

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS

IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA EL ANÁLISIS DE UNA BOMBA HIDRÁULICA Y MEDIDORES DE CAUDAL EN EL LABORATORIO DE TECNOLOGÍA INDUSTRIAL DE LA ESFOT

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
TECNÓLOGO SUPERIOR EN ELECTROMECAÁNICA**

Esteban Daniel Erazo Naulaguari

esteban.erazo@epn.edu.ec

Liseth Paola Salazar Congacha

liseth.salazar@epn.edu.ec

DIRECTOR: ING. HUGO FRANCISCO ZÚÑIGA PUEBLA, MSC.

hugo.zuniga@epn.edu.ec

CODIRECTOR: ING. CARLOS ORLANDO ROMO HERRERA, MSC.

carlos.romo@epn.edu.ec

Quito, abril 2021

CERTIFICACIÓN

Certificamos que el presente trabajo fue desarrollado por el Sr. Erazo Naulaguari Esteban Daniel y la Srta. Salazar Congacha Liseth Paola como requerimiento parcial a la obtención del título de TECNÓLOGO SUPERIOR EN ELECTROMECAÁNICA bajo nuestra supervisión:



Ing. Hugo Zúñiga MSc.

DIRECTOR DEL PROYECTO



Ing. Carlos Romo MSc.

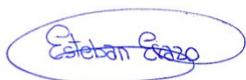
CODIRECTOR DEL PROYECTO

DECLARACIÓN

Nosotros Erazo Naulaguari Esteban Daniel con CI:1751393354 y Salazar Congacha Liseth Paola con CI: 1726831942 declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

Sin perjuicio de los derechos reconocidos en el primer párrafo del artículo 144 del Código Orgánico de la Economía Social de los Conocimientos, Creatividad e Innovación – COESC-, somos titulares de la obra en mención y otorgamos una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva de uso con fines académicos a la Escuela Politécnica Nacional.

Entregamos toda la información técnica pertinente, en caso de que hubiese una explotación comercial de la obra por parte de la EPN, se negociará los porcentajes de los beneficios conforme lo establece la normativa nacional vigente.



Erazo Naulaguari Esteban Daniel

CI: 1751393354

Teléfono: 0984953296

Correo: esteban.erazo@epn.edu.ec



Salazar Congacha Liseth Paola

CI: 1726831942

Teléfono: 0998256773

Correo: liseth.salazar@epn.edu.ec

DEDICATORIA

El presente proyecto se lo dedico a mis padres, que han sido el motor más importante en mi vida y el apoyo incondicional para seguir con mis estudios, me han enseñado a valorar el trabajo y esfuerzo que se requiere para conseguir el éxito. Les agradezco porque nunca me ha faltado nada, siempre estuvieron ahí dándome buenos consejos y velando por mi bienestar.

Dedicado para todas aquellas personas que han sido un gran apoyo en todo el transcurso de mi vida académica. Este nuevo logro es en gran parte gracias a ustedes; he logrado concluir con éxito un proyecto que en un principio pudo parecer difícil y duro, pero que con trabajo y dedicación se logró culminar.

Esteban E.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por permitirme tener y disfrutar a mi familia día a día, gracias a mis padres, personas de gran corazón y sabiduría que se han esforzado por apoyarme incondicionalmente en cada decisión, propósito y meta que me planteo y llegar al punto en el que me encuentro.

Agradezco a todos mis compañeros y amigos que, gracias a su apoyo moral y social, la vida como estudiante fue siempre una experiencia única.

Agradezco a todas las personas que conforman la EPN, profesores que supieron compartir sus conocimientos y que supieron guiarme y prepararme para mi vida profesional.

Esteban E.

DEDICATORIA

A mi madre Consuelo que ha sido pilar fundamental en mi formación como persona y profesional, por su amor, apoyo incondicional, consejos, confianza, y sus palabras que siempre me reconfortan en los momentos más difíciles.

A mi hermana Andrea por confiar en mí y estar apoyándome en todo momento.

A mis abuelitos Vilma y Jorge por su amor incondicional y sus sabios consejos.

Liseth S.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por guiar mis pasos, darme la familia que tengo y cuidar de ella.

A mi madre quien me enseñó a nunca dejar de luchar para alcanzar mis metas y quien es la razón por la que me esfuerzo cada día.

A mis hermanas y abuelitos por el apoyo y cariño que me dan.

A mi tutor de tesis el Ing. Hugo Zúñiga por sus conocimientos compartidos y por ser parte de mi formación profesional.

Liseth S.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1	Introducción	1
1.1	Descripción del problema	1
1.2	Justificación	1
1.3	Objetivo general	2
1.4	Objetivos específicos	2
1.5	Fundamentos teóricos	2
	Principio de continuidad	3
	Ecuación general de la energía	3
	Curvas características de la bomba	4
	Carga de succión positiva neta (NPSH)	5
	Propiedades del fluido	5
	Pérdidas en tuberías	5
	Tubo Venturi	6
2	Metodología	8
2.1	Descripción de la metodología usada	8
3	Resultados y Discusión	10
3.1	Requerimientos técnicos del sistema	10
	Tamaño y dimensiones	10
	Tipo de bomba	10
	Tuberías y accesorios	10
	Instrumentación	11
3.2	Dimensionamiento del sistema	11
	Carga del sistema	11
	Pérdidas mayores para tramo A	12
	Pérdidas menores para tramo A	13
	Resultados obtenidos	14
	Selección de la bomba	16

Carga de succión positiva neta (NPSH).....	17
Succión positiva.....	17
Sensor de caudal FS400A G1	19
Sensor de presión HK3022.....	19
3.3 Ensamble del sistema.....	20
Estructura, bomba y tanque.....	20
Tuberías y accesorios PVC.....	22
Elementos de regulación	23
Instalación de manómetros y sensores.....	24
Acondicionamiento de sensores	27
3.4 Pruebas y Análisis de Resultados.....	28
Fugas del sistema.....	28
Pruebas de sensores.....	29
Funcionamiento del sistema	30
Funcionamiento de la bomba.....	30
Tubo Venturi	34
Caídas de presión en tuberías.....	35
3.5 Manual de Uso y Mantenimiento.....	38
3.6 Hojas guías.....	39
Curvas características de una bomba centrífuga	39
Tubo Venturi	39
Pérdidas por fricción en tubería PVC	39
4 Conclusiones y Recomendaciones	40
4.1 Conclusiones	40
4.2 Recomendaciones.....	42
5 Referencias Bibliográficas	43
ANEXOS.....	44
Anexo 1: Certificado de Funcionamiento.....	i
Anexo 2: Planos y Esquemas	ii

Anexo 3: Diagrama de Moody.....	iii
Anexo 4: Manuales de operación y mantenimiento.....	iv
Anexo 5: Hojas guías.....	v

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Curvas características de una bomba.	4
Figura 1.2 Tubo Venturi.	7
Figura 2.1 Esquema de la metodología.	9
Figura 3.1 Tramos del módulo didáctico.	11
Figura 3.2 Esquema del módulo didáctico.	20
Figura 3.3 Módulo didáctico.	21
Figura 3.4 Posición de bomba (succión positiva).	21
Figura 3.5 Válvula de pie.	22
Figura 3.6 Unión de tuberías y accesorios PVC.	22
Figura 3.7 Tramo A.	22
Figura 3.8 Tramo B.	23
Figura 3.9 Tramo C.	23
Figura 3.10 Válvulas para control de flujo.	23
Figura 3.11 Acoples para manómetros y transductores de presión del módulo.	24
Figura 3.12 Acoples para manómetro y transductores de presión.	24
Figura 3.13 Ubicación de caudalímetro.	25
Figura 3.14 Diagrama eléctrico para transductor de presión.	26
Figura 3.15 Diagrama eléctrico para caudalímetro.	26
Figura 3.16 Tablero vista externa (a) y vista interna (b).	27
Figura 3.17 Corrección de fugas en acoples.	28
Figura 3.18 Manómetro (a) y pantalla LCD de traductor de presión (b) colocados en la línea de descarga.	29
Figura 3.19 Curva característica de la bomba por el fabricante y obtenida de forma experimental.	32
Figura 3.20 Curva característica η vs Q	34
Figura 3.21 Conexión de transductores de presión en tubo Venturi.	34
Figura 3.22 Conexión de transductores de presión en tramo C.	35
Figura 3.23 Gráfica de pérdidas teóricas y experimentales.	37
Figura 3.24 Manual de uso.	38
Figura 3.25 Manual de mantenimiento.	38

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Propiedades del agua a 25 (°C).....	5
Tabla 3.1 Accesorios del sistema y coeficientes de pérdidas.	13
Tabla 3.2 Pérdidas en el sistema – Tramo A.	14
Tabla 3.3 Pérdidas en el sistema – Tramo B.	15
Tabla 3.4 Pérdidas en el tubo Venturi – Tramo B.	15
Tabla 3.5 Pérdidas en el sistema – Tramo C.....	16
Tabla 3.6 Pérdidas en reducción de tubería – Tramo C.....	16
Tabla 3.7 Comparación de alternativas de bombas hidráulicas.	16
Tabla 3.8 Ponderación para selección de la bomba.	17
Tabla 3.9 Accesorios en la línea de succión.....	18
Tabla 3.10 Características técnicas sensor FS400A G1.....	19
Tabla 3.11 Características técnicas del transductor HK3022.....	19
Tabla 3.12 Resultados obtenidos en la prueba de fugas del sistema.	29
Tabla 3.13 Resultados obtenidos en la prueba de funcionamiento del sistema.	30
Tabla 3.14 Datos obtenidos para gráfica curva característica H vs Q.....	31
Tabla 3.15 Datos obtenidos para gráfica curva característica η vs Q.....	33
Tabla 3.16 Resultados de la prueba en tubo Venturi.	35
Tabla 3.17 Resultados de la prueba de caída de presión en tubería de $\frac{1}{2}$ in.....	36

RESUMEN

El presente proyecto de titulación “IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA EL ANÁLISIS DE UNA BOMBA HIDRÁULICA Y MEDIDORES DE CAUDAL”, se desarrolló en base a cálculos y análisis de sistemas hidráulicos para posteriormente implementarlo y realizar las pruebas de funcionamiento del sistema.

Se determinó la carga hidrostática en cada tramo que constituye el módulo, la cual no excede de la carga hidrostática máxima de la bomba que es 40 (m), por otro lado, al realizar el cálculo del $NPSH_R$ se obtuvo que la mejor opción es colocar la bomba para una succión positiva con lo cual se evita la cavitación.

En base a los cálculos realizados en la etapa de diseño, se seleccionó el tipo bomba, instrumentación, tuberías PVC, accesorios y sistema de adquisición de datos medianamente económicos y fiables para cumplir con el correcto funcionamiento del módulo.

Para las pruebas de funcionamiento el módulo cuenta con tres tramos: el tramo A es la línea de descarga directa y permite determinar las curvas características de la bomba centrífuga, la curva (H vs Q) obtenida de forma experimental al ser comparada con la del fabricante se observa una tendencia similar, indicando un correcto funcionamiento de la bomba. La curva (η vs Q) obtenida tiene similitud a la presentada en la bibliografía señalando valores bajos de eficiencia por ser una bomba < 1hp.

En el tramo B se encuentra el tubo Venturi, el cual permite obtener el valor de caudal de forma experimental, y que al compararlo con el valor teórico se obtiene errores menores al 26.98 %

Finalmente, en el tramo C existe una reducción de tubería para determinar las pérdidas por fricción de forma experimental, al comparar este valor con el teórico se obtiene errores altos, debido a que se trabaja con un flujo turbulento y que existe una reducción súbita en la tubería por lo que los resultados obtenidos no son exactos.

PALABRAS CLAVE: Flujo turbulento, carga hidrostática, NPSH, tubo Venturi.

ABSTRACT

The present degree project "IMPLEMENTATION OF A DIDACTIC MODULE FOR THE ANALYSIS OF A HYDRAULIC PUMP AND FLOW METERS", was developed based on analysis and calculation of hydraulic systems, later the systems was implemented it and carry out the system operation tests.

The hydrostatic load was determined in each section that constitutes the module, which does not exceed the maximum hydrostatic load of the pump which is 40 (m), on the other hand, when calculating the $NPSH_R$ it was obtained that the best option is to install the pump for a positive suction which avoids cavitation.

Based on the calculations made in the design stage, the pump type, instrumentation, PVC piping, accessories and data acquisition system were selected to be moderately economical and reliable to comply with the correct operation of the module.

For the operation tests, the module has three sections: section A is the direct discharge line and allows determining the characteristic curves of the centrifugal pump, the curve (H vs Q) obtained experimentally when compared with the manufacturer's curve shows a similar trend, indicating a correct operation of the pump. The curve (η vs Q) obtained has similarity to the one presented in the bibliography indicating low efficiency values for being a pump < 1hp.

In section B there is the Venturi tube, which allows to obtain the flow value experimentally, and when compared with the theoretical value, errors of less than 26.98 % were obtained.

Finally, in section C there is a pipe reduction to determine experimentally the friction losses, when comparing this value with the theoretical one, high errors are obtained, due to the fact that it works with a turbulent flow and that there is a sudden reduction in the pipe, so the results obtained are not accurate.

KEYWORDS: Turbulent flow, hydrostatic load, NPSH, Venturi tube.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Descripción del problema

La población educativa insiste en mantener la enseñanza como proceso netamente teórico, transmisor y de carácter rutinario sin la necesidad de llevarlo a la práctica. El componente didáctico en el ámbito educativo facilita la explicación y aplicación de la enseñanza como estrategia para la formación del profesional, es decir, que la práctica universitaria en las distintas carreras impartidas tiene un nivel muy alto de importancia en la formación de profesionales capacitados [1].

En casos en donde son necesarias la realización de actividades prácticas en laboratorios, las universidades se enfrentan a dificultades que incluyen la carencia de recursos en equipos didácticos donde el estudiante pueda interactuar y llevar lo aprendido en el aula a un entorno más real, fomentando sus habilidades en el campo que se está desarrollando [2].

En la actualidad la Escuela de Formación de Tecnólogos (ESFOT) no cuenta con laboratorios y equipos adecuados en donde los estudiantes de la carrera de Tecnología Superior en Electromecánica puedan realizar actividades destinadas al aprendizaje práctico en el área de Fluidos para Transmisión de Potencia, específicamente en el análisis de bombas hidráulicas y medidores de caudal. Para enmendar esta carencia se plantea la implementación de un módulo didáctico para el análisis respectivo de una bomba hidráulica y medidores de caudal en el Laboratorio de Tecnología Industrial.

1.2 Justificación

El propósito del proyecto es el diseño y la implementación de un módulo didáctico para el análisis del funcionamiento de una bomba hidráulica y medidores de caudal en la ESFOT. El aprendizaje de los estudiantes de Tecnología Superior en Electromecánica en el área del Fluidos de Transmisión de Potencia se fundamenta en prácticas a nivel académico que organizan el proceso de enseñanza-aprendizaje y los conocimientos van a ser asimilados de manera eficiente [3].

Los estudiantes necesitan conocer y analizar el correcto funcionamiento de un sistema hidráulico debido al enorme progreso de la tecnología en la actualidad, el tecnólogo debe tener un buen conocimiento de las bombas hidráulicas y sus componentes, pues en la industria no existe lugar que no use equipos de bombeo de un tipo u otro [4]. Para

cumplir con el avance tecnológico en la industria es necesario que los laboratorios de la ESFOT se vayan adecuando con las necesidades de los futuros estudiantes.

Una bomba es una turbomáquina que trabaja con un fluido incompresible en la que se produce una transformación de energía mecánica en hidráulica [5]. Para la construcción del módulo se realiza el balance energético de la bomba centrífuga, se acondiciona el sistema de tuberías, de accesorios e instrumentos de medida de presión en los diferentes ramales.

En la mayor parte de las operaciones realizadas en los procesos industriales y en las efectuadas en laboratorio es muy importante la medición de los caudales de líquidos o gases [6]. Por lo cual los instrumentos que se utilizan en la implementación del módulo didáctico permitirán que el estudiante observe las características de comportamiento del fluido.

En el Anexo 1, se presenta el certificado de funcionamiento correcto del equipo.

1.3 Objetivo general

Implementar un módulo didáctico para el análisis de una bomba hidráulica y medidores de caudal en el Laboratorio de Tecnología Industrial de la ESFOT.

1.4 Objetivos específicos

- Determinar los requerimientos técnicos necesarios del sistema a implementarse.
- Dimensionar el módulo para el análisis del sistema hidráulico.
- Ensamblar el sistema hidráulico para su respectivo análisis.
- Realizar las pruebas de funcionamiento del equipo.
- Realizar un manual de operación y mantenimiento del equipo.
- Plantear hojas guías para prácticas de laboratorio.

1.5 Fundamentos teóricos

A continuación, se presenta los conceptos teóricos más importantes para el desarrollo del módulo didáctico. Los criterios presentados en esta sección principalmente se han tomado de la siguiente bibliografía: Mecánica de fluidos Cengel [7], Mecánica de fluidos Mott [8] e Instrumentación industrial Creus [9].

Principio de continuidad

En una tubería de diferentes secciones atraviesa un fluido, la velocidad media del mismo cambia debido a la diferencia de áreas. La cantidad de fluido (flujo másico) es la misma a lo largo de la tubería en un determinado tiempo, a esto se lo denomina flujo estable.

La Ecuación 1.1 es la representación matemática del principio de la continuidad para líquidos y establece que, para un fluido estable, el valor de caudal es el mismo en cualquier sección debido a que es un fluido incompresible (densidad constante).

$$Q_1 = Q_2; \quad A_1 \cdot V_1 = A_2 \cdot V_2$$

Ecuación 1.1 Principio de continuidad [7].

Donde:

- Q : (m³/s) caudal
- A : (m²) área
- V : (m/s) velocidad

Ecuación general de la energía

Permite determinar pérdidas o ganancias de energía en problemas relacionados con fluidos y turbomáquinas. En tuberías se analiza cualquier punto empleando el principio de continuidad. En la Ecuación 1.2 (Ec. General de la energía) se expresa en cantidad de energía por unidad de masa del fluido [10].

$$\frac{P_1}{\rho g} + z_1 + \frac{V_1^2}{2 \cdot g} + h_A = \frac{P_2}{\rho \cdot g} + z_2 + \frac{V_2^2}{2 \cdot g} + h_R + h_L$$

Ecuación 1.2 Ecuación general de la energía [10].

Donde:

- P : (Pa) presión
- ρ : (kg/m³) densidad
- V : (m/s) velocidad
- z : (m) altura
- g : (m/s²) gravedad
- h_A : (m) energía entregada al fluido (Ej.: bomba)
- h_R : (m) energía retirada desde fluido (Ej.: turbina)
- h_L : (m) energía de pérdidas en el sistema (mayores y menores)

Curvas características de la bomba

Una curva característica muestra las condiciones de trabajo de un equipo, en el caso de la bomba una de las curvas relaciona la carga hidrostática (H) con el caudal (Q), otra curva presenta eficiencia (η) y energía mecánica en el eje (bhp).

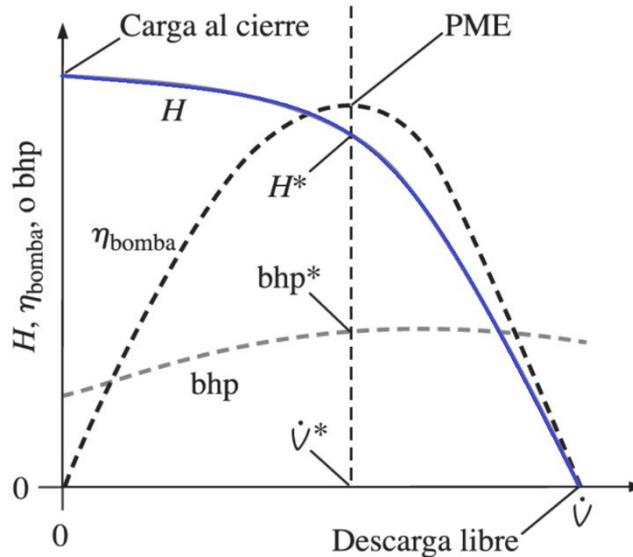


Figura 1.1 Curvas características de una bomba [7].

Como se observa en la Figura 1.1, en la curva (H vs Q) resaltada en color azul, para una descarga libre $H = 0$, el caudal es máximo y la eficiencia de la bomba $\eta = 0$ debido a que la bomba no está realizando trabajo útil. Por otro lado, para una descarga bloqueada la carga es máxima, $Q = 0$ y la eficiencia de la bomba $\eta = 0$. La Ecuación 1.3 muestra la eficiencia de la bomba que relaciona la energía hidráulica del fluido con la energía mecánica de flecha que ingresa desde el motor.

$$\eta_{\text{bomba}} = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{\omega \cdot T_{\text{flecha}}}$$

Ecuación 1.3 Eficiencia de la bomba [7].

Donde:

- ρ : (kg/m^3) densidad
- g : (m/s^2) gravedad
- Q : (m^3/s) caudal
- H : (m) carga hidrostática
- ω : (rad/s) velocidad angular
- T_{flecha} : (Nm) torque en la flecha (eje)

Carga de succión positiva neta (NPSH)

Es la diferencia entre la carga de presión de estancamiento en la entrada de bomba y la carga de la presión de vapor del fluido. En el diseño del sistema de tuberías se procura que la presión del fluido en la succión de la bomba sea la adecuada para evitar la cavitación. A partir de este concepto se desarrolla la Ecuación 1.4 para calcular el NPSH disponible.

$$\text{NPSH}_A = h_{sp} \pm h_s - h_f - h_{vp}$$

Ecuación 1.4 NPSH disponible [10].

Donde:

- h_{sp} : (m) carga de presión estática
- h_s : (m) diferencia de elevación
- h_f : (m) pérdidas de carga en la tubería
- h_{vp} : (m) carga de presión de vapor de agua

Propiedades del fluido

En la Tabla 1.1 se detallan las principales propiedades del agua que se utilizan en este proyecto. Cabe recalcar que las propiedades mostradas a continuación son a temperatura ambiente 25 (°C).

Tabla 1.1 Propiedades del agua a 25 (°C) [8].

Fluido	Densidad (ρ) $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right)$	Viscosidad dinámica (ν) $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m} \cdot \text{s}}\right)$	Peso específico (γ) $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}^2}\right)$	Carga presión de vapor (h_{vp}) (m)
Agua	997	0.891×10^{-3}	9 780.57	0.336

Pérdidas en tuberías

Las pérdidas en una red se consideran mayores (en la tubería) y menores (en los accesorios). Las pérdidas mayores son ocasionadas por la fricción de las partículas del fluido contra las paredes de la tubería. Se recomienda usar la Ecuación 1.5 para el cálculo de la pérdida de energía por fricción.

$$h_L = f \cdot \frac{L}{\emptyset} \cdot \frac{V^2}{2g}$$

Ecuación 1.5 Pérdidas mayores - Darcy [10].

Donde:

- f : factor de fricción
- L : (m) longitud de la tubería
- \emptyset : (m) diámetro de la tubería
- V : (m/s) velocidad del fluido
- g : (m/s²) gravedad

En un fluido turbulento se utiliza el diagrama de Moody para determinar el valor del factor de fricción (f) que depende de dos números adimensionales, que son el número de Reynolds y la rugosidad relativa de la tubería. La rugosidad relativa es la relación entre la rugosidad promedio (ϵ) y el diámetro de la tubería (\emptyset).

Las pérdidas de energía pueden expresarse en presión o carga en base a la Ecuación 1.6.

$$P = \rho \cdot g \cdot H$$

Ecuación 1.6 Conversión de pérdidas de presión a pérdidas de carga [7].

Donde:

- P : (Pa) presión
- ρ : (kg/m³) densidad
- g : (m/s²) gravedad
- H : (m) carga

Tubo Venturi

Es un dispositivo diseñado para analizar el cambio de velocidad de un fluido incompresible en secciones con diferente área. La Figura 1.2 muestra el aspecto básico de un tubo Venturi. En la sección 1, la velocidad del fluido de la tubería principal aumenta al pasar por la sección estrecha denominada garganta, disminuyendo la presión del fluido. En la sección 1 y sección 2 se ubican tomas de presión que van unidas a los extremos de un manómetro inclinado con el fin de observar la diferencia de presión

$(P_1 - P_2)$. Con la Ecuación 1.7 se calcula el caudal volumétrico utilizando este dispositivo.

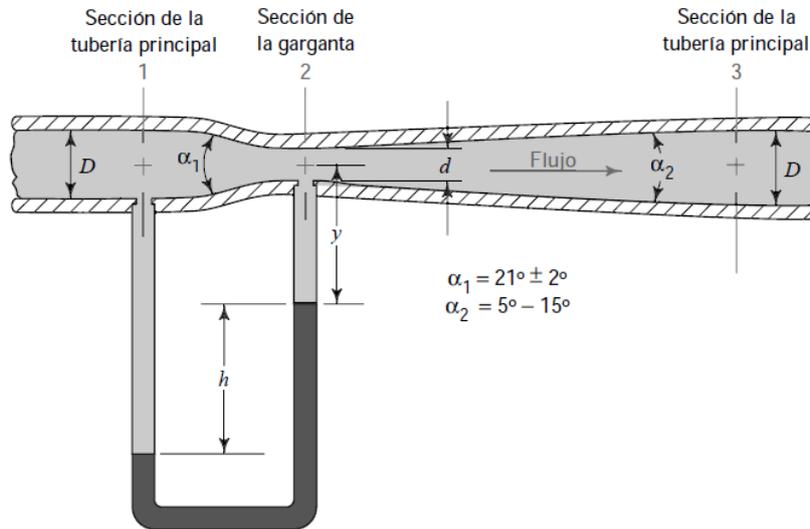


Figura 1.2 Tubo Venturi [10].

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

Ecuación 1.7 Cálculo de caudal por tubo Venturi [10].

Donde:

- Q : (m^3/s) caudal
- C : (0.984) coeficiente de descarga [9]
- A_1 : (m^2) sección de mayor diámetro
- A_2 : (m^2) sección de menor diámetro
- P_1 : (Pa) presión en sección de mayor diámetro
- P_2 : (Pa) presión en sección de menor diámetro
- γ : ($Kg/m^2 \cdot s^2$) peso específico

2 METODOLOGÍA

2.1 Descripción de la metodología usada

El diseño del módulo didáctico para el análisis de una bomba hidráulica y medidores de caudal se basó en un estudio aplicado, teniendo en cuenta la carencia en equipos del Laboratorio de Tecnología Industrial en el área de Fluidos para la Transmisión de Potencia.

Se aplicaron conocimientos adquiridos durante la carrera como: ecuación general de la energía, cálculo del NPSH, estudio de flujo interno en tuberías, cálculo de pérdidas mayores y menores entre otros. Como resultado se obtuvo un módulo didáctico que permitirá al estudiante llevar a la práctica los conocimientos teóricos adquiridos en esta área.

En la Figura 2.1, se observa el esquema de la metodología empleada para el desarrollo del proyecto. Inicialmente, se determinó las características técnicas necesarias para el dimensionamiento del módulo, fue basado en normas, libros de instrumentación, turbomáquinas y mecánica de fluidos para: selección del tipo de bomba, cálculo del NPSH, carga del sistema, pérdidas en tuberías (mayores y menores) y acondicionamiento de sensores.

En base al diseño establecido se realizó los planos esquemáticos del módulo, el cual cuenta con tres tramos que permiten determinar curvas características de la bomba, cálculo del caudal empleando el tubo Venturi y pérdidas mayores en tubería. El diseño se realizó en el software AutoCAD [11] cumpliendo con las normas INEN para dibujo técnico [12].

Se estableció el tipo de bomba, tuberías, elementos de regulación de flujo, accesorios, tanque y el sistema de adquisición de datos para posteriormente ensamblar el módulo.

En cuanto al acondicionamiento de los transductores de presión y caudalímetro se elaboraron los programas utilizando el software Arduino [13]. Además, se realizó la programación necesaria para la visualización de las presiones y caudal medido a través de una pantalla LCD en tiempo real.

Se realizó las pruebas de funcionamiento con el fin de detectar anomalías en el sistema como: ruidos fuera de lo normal, fugas, instrumentación y accesorios funcionales. Para así lograr alcanzar el objetivo del módulo implementado que es el análisis de una bomba hidráulica y medidores de caudal. Finalmente se realizó el manual de uso y

mantenimiento del equipo, se planteó también las hojas guías para las prácticas de laboratorio.

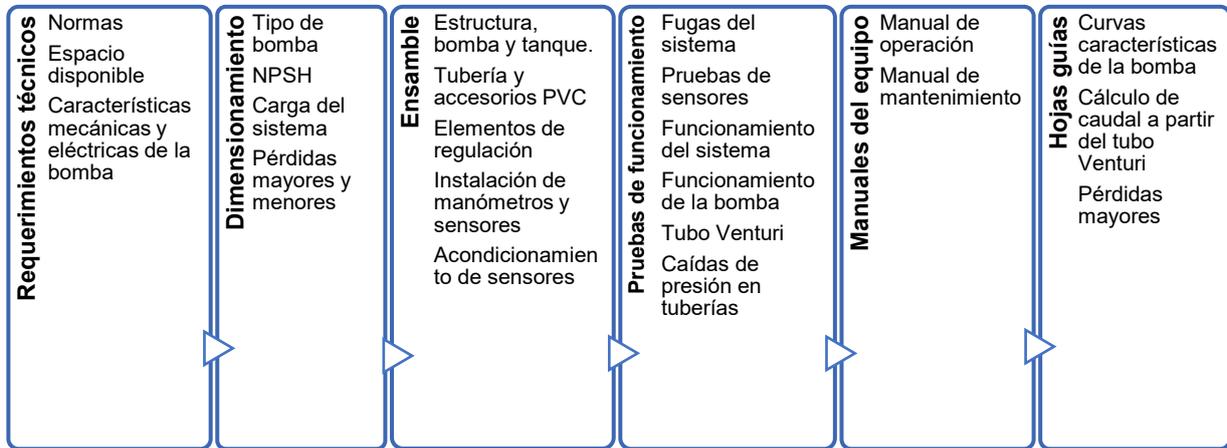


Figura 2.1 Esquema de la metodología.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se construyó un módulo didáctico para el análisis de una bomba hidráulica y medidores de caudal, que cuenta con tres tramos que permitirán determinar: curvas características de la bomba (Tramo A), caudal empleando el tubo Venturi (Tramo B) y pérdidas mayores en tubería PVC de $\frac{1}{2}$ (in) (Tramo C). En la Figura 3.1, se presenta la vista frontal del módulo resaltando los tramos que se ha mencionado.

A continuación, se presenta los requerimientos técnicos, dimensionamiento, ensamble, pruebas de funcionamiento, manuales del equipo (mantenimiento y operación) y finalmente hojas guías para prácticas de laboratorio.

3.1 Requerimientos técnicos del sistema

Tamaño y dimensiones

El módulo se construyó para ser utilizado por 4 estudiantes para evitar la incomodidad por el espacio disponible y mejorar la interacción entre el docente y el alumno. Por lo tanto, se consideró las siguientes dimensiones: 1.72 (m) de altura, 2.35 (m) de largo y 0.56 (m) de ancho. En el Anexo 2, se presenta los planos del módulo, los cuales se realizaron en base a la norma para dibujo técnico (INEN).

Tipo de bomba

El objetivo de un módulo didáctico es representar un proceso o sistema de mayor escala, el cual debe contener elementos para la interacción con el fin de mejorar la enseñanza y aprendizaje práctico. Por esta razón, la bomba que se seleccionó es tipo centrífuga jet, comúnmente empleada a nivel doméstico e industrial en redes de distribución de agua.

Tuberías y accesorios

El módulo cuenta con tres tramos: el tramo A es la línea de descarga directa para analizar el funcionamiento de la bomba, en el tramo B se encuentra el tubo Venturi y en el tramo C hay una tubería PVC de $\frac{1}{2}$ (in) para analizar sus pérdidas mayores. Para variar el caudal y aislar los distintos tramos las válvulas de compuerta son la mejor alternativa, al estar completamente abiertas representan solo el 2.4% de pérdidas de energía que tiene una válvula de globo [7].

Instrumentación

Para cumplir con el objetivo del módulo es necesario conocer los siguientes parámetros: caudal, presión, voltaje y corriente de la bomba. Los transductores miden presión manométrica, se seleccionaron en función de carga hidrostática máxima de la bomba, fluido de trabajo (agua), temperatura de trabajo y tipo de señal de salida (análoga) para comunicarse con el sistema de adquisición de datos. Para corroborar los valores que se obtienen de los transductores se colocó manómetros en puntos estratégicos: líneas de succión, descarga y retorno.

El caudalímetro que se encuentra en la línea de descarga se eligió en función del caudal máximo de la bomba, presión de trabajo, tipo de fluido, temperatura de trabajo y tipo de señal de salida (efecto Hall) para comunicarse con el sistema de adquisición de datos.

3.2 Dimensionamiento del sistema

Los cálculos que se exponen a continuación se realizaron en base al plano previamente diseñado, la Figura 3.1 muestra el aspecto general del módulo y los diferentes tramos que se analizó.

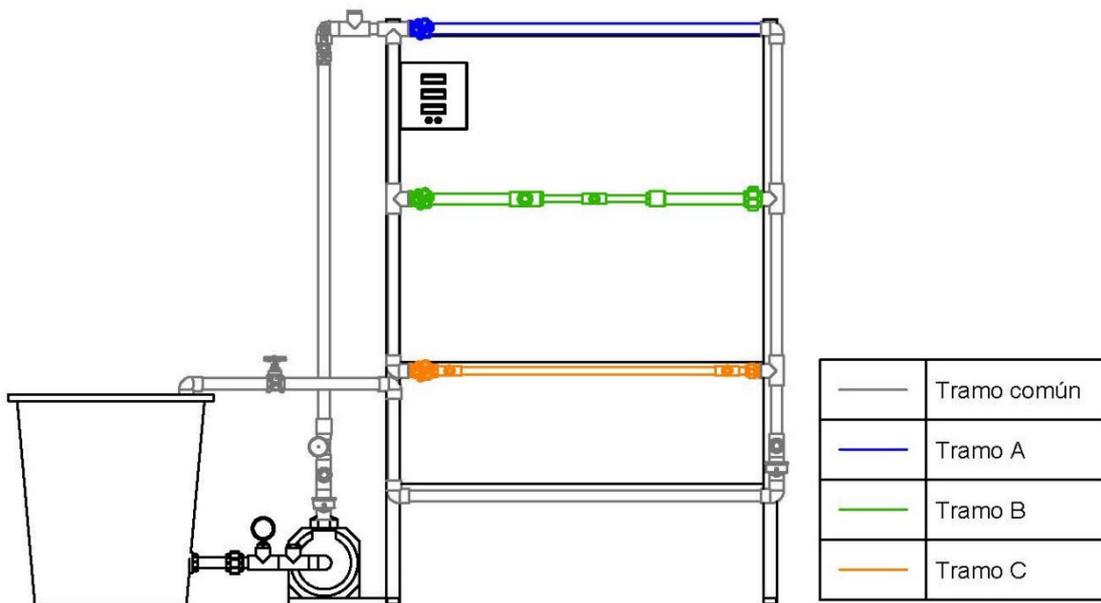


Figura 3.1 Tramos del módulo didáctico.

Carga del sistema

Para determinar la carga en un sistema de bombeo se calcula las pérdidas en tuberías (mayores y menores) y pérdidas por altura como se presenta en la Ecuación 3.1. El valor

que se obtiene debe ser menor al valor de carga máxima dada por el fabricante de la bomba para así cumplir con la demanda del sistema.

$$h_{\text{sistema}} = h_L + h_L' + z$$

Ecuación 3.1 Carga del sistema.

Donde:

- h_L : (m) pérdidas mayores
- h_L' : (m) pérdidas menores
- z : (m) carga por altura

La carga del sistema se analizó para diferentes valores de caudal: 15 (l/min), 30 (l/min), 45 (l/min) y 60 (l/min). A continuación, se presenta un ejemplo de cálculo del tramo A y tablas con los resultados detallados de los tres tramos.

Pérdidas mayores para tramo A

En base a la Ecuación 1.5 se determinó las pérdidas mayores en el sistema.

A continuación, se presenta los cálculos realizados para el valor de caudal 60 (l/min), con el cual se determinó la velocidad del fluido.

$$V = \frac{0.001 \left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)}{\pi \cdot \left[\frac{0.0243 \text{ (m)}}{2}\right]^2} = 2.156 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)$$

Con el valor de velocidad y las propiedades del fluido que se presentan en la Tabla 1.1, se procedió a calcular el número de Reynolds para determinar el tipo de flujo que se encuentra en la tubería.

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot \phi}{\nu}$$

Ecuación 3.2 Número de Reynolds [7].

Donde:

- ρ : (kg/m³) densidad
- V : (m/s) velocidad
- ϕ : (m) diámetro
- ν : (kg/m · s) viscosidad dinámica

El número de Reynolds (Re) y el factor de fricción (f) se grafican sobre escalas logarítmicas debido al amplio rango de valores encontrados. En el Anexo 3, se presenta el diagrama de Moody que se generó a partir de datos experimentales de L. F. Moody [7].

- Para un $Re > 4\ 000$, se considera flujo turbulento y se selecciona la familia de curvas relacionadas con los diferentes valores de rugosidad relativa (ε/ϕ).

$$Re = \frac{997 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \cdot 2.156 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right) \cdot 0.0243 \text{ (m)}}{8.91 \times 10^{-4} \left(\frac{\text{kg} \cdot \text{m}}{\text{s}}\right)} = 58\ 630.19 \rightarrow \text{Flujo turbulento}$$

Para tuberías PVC la rugosidad relativa es cero [8]. Con estos valores se ingresó al diagrama de Moody y al intersecar el número de Reynolds con la curva de rugosidad relativa se tiene que:

$$f = 0.02$$

Empleando la Ecuación 1.5 y con los valores previamente obtenidos se calculó las pérdidas mayores en el tramo A.

$$h_L = 0.02 \cdot \frac{6.40 \text{ (m)}}{0.0243 \text{ (m)}} \cdot \frac{\left[2.156 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)\right]^2}{2 \cdot 9.81 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} = 1.25 \text{ (m)}$$

Pérdidas menores para tramo A

Las pérdidas menores se dan en los accesorios del sistema, se contabilizó el número y tipo de accesorios y se determinó el coeficiente de pérdidas (k) para cada uno como se muestra en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Accesorios del sistema y coeficientes de pérdidas [7].

Accesorios	Cantidad	K	k total
Codos	6	0.9	5.4
Tees	8	0.9	7.2
V. compuerta	2	17	34
V. bola	1	0.05	0.05
Total			46.65

Para determinar las pérdidas menores en el sistema se utiliza la Ecuación 3.3.

$$h_L' = \sum k \cdot \frac{V^2}{2g}$$

Ecuación 3.3 Pérdidas menores [7].

Donde:

- k : coeficiente de pérdida en accesorios
- V : (m/s) velocidad
- g : (m/s²) gravedad

$$h_L' = 46.65 \cdot \frac{\left[2.156 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)\right]^2}{2 \cdot 9.81 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} = 11.05 \text{ (m)}$$

Las pérdidas por altura se miden en metros (m) y representa la distancia que debe vencer la bomba para impulsar el fluido.

$$z = 1.525 \text{ (m)} + 0.365 \text{ (m)} = 1.89 \text{ (m)}$$

Con los valores de pérdidas obtenidos se obtiene que la carga del sistema es:

$$h_{\text{sistema}} = 1.247 \text{ (m)} + 11.05 \text{ (m)} + 1.89 \text{ (m)} = 14.19 \text{ (m)}$$

Resultados obtenidos

Tramo A

En la Tabla 3.2 se muestra las pérdidas en el sistema del tramo A que tiene una longitud de 6.4 (m) y un diámetro interno de 0.0243 (m). Se analizó para diferentes caudales y en todos los casos resulto como flujo turbulento.

Tabla 3.2 Pérdidas en el sistema – Tramo A.

Caudal ($\frac{\text{l}}{\text{min}}$)	Velocidad ($\frac{\text{m}}{\text{s}}$)	Re	f	h_L (m)	k	h_L' (m)	z (m)	h_{sistema} (m)
60	2.16	58 630.19	0.02	1.25	46.65	1.05	1.89	14.19
45	1.62	43 972.64	0.022	0.75	46.65	6.22	1.89	8.86
30	1.08	29 315.09	0.024	0.37	46.65	2.76	1.89	5.03
10	0.36	9 771.70	0.031	0.05	46.65	0.31	1.89	2.25

Tramo B

En la Tabla 3.3, se muestra las pérdidas en el sistema del tramo B que tiene una longitud de 6.09 (m) y un diámetro de 0.0243 (m), mientras en la Tabla 3.8 se presenta las pérdidas en el tubo Venturi, que tiene una longitud de 0.297 (m) y un diámetro de 0.01388 (m). Para obtener la carga del sistema se suman las pérdidas que se dan en la tubería (h_{L1}), en el tubo Venturi (h_{L2}) y la carga por altura (z). En ambos casos, se analizó para diferentes caudales y en todos los resultados se obtuvo flujo turbulento.

Tabla 3.3 Pérdidas en el sistema – Tramo B.

Caudal ($\frac{l}{min}$)	Velocidad ($\frac{m}{s}$)	Re	f	h_L (m)	k	h'_L (m)	h_{L1} 1(in) (m)	z (m)	$h_{sistema}$ (m)
60	2.16	58 630.19	0.02	1.19	52.55	12.45	13.64	1.89	18.30
45	1.62	43 972.64	0.022	0.72	52.55	7.00	7.72	1.89	11.18
30	1.08	29 315.09	0.024	0.36	52.55	3.11	3.47	1.89	6.07
10	0.36	9 771.70	0.031	0.05	52.55	0.35	0.40	1.89	2.37

Tabla 3.4 Pérdidas en el tubo Venturi – Tramo B.

Caudal ($\frac{l}{min}$)	Velocidad ($\frac{m}{s}$)	Re	f	h_L (m)	k	h'_L (m)	h_{L2} 1/2(in)
60	6.61	102 645.07	0.016	0.76	0.9	2.00	2.77
45	4.96	76 983.80	0.017	0.44	0.9	1.13	1.57
30	3.30	51 322.54	0.018	0.21	0.9	1.50	0.71
10	1.10	17 107.51	0.022	0.03	0.9	0.06	0.08

Tramo C

En la Tabla 3.5, se muestra las pérdidas en el sistema del tramo C que tiene una longitud de 5.44 (m) y un diámetro interno de 0.0243 (m), mientras en la Tabla 3.6 se presenta las pérdidas en la reducción de tubería, que tiene una longitud de 0.915 (m) y un diámetro de 0.01388 (m). Para obtener la carga del sistema se suman las pérdidas que se dan en la tubería (h_{L1}), en la reducción (h_{L2}) y carga por altura (z). En ambos casos, se analizó para diferentes caudales y en todos los resultados se obtuvo flujo turbulento.

Tabla 3.5 Pérdidas en el sistema – Tramo C.

Caudal ($\frac{l}{min}$)	Velocidad ($\frac{m}{s}$)	Re	f	h_L (m)	k	h'_L (m)	h_{L1} 1(in) (m)	z (m)	$h_{sistema}$ (m)
60	2.16	58 630.19	0.02	1.06	49.65	11.77	12.83	1.89	21.07
45	1.62	43 972.64	0.022	0.64	49.65	6.62	7.26	1.89	12.77
30	1.08	29 315.09	0.024	0.32	49.65	2.94	3.26	1.89	6.79
10	0.36	9 771.70	0.031	0.05	49.65	0.33	0.37	1.89	2.46

Tabla 3.6 Pérdidas en reducción de tubería – Tramo C.

Caudal ($\frac{l}{min}$)	Velocidad ($\frac{m}{s}$)	Re	f	h_L (m)	k	h'_L (m)	h_{L2} 1/2(in)
60	6.61	102 645.07	0.016	2.35	1.8	4.01	6.36
45	4.96	76 983.80	0.017	1.36	1.8	2.25	3.62
30	3.30	51 322.54	0.018	0.64	1.8	1.00	1.64
10	1.10	17 107.51	0.022	0.09	1.8	0.11	0.20

Selección de la bomba

Se debe tener en cuenta la carga del sistema y caudal para cumplir con la demanda requerida. A continuación, en la Tabla 3.7 se presenta varias alternativas de bombas hidráulicas y en la Tabla 3.8 su respectiva ponderación para la selección.

Tabla 3.7 Comparación de alternativas de bombas hidráulicas.

	Bomba centrífuga 800(W)	Bomba de pistón 1.5(kW)	Bomba centrífuga 10(hp)
Aplicaciones	Versátil, se utiliza a nivel doméstico.	Fluidos a alta presión y/o elevadas viscosidades y densidades.	Versátil, se utiliza a nivel industrial y redes de agua potable.
Carga	40(m)	3.5 a 5(MPa)	40(m)
Caudal	60(l/min)	14 a 18(l/min)	350(l/min)

Tipo de accionamiento	Eléctrico 120(V _{AC}) - 60(Hz)	Motor de combustión interna	Eléctrico 220(V _{AC}) - 60(Hz)
------------------------------	---	--------------------------------	---

Para la ponderación se tiene que: 3 equivale a una calificación alta, 2 una calificación media y 1 una calificación baja.

Tabla 3.8 Ponderación para selección de la bomba.

	Bomba centrífuga 800(W)	Bomba de pistón 1.5(kW)	Bomba centrífuga 10(hp)
Versatilidad	3	2	2
Complejidad	1	2	3
Cumple con el propósito del proyecto	3	1	1
Costo (menor costo, mayor calificación)	3	1	1
Total	10	6	7

Analizando las características técnicas de varios tipos de bombas, se presenta la Tabla 3.8 con su respectiva ponderación en base a los requerimientos que debe cumplir, teniendo como resultado que la mejor opción es la bomba centrífuga de 800(W), ya que es versátil, no hay complejidad en su uso, cumple con el propósito del módulo didáctico y es económicamente viable.

Carga de succión positiva neta (NPSH)

Una vez seleccionado el tipo de bomba para el sistema, se analizó la posición en la que debe ser instalada. Calculando el NPSH_R requerido para una succión positiva y negativa con el fin de comparar con el NPSH_A disponible dado por el fabricante para tomar la mejor opción y evitar la cavitación.

$$NPSH_A > NPSH_R$$

Succión positiva

Si la bomba se encuentra ubicada por debajo del depósito, se habla de una succión positiva donde en la Ecuación 1.4, h_s es positivo [8].

Carga de presión estática (h_{sp})

$$h_{sp} = \frac{P_{abs}}{\gamma}$$

Ecuación 3.4 Carga de presión estática [8].

Donde:

- P_{abs} : (Pa) presión absoluta
 γ : ($\text{kg}/\text{m}^3 \cdot \text{s}^2$) peso específico

$$h_{ps} = \frac{71940 \text{ (Pa)} - 0 \text{ (Pa)}}{997 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \cdot 9.81 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} = 7.35 \text{ (m)}$$

Diferencia de elevación (h_s)

$$h_s = 0.42 \text{ (m)}$$

Pérdidas de energía mayores y menores en la succión (h_L)

Para determinar las pérdidas menores en la succión, se contabiliza los accesorios como se muestra en la Tabla 3.9.

Tabla 3.9 Accesorios en la línea de succión.

Accesorios	Cantidad	k	k Total
Codos	1	0.9	0.9
Tees	2	0.9	1.8
Filtro	1	8.4	8.4
Total			11.1

$$h_L = 0.02 \cdot \frac{0.49 \text{ (m)}}{0.0243 \text{ (m)}} \cdot \frac{\left[2.156 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)\right]^2}{2 \cdot 9.81 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} + 11.1 \cdot \frac{\left[2.156 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)\right]^2}{2 \cdot 9.81 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} = 2.73 \text{ (m)}$$

Carga de presión de vapor del líquido (h_{vp})

$$h_{vp} = 0.336 \text{ (m) a } 25 \text{ (}^\circ\text{C)}$$

El valor de h_{vp} se tomó de la Tabla 1.1.

Finalmente se obtuvo el valor del $NPSH_R$ para una succión positiva.

$$NPSH_R = 7.35 \text{ (m)} + 0.42 \text{ (m)} - 2.73 \text{ (m)} - 0.336 \text{ (m)} = 4.704 \text{ (m)}$$

Se calculó el $NPSH_R$ para una succión negativa, obteniendo el valor de 4.084 (m). El valor máximo de $NPSH_A$ disponible dado por el fabricante de la bomba seleccionada es 8 (m).

Se analizó los valores obtenidos de $NPSH_R$ para una succión negativa y positiva, como resultado se tiene que la mejor opción es que la bomba se encuentre por debajo del depósito (succión positiva) para evitar la cavitación.

Sensor de caudal FS400A G1

Uno de los parámetros a medir es el caudal, para dicho propósito se empleó un caudalímetro tipo turbina con las siguientes características (Tabla 3.10). Su cuerpo es de plástico, cuenta con un rotor y un sensor de efecto hall. Al atravesar el fluido gira el rotor y el sensor magnético registra los pulsos generados a cierta frecuencia y en base a los cuales se puede calcular el flujo volumétrico existente en la tubería.

Tabla 3.10 Características técnicas sensor FS400A G1.

Rango de trabajo	0 – 60 (l/min)
Fluido de trabajo	Agua
Temperatura de trabajo	-25 (°C) a 80 (°C)
Señal de salida	Digital
Presión máxima de agua	1.2 (MPa)
Fabricación	Plástico color negro

Sensor de presión HK3022

La principal aplicación de este transductor es la medición de presión manométrica en tuberías. Se tiene una salida analógica de 0.5 (V_{DC}) para 0 (MPa) hasta 4.5 (V_{DC}) para 0.5 (MPa). A continuación, se presenta la Tabla 3.11 donde se expone las características técnicas de este transductor.

Tabla 3.11 Características técnicas del transductor HK3022.

Rango de presión	0 a 0.5 (MPa)
Fluido de trabajo	Gas, Aire comprimido, Agua, Aceite
Temperatura de trabajo	0 a 85 (°C)
Señal de salida	Analógico
Fabricación	Acero inoxidable para asegurar robustez, sanidad y duración.

3.3 Ensamble del sistema

En la Figura 3.2, se muestra el sistema dimensionado con los diferentes componentes que lo conforman: tuberías PVC con sus respectivos accesorios para el acople, elementos de regulación y los transductores con su respectivo sistema para la adquisición de datos. Detalles más específicos se encuentran en el Anexo 2.

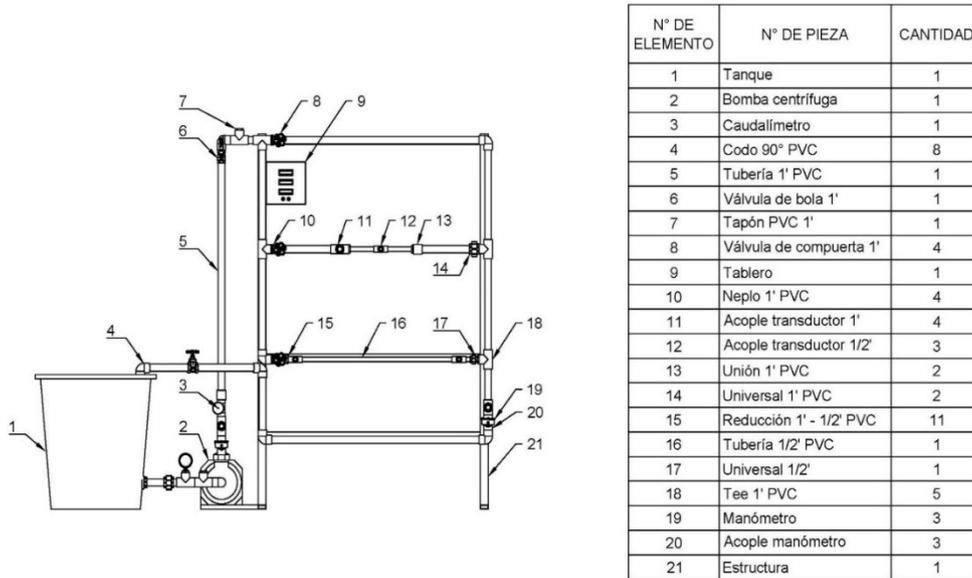


Figura 3.2 Esquema del módulo didáctico.

Estructura, bomba y tanque

La estructura del módulo es de acero y se fijó con soldadura por arco eléctrico (SMAW) y electrodos E6011. Para la división de los tramos se empleó tubo cuadrado de 2 x 2 (cm), mientras que para la base de la estructura se utilizó tubo rectangular de 2 x 4 (cm). La bomba se fijó en la base de la estructura con pernos y la tubería PVC esta fija en todo el perfil de la estructura con abrazaderas metálicas y plásticas. En la Figura 3.3, se presenta la estructura, posicionamiento de la bomba, tanque, tuberías y tablero.



Figura 3.3 Módulo didáctico.

En base al $NPSH_R$ calculado se tiene que para evitar la cavitación la mejor alternativa es instalar la bomba para una succión positiva, es decir, el nivel del agua está por encima de la succión de la bomba. En la Figura 3.4, se observa la posición de la bomba en el módulo.



Figura 3.4 Posición de bomba (succión positiva).

El tanque instalado es de 60 (l) y de material plástico, con lo cual se asegura que la bomba tenga el suficiente suministro de agua para su máxima capacidad de caudal, no llegue a trabajar en vacío, no exista corrosión y desprendimiento de material que podría afectar en la succión de la bomba. Para conectar la línea de succión con el tanque, se realizó un acople usando uniones roscadas, en la parte interna del tanque se encuentra

una válvula de pie que sirve para la filtración y cebado de la bomba como se muestra en la Figura 3.5.



Figura 3.5 Válvula de pie.

Tuberías y accesorios PVC

Se empleó tubería PVC de 1 (in) y $\frac{1}{2}$ (in) roscable. Para el acople se utilizó accesorios PVC como tees, codos de 90°, universales, neplos, reducciones súbitas concéntricas, uniones y tapones. Con el fin de evitar fugas se ensambló estos elementos con permatex y teflón como se muestra en la Figura 3.6.



Figura 3.6 Unión de tuberías y accesorios PVC.

En la Figura 3.1, se presenta el esquema del módulo implementado resaltado con los tres tramos que lo conforman. A continuación, se describe los materiales empleados.

En la Figura 3.7, se muestra el tramo A que está conformado por tubería PVC de 1 (in) y una válvula de compuerta para obtener las curvas características de la bomba centrífuga.



Figura 3.7 Tramo A.

En el tramo B, se encuentra el tubo Venturi el cual está elaborado con tubería PVC de 1 (in) y $\frac{1}{2}$ (in), una tee de $\frac{1}{2}$ (in) y una tee de 1 (in), dos reducciones súbitas concéntricas, una unión de 1 (in), una universal y una válvula de compuerta situada al inicio del tramo para la variación del caudal como se muestra en la Figura 3.8.



Figura 3.8 Tramo B.

En el tramo C, se encuentra la reducción de tubería de 1 (in) a $\frac{1}{2}$ (in), en la Figura 3.9, se presenta los elementos que lo conforman como una válvula de compuerta, dos tees de $\frac{1}{2}$ (in), dos reducciones súbitas concéntricas y una universal de $\frac{1}{2}$ (in). Este tramo permite obtener la caída de presión en tubería PVC.



Figura 3.9 Tramo C.

Elementos de regulación

En el inicio de cada tramo y en la línea de retorno se colocó una válvula de compuerta roscable de 1 (in) para el aislamiento respecto a los otros tramos y permitir la variación del caudal. En la línea de descarga se encuentra una válvula de bola para el control de paso del fluido. En la Figura 3.10, se muestra la ubicación de las válvulas en el módulo.

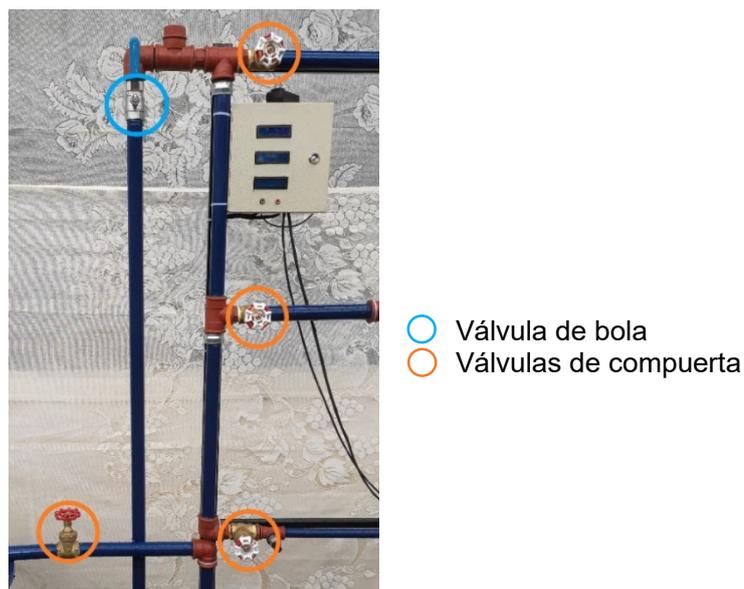


Figura 3.10 Válvulas para control de flujo.

Instalación de manómetros y sensores

El módulo cuenta con acoples para los transductores de presión y manómetros, en tubería de 1 (in) los acoples constan de una tee de 1 (in) y una reducción de 1 (in) a ½ (in), mientras que para tubería de ½ (in) el acople cuenta con una tee de ½ (in). En la Figura 3.11, se observa la ubicación de los manómetros y los diferentes puntos de acople para los transductores de presión.

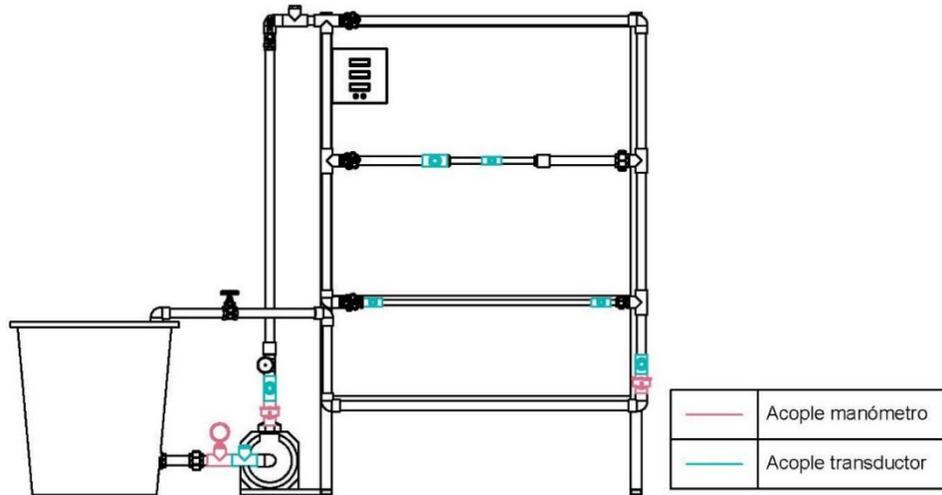


Figura 3.11 Acoples para manómetros y transductores de presión del módulo.

En los acoples de los manómetros existe un buje metálico de ½ (in) a ¼ (in) que permite fijarlo. Por otro lado, para la conexión de los transductores de presión se fijó un buje metálico de ½ (in) a ¼ (in) al cuerpo del transductor con su respectiva arandela de goma para evitar la fuga de agua por la presión, facilitando la conexión y desconexión. En la Figura 3.12, se muestra los tipos de acoples realizados.



Figura 3.12 Acoples para manómetro y transductores de presión.

El caudalímetro está ubicado en la línea de descarga de la bomba, se lo instaló con la ayuda de dos uniones roscables de 1 (in) directamente a la tubería como se muestra en la Figura 3.13.



Figura 3.13 Ubicación de caudalímetro.

El sistema de adquisición de datos es Arduino, la visualización de los valores medidos por los sensores se observa en pantallas LCD. Los diagramas eléctricos para la conexión de los sensores y las pantallas LCDs se observan en la Figura 3.14 y Figura 3.15.

Para obtener los parámetros eléctricos como voltaje y corriente, el tablero cuenta con dos borneras para una medición directa del valor de voltaje empleando un multímetro, por otro lado, para obtener el valor de corriente se emplea una pinza amperimétrica en la línea de alimentación de la bomba.

En la Figura 3.16, se muestra la ubicación de los Arduinos, la posición de las pantallas LCD y borneras en el tablero eléctrico.

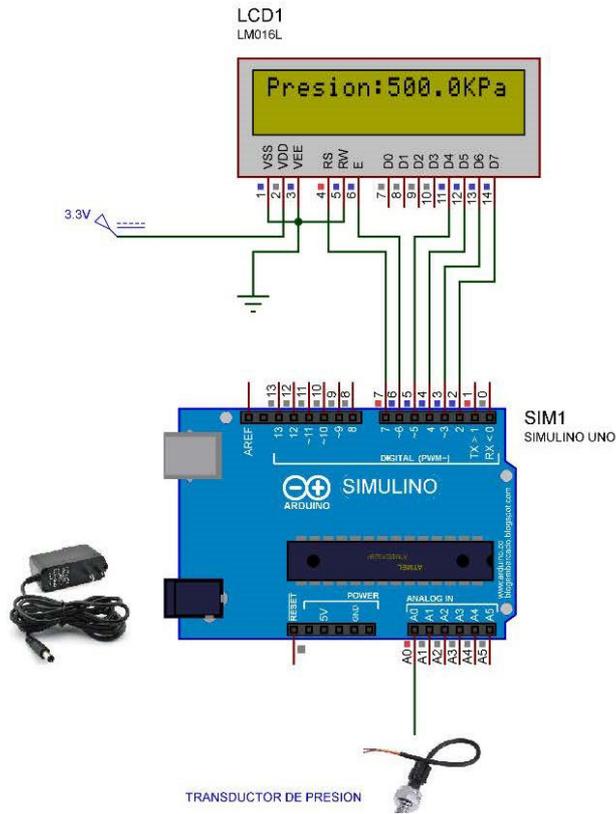


Figura 3.14 Diagrama eléctrico para transductor de presión.

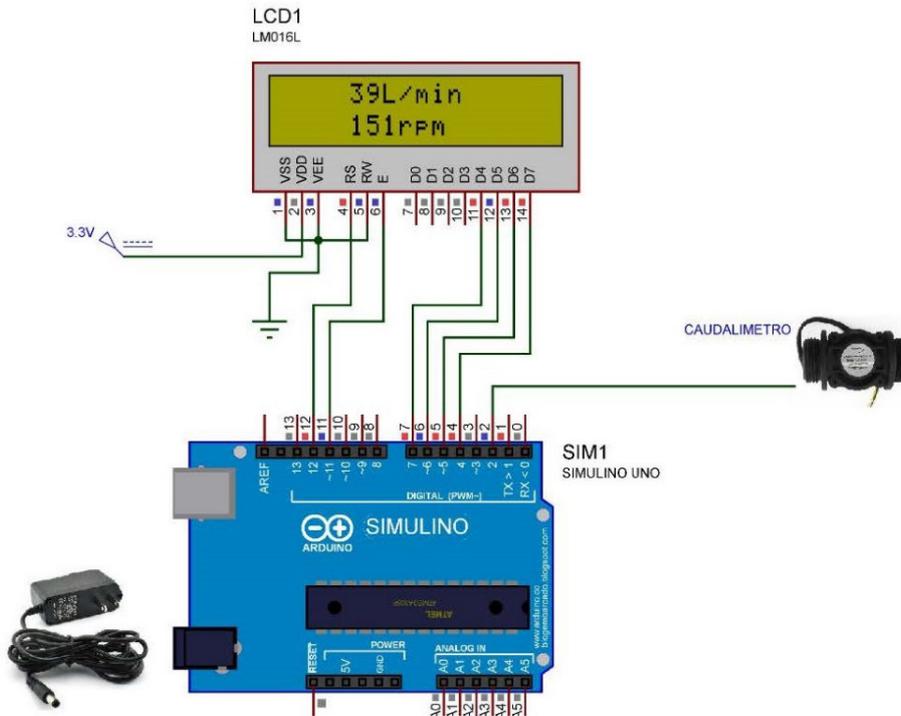


Figura 3.15 Diagrama eléctrico para caudalímetro.



(a)



(b)

Figura 3.16 Tablero vista externa (a) y vista interna (b).

Acondicionamiento de sensores

Acondicionamiento del caudalímetro

Para el acondicionamiento del caudalímetro, se realizó el algoritmo en Arduino, el microcontrolador está programado para procesar la señal que envía este sensor de flujo y mostrar los datos de las mediciones de caudal en el LCD.

La señal generada por el sensor de flujo tiene una frecuencia que varía en función de las revoluciones del rotor, para obtener el valor de caudal se aplica la Ecuación 3.5, donde (k) es el factor de conversión que provee el fabricante, este factor se lo calibró mediante un método experimental para tener el valor real de caudal que suministra la bomba, que fue comprobado de forma experimental.

$$Q = \frac{\text{\#pulsos}}{k}$$

Ecuación 3.5 Conversión de caudal.

Donde:

- #pulso : Revoluciones del rotor
- k : Factor de conversión

Acondicionamiento de transductores de presión

Para el acondicionamiento de los transductores de presión se realizó el algoritmo en Arduino, el microcontrolador está programado para procesar la señal que envía estos transductores y mostrar los datos de las mediciones de presión en los LCDs.

La señal análoga de salida de los transductores es de $0.5 (V_{DC})$ a $4.5 (V_{DC})$ que representan los valores de 0 (MPa) a 0.5 (MPa).

3.4 Pruebas y Análisis de Resultados

Una vez implementado el módulo didáctico y desarrollado la programación para los respectivos sensores, se procedió a realizar pruebas de funcionamiento con el fin de detectar anomalías y corregirlas en caso de ser necesario.

Fugas del sistema

Esta prueba se realizó con el fin de detectar fugas de agua en las uniones y acoples de la tubería PVC. Se sometió al sistema a una elevada presión utilizando la bomba y variando el caudal para determinar a través de inspecciones visuales posibles filtraciones en el módulo.

Para corregir las fugas presentadas en los acoples, se ajustó la reducción y se colocó arandelas de goma en los tapones de los puntos de conexión para los transductores de presión como se observa en la Figura 3.17.



Figura 3.17 Corrección de fugas en acoples.

En la Tabla 3.12, se observa los resultados de esta prueba antes y después de haber realizado las correcciones respectivas.

Tabla 3.12 Resultados obtenidos en la prueba de fugas del sistema.

Sección de sistema	Presentó filtraciones (19/12/2020)	Presenta filtraciones (09/01/2021)
Línea de succión	NO	NO
Línea de descarga	SI	NO
Línea de retorno	NO	NO
Tramo A	NO	NO
Tramo B	SI	NO
Tramo C	SI	NO

Pruebas de sensores

Transductores de presión y manómetros

Con la programación realizada, se procedió a observar el comportamiento del sistema de adquisición de datos. Inicialmente la programación estaba diseñada para observar los valores medidos por los transductores de presión en tiempo real. Se observó que la dispersión entre los valores medidos era grande, lo cual es comprensible porque se trabaja con un flujo turbulento y no tiene un comportamiento estable.

Para reducir la dispersión de valores medidos y mejorar la toma de datos, en el algoritmo de programación se hizo el promedio de 500 datos, cada uno tomados en 10 (ms). Este valor promedio se muestra en la pantalla LCD cada 5 (s) y se confirmó visualizando el valor de presión en los manómetros.



(a)



(b)

Figura 3.18 Manómetro (a) y pantalla LCD de traductor de presión (b) colocados en la línea de descarga.

Como se observa en la Figura 3.18, tanto el valor mostrado por el manómetro de 1 (bar) = 100 (kPa) y la pantalla LCD de 99.9 (kPa) se asemejan, corroborando así el funcionamiento correcto del sistema de adquisición de datos.

Caudalímetro

Inicialmente la programación se realizó con el factor de conversión ($k = 4.8$) entregado por el fabricante, en la pantalla LCD se observó que para una descarga libre el valor de caudal era de 49 (l/min), para corroborar que este valor es el que suministra la bomba se procedió a comprobar con un método experimental para determinar el caudal.

Este método consiste en determinar el volumen consumido en un determinado tiempo, se empleó un cronómetro y un recipiente graduado en litros, con lo que se obtuvo que la bomba suministra 43 (l/min) cuando la válvula de compuerta está totalmente abierta. Se procedió a calibrar el factor de conversión ($k = 4.45$) en la programación para obtener el valor real de caudal.

Funcionamiento del sistema

Para verificar el correcto funcionamiento de las válvulas se debe observar la variación de caudal y el incremento de presión. En la Tabla 3.13, se observa los resultados de esta prueba, obteniendo resultados satisfactorios.

Tabla 3.13 Resultados obtenidos en la prueba de funcionamiento del sistema.

Posición válvula	Funcionamiento independiente	Regulación de caudal
Tramo A	SI	SI
Tramo B	SI	SI
Tramo C	SI	SI
Línea de descarga	SI	SI
Línea de retorno	SI	SI

Funcionamiento de la bomba

Esta prueba se realizó para comprobar la existencia de sonidos y vibraciones anormales, una vez instalada en la base de la estructura y conectada al sistema de tuberías se procedió a obtener las curvas características de la bomba para comparar con la curva entregada por el fabricante.

Para obtener las curvas características de la bomba se debe variar el caudal desde una descarga libre hasta una descarga bloqueada del tramo A, registrando los valores de caudal, presión, corriente y voltaje.

Curva característica (H vs Q)

Con la ayuda de la válvula de compuerta del tramo A se varía el caudal a diferentes valores y se registra el dato de presión en la línea de descarga de la bomba. Para graficar la curva característica y poderla comparar es necesario la transformación de presión (P) a carga hidrostática (H) empleando la Ecuación 1.6. En la Tabla 3.14, se presenta los resultados obtenidos en esta prueba y en la Figura 3.19, se compara la curva obtenida con la entregada por el fabricante. A continuación, se presenta un ejemplo de cálculo para obtener un punto de la curva.

Se registró los valores de succión -6 (kPa) y descarga 95.8 (kPa) para un caudal de 42 (l/min), obteniendo un diferencial de presión de 101.8 (kPa) para posteriormente convertir a unidades de carga hidrostática como se observa en la Ecuación 3.6.

$$h_L = \frac{101\,800 \text{ (Pa)}}{9\,780.57 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2\text{s}^2}\right)} = 9.79 \text{ (m)}$$

Ecuación 3.6 Conversión de unidades.

Tabla 3.14 Datos obtenidos para gráfica curva característica (H vs Q).

Caudal ($\frac{\text{l}}{\text{min}}$)	Carga hidrostática (m)
42	9.79
37	18.53
32	21.20
27	22.62
22	25.78
17	28.14
12	31.97
7	34.70
2	38.36

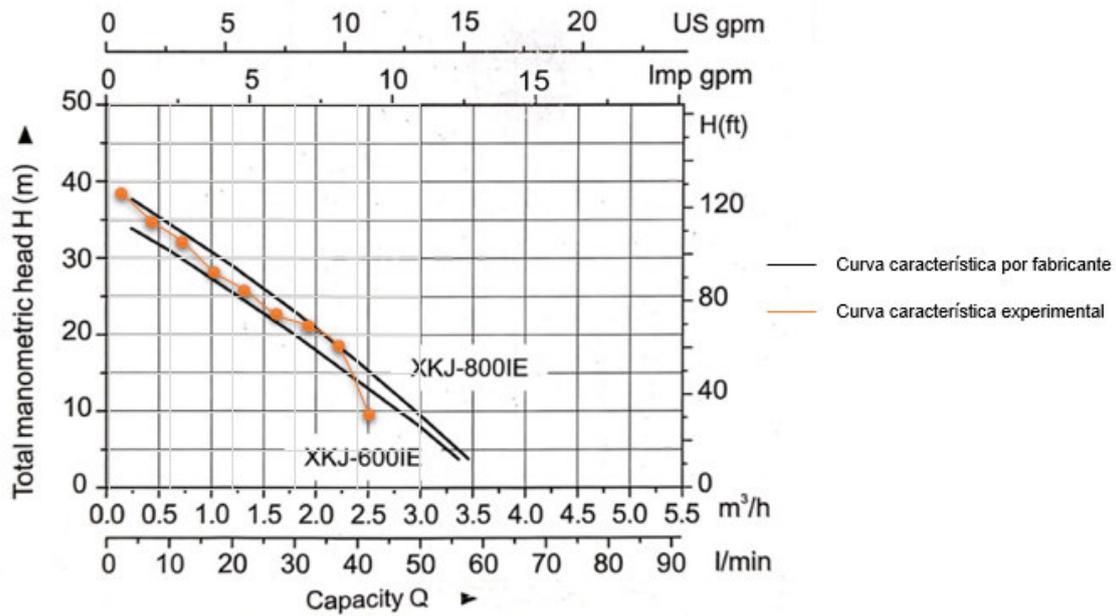


Figura 3.19 Curva característica de la bomba por el fabricante y obtenida de forma experimental.

Se observa en la Figura 3.19, que la curva obtenida de forma experimental tiene la misma tendencia que la curva dada por el fabricante para la bomba XKJ-800IE, por lo que se concluye que la bomba está trabajando de forma adecuada.

Curva característica (η vs Q)

Para determinar la curva característica (η vs Q) se sigue el mismo procedimiento de obtención de la curva (H vs Q) pero adicionalmente se registran los valores de presión en la succión, corriente y voltaje para cada variación de caudal. La Ecuación 3.7, permite determinar la eficiencia de la bomba.

$$\eta = \frac{P_A}{P_I}$$

Ecuación 3.7 Eficiencia de la bomba.

Donde:

- P_A : (W) potencia suministrada al fluido
- P_I : (W) potencia eléctrica suministrada a la bomba

Con los valores registrados de voltaje y corriente para cada variación de caudal y utilizando la Ecuación 3.8, se obtiene la potencia eléctrica suministrada a la bomba (P_I).

$$P_I = V \cdot I \cdot fp$$

Ecuación 3.8 Potencia suministrada a la bomba.

Donde:

- V : (V) potencia suministrada al fluido
- I : (A) potencia eléctrica suministrada a la bomba
- fp : (0.95) factor de potencia

Para determinar la potencia suministrada al fluido (Ecuación 3.9) se emplea la diferencia de presión entre la succión y descarga de la bomba, caudal y propiedades del fluido

$$P_A = H_A \cdot \gamma \cdot Q$$

Ecuación 3.9 Potencia suministrada al fluido.

Donde:

- H_A : (m) energía transmitida al fluido por unidad de fuerza
- γ : (kg/m² · s²) peso específico
- Q : (m³/s) caudal

En la Tabla 3.15, se presenta los valores obtenidos para graficar la curva característica (η vs Q) y en la Figura 3.20, se muestra la gráfica generada.

Tabla 3.15 Datos obtenidos para gráfica curva característica (η vs Q).

Caudal ($\frac{l}{min}$)	Eficiencia (η)
42	0.110
37	0.176
32	0.176
27	0.161
22	0.150
17	0.127
12	0.102
7	0.065
2	0.021

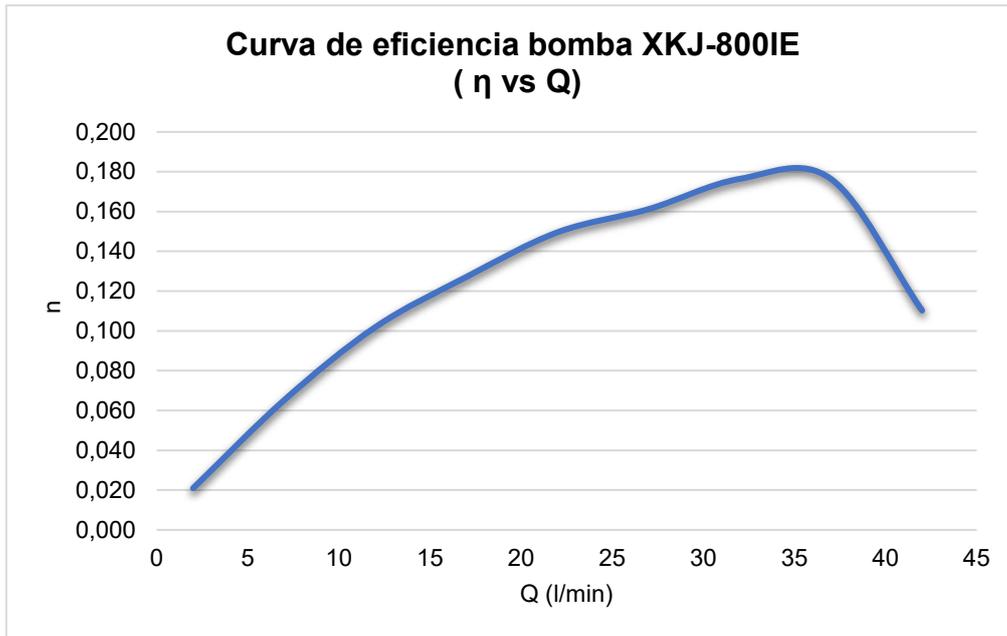


Figura 3.20 Curva característica (η vs Q).

En la Figura 3.20, se observa que el punto de mayor eficiencia es a un valor de caudal de 32 (l/min), a partir de este punto la curva empieza a decrecer. El perfil de la curva (η vs Q) si corresponde al comportamiento reportado en la bibliografía [7]. Además, los valores de eficiencia son bajos debido a que es una bomba pequeña (1hp).

Tubo Venturi

La prueba se realizó para determinar el caudal empleando el tubo Venturi y la Ecuación 1.7, se compara el valor obtenido con el valor que se muestra en el LCD proveniente del caudalímetro. Se colocó el transductor A en la en la sección de mayor diámetro y el transductor B en la sección de menor diámetro del tramo B como se indica en la Figura 3.21.



Figura 3.21 Conexión de transductores de presión en tubo Venturi.

Se aseguró que las válvulas de compuerta de los tramos A y C estén completamente cerradas. Con la válvula ubicada en el tramo B se varía el caudal suministrado por la bomba y se procedió a tomar los valores de presión antes y después del estrechamiento del tubo Venturi. La Tabla 3.16, muestra los resultados y error obtenidos de la prueba.

Tabla 3.16 Resultados de la prueba en tubo Venturi.

Caudal sensor $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)$	Caudal tubo Venturi $\left(\frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right)$	Error (%)
0.0007	0.000828	18.39
0.0005	0.000619	23.81
0.00033	0.000423	26.98

Con los resultados obtenidos en la Tabla 3.16, se observa que a menor valor de caudal el error incrementa debido a la alta sensibilidad que se tiene al trabajar con bajos valores del número de Reynolds en un flujo turbulento, el mayor error obtenido de esta prueba es de 26.98 %, mientras que para valores altos de caudal el error es menor al 18.39 %.

Caídas de presión en tuberías

Esta prueba se realizó para determinar la caída de presión en una tubería PVC $\frac{1}{2}$ (in) en el tramo C, se compara el valor obtenido de forma experimental con el valor teórico determinado a partir de la Ecuación 1.5. Se colocó los transductores A y B en el inicio y final de la tubería del tramo C como se observa en la Figura 3.22.



Figura 3.22 Conexión de transductores de presión en tramo C.

Se aseguró que las válvulas de compuerta de los tramos A y B estén completamente cerradas. Con la válvula ubicada en el tramo C se varía el caudal suministrado por la bomba y se procedió a tomar los valores de presión al inicio y final de la tubería de $\frac{1}{2}$ (in). La Tabla 3.17, muestra los resultados y error obtenidos de la prueba. A continuación, se presenta un ejemplo de cálculo para obtener la caída de presión experimental y teórica.

Se registró los valores de presión al inicio 56 (kPa) y final 43 (kPa) de la tubería de ½ (in) para un valor de caudal de 42 (l/min). Para el método experimental se registra el diferencial de presión 13 (kPa) y empleando la Ecuación 3.10 se hace la transformación a unidad de carga hidrostática como se muestra a continuación.

$$h_{L,exp} = \frac{13\,000 \text{ (Pa)}}{9\,780.57 \left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}^2}\right)} = 1.33 \text{ (m)}$$

Ecuación 3.10 Conversión de unidades.

Para el método teórico, se determinó el número de Reynolds ($Re = 71\,891.73$) con este valor y rugosidad relativa (0 para PVC) se obtiene el factor de fricción ($f = 0.019$). Empleando la Ecuación 1.5 se calcula las pérdidas mayores en el tramo C como se muestra a continuación.

$$h_{L,teórico} = 0.019 \cdot \frac{0.915 \text{ (m)}}{0.01388 \text{ (m)}} \cdot \frac{\left[4.62 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}}\right)\right]^2}{2 \cdot 9.81 \left(\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right)} = 1.37 \text{ (m)}$$

Ecuación 3.11 Pérdidas mayores en tuberías PVC ½ (in).

Tabla 3.17 Resultados de la prueba de caída de presión en tubería de ½ (in).

Caudal $\left(\frac{\text{l}}{\text{min}}\right)$	h_L experimental (m)	h_L teórico (m)	Error (%)
42	1.33	1.37	2.79
34	1.02	0.94	7.82
26	0.73	0.58	20.28
18	0.62	0.30	51.29
10	0.20	0.11	48.17

En la Tabla 3.17, se observa que los errores son altos para valores de caudales bajos debido a que al obtener el valor de (h_L) experimental se trabaja con un flujo turbulento y la reducción súbita de tubería complica la obtención de datos más exactos. En la Figura 3.23, se presenta la gráfica de las pérdidas teóricas y experimentales, se observa que existe una tendencia similar a pesar del error numérico generado para cada dato.

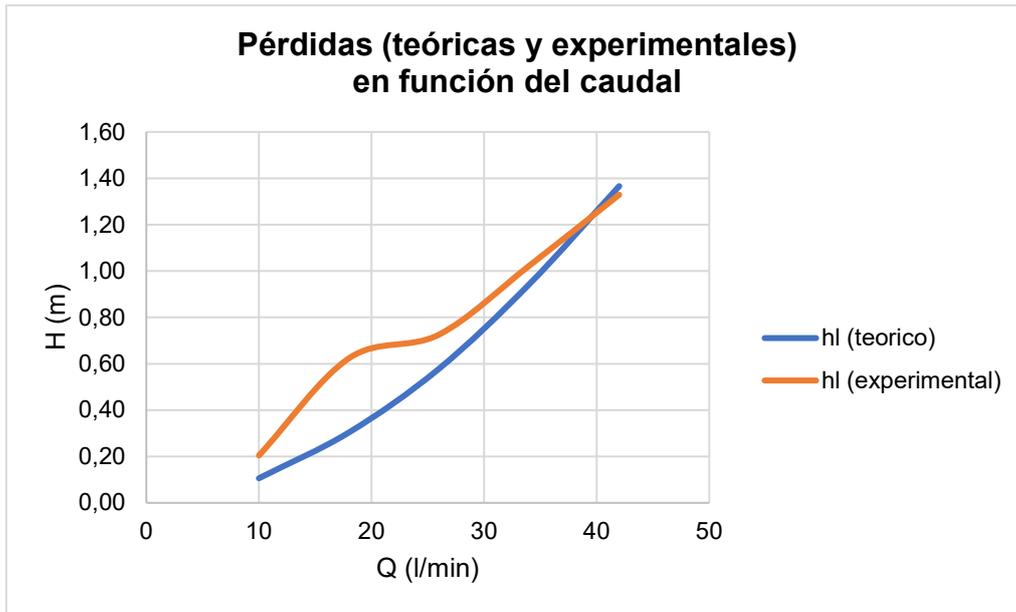


Figura 3.23 Gráfica de pérdidas teóricas y experimentales.

3.5 Manual de Uso y Mantenimiento

Para facilitar el uso del módulo didáctico para el análisis de una bomba hidráulica y medidores de caudal se realizaron dos videos explicativos del manual de uso y manual de mantenimiento, a los cuales se puede acceder con los siguientes códigos QR de la Figura 3.24 y Figura 3.25



Figura 3.24 Manual de uso.



Figura 3.25 Manual de mantenimiento.

Adicionalmente en el Anexo 4, se presenta el manual de uso y mantenimiento en formato escrito.

3.6 Hojas guías

Las hojas guías se desarrollaron para que el estudiante pueda analizar el funcionamiento de una bomba hidráulica y medidores de caudal. El módulo cuenta con tres tramos que permitirán obtener curvas características de la bomba, medición de caudal por tubo Venturi y pérdida por fricción en tubería PVC.

Curvas características de una bomba centrífuga

El objetivo de la práctica 1, es obtener experimentalmente las curvas características de una bomba centrífuga (H vs Q) y (η vs Q) con el fin de que el estudiante observe la relación entre la carga hidrostática, eficiencia y caudal de una bomba.

En el Anexo 5, se presenta a detalle la hoja guía 1 realizada.

Tubo Venturi

El objetivo de la práctica 2, es determinar experimentalmente el caudal (Q) de agua que atraviesa por el tubo Venturi en función del diferencial de presión (ΔP) entre las dos secciones de diferente área que lo conforman, para comparar con el valor obtenido por el caudalímetro electrónico.

En el Anexo 5, se presenta a detalle la hoja guía 2 realizada.

Pérdidas por fricción en tubería PVC

El objetivo de la práctica 3, es determinar experimentalmente la pérdida de presión por fricción de un fluido incompresible que circula por una tubería circular PVC de $\frac{1}{2}$ (in), para comparar con el valor obtenido de forma teórica.

En el Anexo 5, se presenta a detalle la hoja guía 3 realizada.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- El módulo se construyó para ser utilizado por varios estudiantes, permite analizar el funcionamiento de una bomba hidráulica y medidores de caudal, por su tamaño mejora la interacción entre el docente y el alumno, además, refuerza los conocimientos teóricos adquiridos por el estudiante.
- En el dimensionamiento del sistema se determinó las pérdidas mayores y menores en base a un esquema realizado del módulo para obtener el valor de la carga hidrostática a la que está sometida la bomba centrífuga seleccionada, obteniendo que los valores calculados no superan la carga hidrostática dada por el fabricante de la bomba $H = 40$ (m). Por ejemplo, en el tramo C la carga hidrostática máxima es de 21.07 (m).
- En base al $NPSH_R$, se determinó los valores para una succión positiva y negativa de la bomba concluyendo que la mejor opción es posicionar la bomba por debajo del nivel del tanque para evitar la cavitación con un $NPSH_R = 4.704$ (m) y cumplir con la carga máxima de succión entregada por el fabricante que es de 8 (m).
- La instalación de manómetros permite corroborar los valores obtenidos por los transductores de presión desde una descarga libre hasta una descarga totalmente bloqueada.
- En el sistema de visualización de datos se utiliza Arduino ya que la programación es bastante intuitiva y fácil de manejar para el acondicionamiento de la instrumentación empleada como son: caudalímetro y transductores de presión.
- Se determinó las curvas características de la bomba de forma experimental obteniendo similitudes a las curvas dadas por el fabricante y la bibliografía empleada, concluyendo que existe un correcto funcionamiento del módulo implementado y de la bomba.
- Con el tubo Venturi se determina el caudal observando que a menores valores el error incrementa debido a la alta sensibilidad que existe al trabajar con bajos valores del número de Reynolds (R_e) en un flujo turbulento, como resultado el mayor error obtenido es de 26.98 % para un caudal de 20 (l/min) mientras que, para valores altos de caudal, 42 (l/min), el error es de 18.39 %.
- Al determinar las pérdidas por fricción en el tramo C, se observó que los errores son altos debido a que se trabaja con un flujo turbulento y que existe una reducción súbita en la tubería complicando la obtención de datos exactos, con

los valores obtenidos de forma experimental y teórica se realizó una comparación y se generó una gráfica, observando que existe una tendencia cuantitativa similar pese al error que se crea al realizar esta comparación, ya que los valores teóricos dependen de datos experimentales ya realizados y de un correcto análisis en cuanto a pérdidas por fricción en tuberías.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda utilizar agua limpia como fluido de trabajo, ya que el módulo está diseñado para trabajar con este insumo, si existe un cambio de fluido de trabajo el sistema de adquisición de datos mostrará errores en la medición de caudal y presión.
- En la toma de valores de presión, se recomienda esperar a que el sistema se estabilice y tomar la moda de los valores que se presentan para reducir el error en los cálculos a realizar.
- Una vez finalizado el uso del módulo, se debe limpiar y colocar los tapones en los respectivos orificios para evitar acumulaciones de polvo o sedimentos que afecten en el funcionamiento del mismo y la medición.
- Para usar el módulo se debe tener en cuenta el manual de uso y mantenimiento para prevenir daños irreparables y obtener un correcto funcionamiento.
- En caso de futuras mejoras, el módulo cuenta con una tee para la derivación de tubería para la implementación de algún otro tipo de sistema que complemente el área de aprendizaje para la cual está destinado este módulo.
- Se debe roscar y desenroscar correctamente el buje metálico de los transductores de presión en los acoples respectivos para obtener una correcta medición de presión, adicionalmente se evita dañar el roscado de los puntos de conexión para transductores.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] D. Díaz Herrera, “La didáctica universitaria: referencia imprescindible para una enseñanza de calidad,” *Rev. electrónica Interuniv. Form. del Profr.*, vol. 2, no. 1, p. 7, 1999.
- [2] M. I. A. Pedro, L. Medina, M. I. G. H. Saba, M. S. I. J. Hernández, M. C. E. Ladrón, and D. G. Durán, “Los Laboratorios Virtuales y Laboratorios Remotos en la Enseñanza de la Ingeniería,” pp. 24–30, 2011.
- [3] F. Torres, “La importancia de los laboratorios en el procesos de aprendizaje,” 2016. .
- [4] M. Viejo Zubicaray, “Bombas: teoría, diseño y aplicaciones,” *Limusa*. p. 239, 2005.
- [5] S. de las Heras, *Fluidos, bombas e instalaciones hidráulicas*. 2011.
- [6] A. C. Solé, *Instrumentación Industrial*, 6th ed. 1997.
- [7] J. M. C. Y. A. Cengel, *Mecánica de fluidos*, Segunda Ed. 2014.
- [8] R. L. Mott and J. A. Untener, *Mecánica de Fluidos Aplicada*, 7th ed. México, 2015.
- [9] A. C. Solé, *Instrumentación Industrial*, 8va ed. 2010.
- [10] R. L. Mott, “Mecánica de fluidos. Impulsión de fluidos,” *Mecánica De Fluidos*, pp. 1–623, 2011.
- [11] AutoCAD, “AutoDesk,” 2021. <https://www.autodesk.com/products/autocad/overview?support=ADVANCED&plc=ACDIST&term=1-YEAR&quantity=1>.
- [12] Instituto Ecuatoriano de Normalización, *Norma de Dibujo Técnico Mecánico CPE INEN 003 para Ecuador*. Quito, 1989.
- [13] Arduino, “Arduino,” 2021. <https://www.arduino.cc/>.

ANEXOS

ANEXO 1: CERTIFICADO DE FUNCIONAMIENTO

ANEXO 2: PLANOS Y ESQUEMAS

ANEXO 3: DIAGRAMA DE MOODY

ANEXO 4: MANUALES DE OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO

ANEXO 5: HOJAS GUÍAS