bomba del aparato experimental no posee una curvatura apreciable como la del “HM283” sino que tiende a la recta en una escala de 0.3 a 1.6 con pasos de 0.05, aquí es donde se ve reflejada la limitación entregada por el caudalímetro para poder desarrollar la curva de la bomba por completo llegando hasta los 350L/min.

6. Referencias

- Aguirre Ramos, V. Y., & Gonzalez Garcias, L. G. (22 de 09 de 2022). *Repositorio Dspace*.
Obtenido de <https://repositorio.upse.edu.ec/xmlui/handle/46000/8466>
- Blaauboer, A. (2016). *Universidad técnica Federico Santa María*. Obtenido de
<https://repositorio.usm.cl/handle/11673/23370?locale-attribute=en>
- Cano, N. (2003). *Universidad de los Andes Colombia*. Obtenido de
<https://repositorio.uniandes.edu.co/entities/publication/89e66f38-19c9-4b8e-aa44-f49833ae03e5>
- Carriel Montoya, B. J., & Villacís Vargas, O. I. (03 de 2015). *Universidad politécnica salesiana Ecuador*. Obtenido de <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/10265>
- Cengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2020). *Mecánica de fluidos: Fundamentos y aplicaciones*. Mc Graw Hill.
- Chapman, S. J. (2012). *Máquinas eléctricas*. Mc Graw Hill.
- CLR compañía levantina de reductores. (2023). *CLR compañía levantina de reductores*.
Obtenido de <https://clr.es/blog/es/motores-monofasicos-bifasicos-trifasicos/#:~:text=Son%20impulsados%20por%20tres%20corrientes,entre%20900%20y%203600%20RPM.>)
- Cruz Rangel, C. C. (01 de 09 de 2009). *Universidad Nacional de Colombia*. Obtenido de
chrome-
extension://efaidnbmnnnibpcajpcgiclfindmkaj/https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/33242910/19248899-Valvulas-para-tuberias-libre.pdf?1395084283=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DFacultad_de_Ingenieria.pdf&Expires=1698158756&Signat
- Daza Salinas, S. (23 de 01 de 2019). *Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Sistema de bibliotecas*. Obtenido de <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/15749>
- De las Heras, S. (2011). *Fluidos, bombas e instalaciones hidráulicas*. Universitat Politècnica de Catalunya.
- Dominguez, D. (Marzo de 2020). *Universidad politécnica salesiana Ecuador*. Obtenido de
<http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18544>
- Equipos de riego. (2023). *Equipos de riego Las brujas de talagante*. Obtenido de
<https://equiposderiego.cl/products/contador-woltman>
- gunt. (2023). *gunt Hamburg*. Obtenido de <https://www.gunt.de/es/productos/maquinas-fluidomecanicas/turbomaquinas/bombas-centrifugas/ensayos-en-una-bomba-centrifuga/070.28300/hm283/glct-1:pa-150:ca-723:pr-842>
- Hansen Rodriguez, M. P. (2001). *Elementos secundarios de medición*. México DF: IMTA.
- ISO. (1999). Rotodynamic pumps — Hydraulic performance acceptance tests — Grades 1 and 2 (Norma núm 9906).
<https://ppemma.org/standards/PCSIR-AND-ENERCON/ISO-9906E-Pump-Hydraulic-Test-Standard.pdf>
- Lema Jami, B. O., & Laurencio Alfonso, H. L. (2022). *Universidad técnica de cotopaxi repositorio institucional*. Obtenido de <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/9692>

- Mataix, C. (2009). *Turbomáquinas Hidráulicas*. Universidad Pontificia Comillas.
- Pacheco-Chica, W., & Santos-Moreira, K. (2020). *Dialnet*. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8385965>
- PEER. (Febrero de 2019). *bun-ca*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://www.bun-ca.org/wp-content/uploads/2019/02/Motores.pdf
- Roian Store. (2023). *Roianstore*. Obtenido de <https://www.roian.cl/home/medidor-digital-lcd-flujo-turbina-combustibles-liquidos/>
- Tolentino, R., Huerta, P., & Torres, I. (Septiembre de 2020). *Universidad Nacional Autonoma de México*. Obtenido de chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcgclefindmkaj/https://virtual.cuautitlan.unam.mx/CongresoCiTec/Memorias_Congreso/Anio5_No5/Extensos/IF-03.pdf
- Valencia Vargas, S. E., & López Ati, D. A. (2014). *Universidad Técnica de ambato*. Obtenido de <https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/handle/123456789/8215>
- industrial-c4505020/p
- Veto. (2023). *Veto precision a su medida*. Obtenido de <https://www.veto.cl/mano-vacuometro-c2226507/p>
- Veto. (2023). *Veto precisión a su medida*. Obtenido de <https://www.veto.cl/manometro-c0255100/p>
- Wikipedia. (2023). *Wikimedia*. Obtenido de https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/d9/Moody_EN.svg

7. Anexos

Anexo 1 Tabla de costos

Tabla 1

Cotización de elementos necesarios para la construcción

ítem	Descripción	Precio unitario (CLP)	Cantidad	Precio total (CLP)	Precio total (UF)
Bomba centrífuga	Bomba reggio scf1 100t 1.0hp 380v	260360	1	260360	7,13
Cable eléctrico	Cable flexible rv-k multipolar 3x1.5mm ² x metro	839	6	5034	0,14
Caudalímetro analogico	Contador tipo woltman, medidor de flujo de turbina, el cual envía un pulso cada 100 l	130290	1	130290	3,57
Caudalímetro digital	Medidor de flujo digital, tipo turbina, con pantalla lcd, rosca bspp de 1"	35990	1	35990	0,99
Codos 1"	Codo 90o pvc-p cementar 32mm	230	3	690	0,02
Codos 2"	Codo 90o pvc-p cementar 63mm	3690	2	7380	0,20
Conector eléctrico hembra	Enchufe industrial hembra sobrepuesto 2pt 220v	2570	1	2570	0,07
Conector eléctrico macho	Enchufe industrial macho volante 16 a 2p+t 220v ip44	2190	1	2190	0,06
Conector he-manguera	Macho espiga galvanizado	3140	1	3140	0,09
Contactor	Interruptor automático 10 a	3490	1	3490	0,10
Estanque	Estanque 250l	55000	1	55000	1,51
Filamento PETG	Filamento petg 1kg creality	15890	1	15890	0,44

ítem	Descripción	Precio unitario (CLP)	Cantidad	Precio total (CLP)	Precio total (UF)
polímero	Flange brida con manguito volante pvc soldar de 63 mm	8000	2	16000	0,44
Flange Manguera 1"	Manguera mallaflex 1" (x metros)	3099	4	12396	0,34
Manguera neumatica 6mm	Manguera poliuretano 6mm (x metro)	3570	3	10710	0,29
Manovacuometro	Manómetro glicerina -1 a 2 bar 63mm inox conexión un cuarto	16990	2	33980	0,93
Racor neumático	1/4" he 6mm	1807	4	7228	0,20
Reducción compuerta (corta)	Buje reducción corta pvc-p cementar 63mm	1740	2	3480	0,10
Reducción manguera 1"-3/4"	Reducción polietileno 1" x 3/4" negro	490	1	490	0,01
Reducción tubos (larga)	Buje reducción larga pvc-p cementar 63 mm x 32 mm	2490	4	9960	0,27
Tee 2"	Tee pvc 63 mm cem	1000	4	4000	0,11
Tubería 1"	Tubo pvc-p 32mm x 6m pn-10 cementar	4800	1	4800	0,13
Tubería 2"	Tubo pvc hidraulico clase pn-10 c/goma 63 mm 6 metros	10080	1	10080	0,28
Union americana 1"	Union americana pvc-p cementar 32mm	3590	2	7180	0,20
Union americana 2"	Unión americana 63 mm cem pvc hidraulico	7390	3	22170	0,61
Unión hi-cem 1"	Terminal cem/hi 32 mm	990	3	2970	0,08
Unión he-cem 2"	Terminal de pvc con hilo exterior de 63 mm cem	2690	2	5380	0,15

ítem	Descripción	Precio unitario (CLP)	Cantidad	Precio total (CLP)	Precio total (UF)
Unión hi-cem 2"	Terminal pvc-p cem/hi 63mm x 2"	5590	2	11180	0,31
Unión hi-hi manómetro	Niple hilo unión hi - hi 1/4" bronce	1790	2	3580	0,10
Válvula de bola 1"	Válvula bola compacta pvc cem pn-10 32mm	3890	2	7780	0,21
Válvula de bola 2"	Válvula bola pvc compacta soldar, 63 mm, 2 pulgadas	5490	2	10980	0,30
Válvula de compuerta	Válvula de compuerta hi de 2", material: bronce	20990	1	20990	0,58
Variador de frecuencia	Vdf entrada monofásica y salida trifásica en 2,2kw y 220vac.	190000	1	190000	5,21
Salida de estanque 2"	Salida estanque pvc-p cem/he 63mm x 2"	7690	1	7690	0,21

Anexo 2 Diagrama de Moody

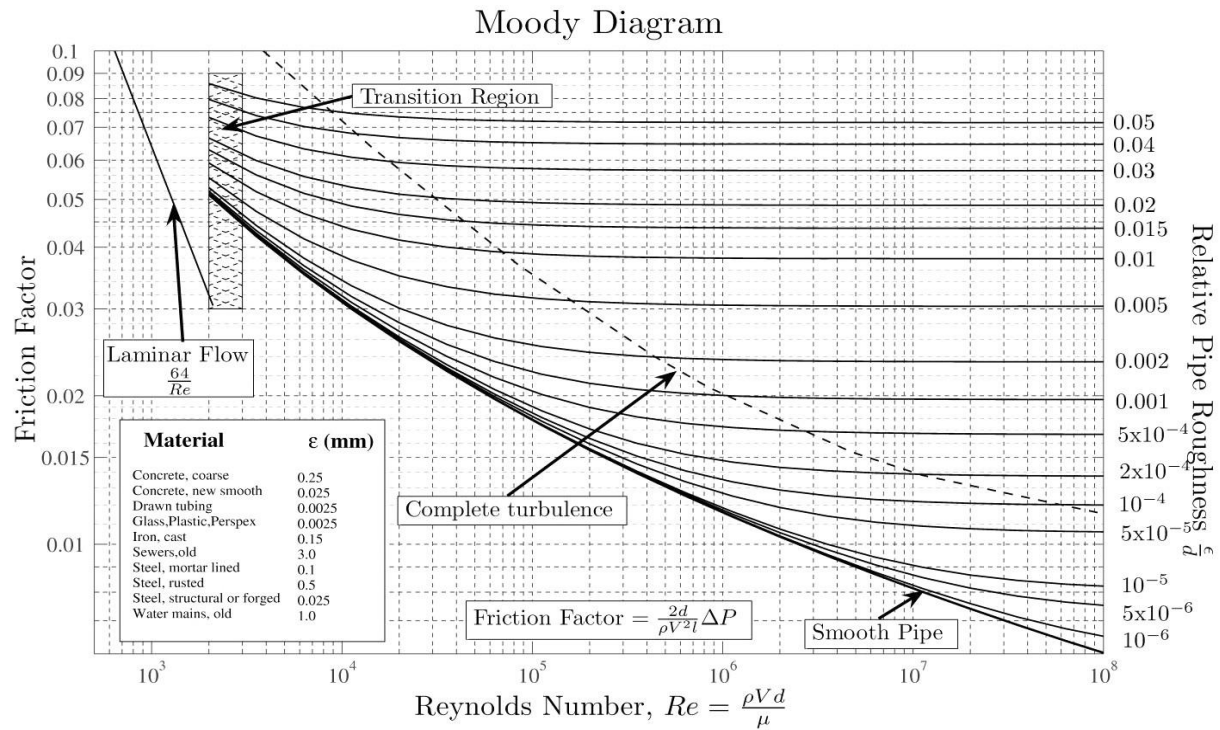
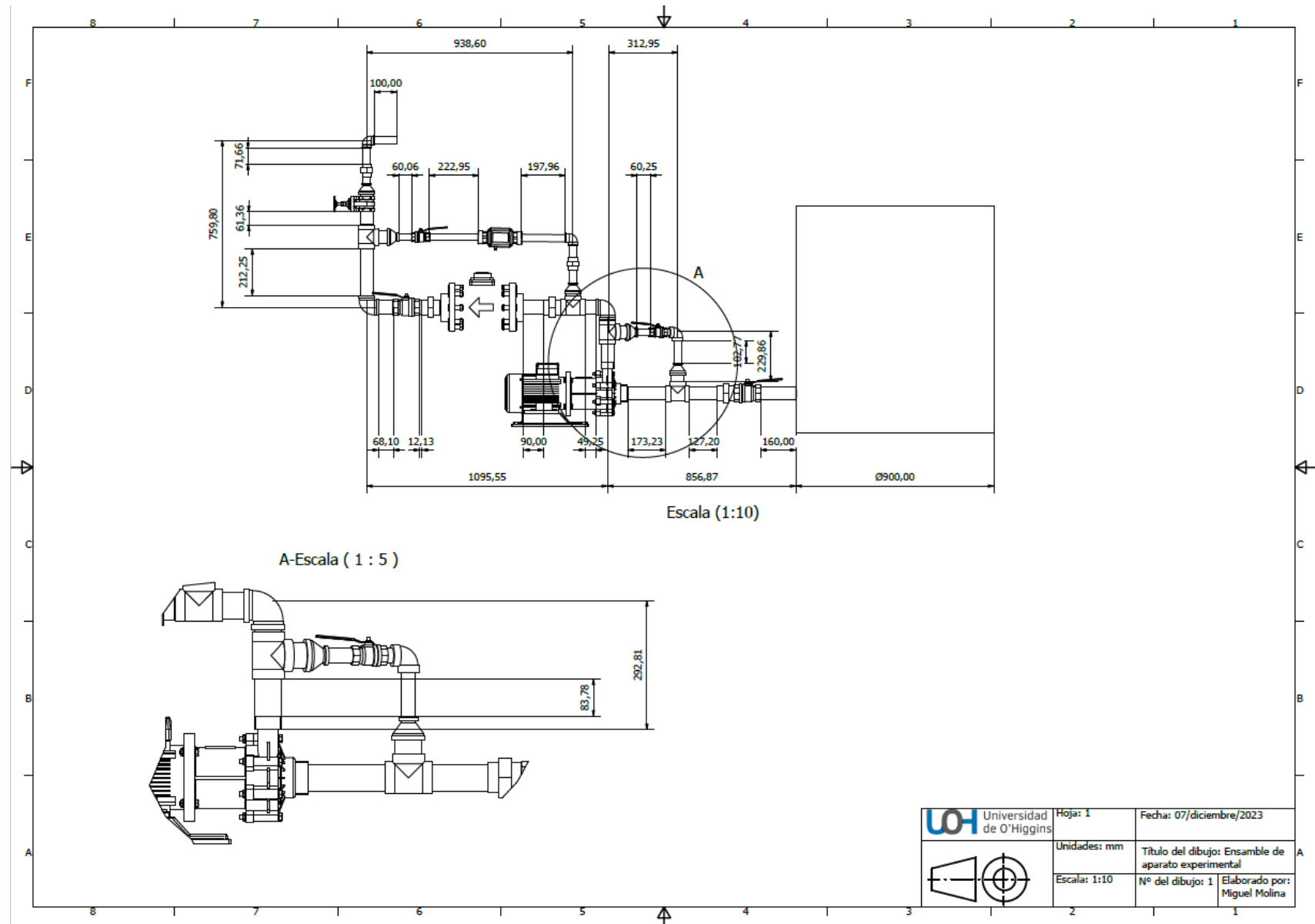


Diagrama de Moody extraído de (Wikipedia, 2023)

Anexo 3 Plano del equipamiento de bombeo



Para la realización del plano se utilizaron las siguientes normas:

NCh 13.Of93 ISO 5457 Dibujos técnicos – Formatos y elementos gráficos de las hojas de dibujo

NCh 1471.Of93 ISO 5455: 1979 Dibujos técnicos- Escalas

NCh 14.Of93 ISO7200 Dibujos técnicos- Cuadro de rotulación

NCh 16.Of93 ISO129 Dibujos técnicos- Dimensionamiento – Principios generales, definiciones, métodos de ejecución e indicaciones especiales.

Anexo 4: Datos del comportamiento hidráulico de la bomba centrífuga

COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

TIPO		POTENCIA NOMINAL		POT. ABS.	In (Ampere)		Q = CAUDAL										
Monofase	Trifase	P2		P1	Monofase	Trifase	m³/h	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30
		HP	kW	kW	1 x 230 V	3 x 400 V	l/min	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500
230V-50 Hz		400V-50Hz					Altura manométrica total										
SCF1 100	SCF1 100 T	1	0,75	1,1	5,3	2,2	H (m)	13	12,8	12,2	11,5	10	7	4			
SCF4 150	SCF4 150 T	1,5	1,1	1,9	7,5	3,1		16	15,7	15,3	15	14	13	12	11	10	8
SCF4 200	SCF4 200 T	2	1,5	2,3	9,3	4,2		17	16,8	16,7	16,5	15,8	15	14	13	12	10

Tolerancias según ISO 9906:2012

Anexo 5: Estudiantes realizando experimentos en el equipo “HM283”

