



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**

**PROPUESTA TECNOLÓGICA**

**DISEÑO DE UN BANCO EXPERIMENTAL DE BOMBEO PARA EL ANÁLISIS DE  
ALTURA NETA POSITIVA DE SUCCIÓN EN BOMBAS CENTRÍFUGAS**

Propuesta tecnológica presentada previo a la obtención del Título de Ingenieros en  
Electromecánica

**Autores:**

Lema Jami Byron Oswaldo

Masaquiza Guaitoso Christian Manuel

**Tutor Académico:**

PhD. Héctor Luis Laurencio Alfonso

**LATACUNGA - ECUADOR**

**2022**





## AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN

En calidad de tutor del Trabajo de Investigación sobre el título:

**“DISEÑO DE UN BANCO EXPERIMENTAL DE BOMBEO PARA EL ANÁLISIS DE ALTURA NETA POSITIVA DE SUCCIÓN EN BOMBAS CENTRÍFUGAS”**, de los postulantes **Lema Jami Byron Oswaldo, Masaquiza Guaitoso Christian Manuel**, de la Carrera de Ingeniería Electromecánica, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnico suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, Agosto 2022

---

PhD. Héctor Luis Laurencio Alfonso

C.C. 175836725-2



## APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas.; por cuanto, los postulantes: **Lema Jami Byron Oswaldo**, **Masaquiza Guaitoso Christian Manuel** con el título de Proyecto de titulación “Diseño de un banco experimental de bombeo para el análisis de altura neta positiva de succión en bombas centrífugas” han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, agosto 2022

Para constancia firman:

.....  
Lector 1 (Presidente)  
Ing. MSc. Luis Navarrete  
CC: 180374728-4

.....  
Lector 2  
Ing. MSc. Segundo Cevallos  
CC: 050178243-7

.....  
Lector 3  
PhD. Enrique Torres Tamayo  
CC: 175712194-0



## AVAL DE IMPLEMENTACIÓN

Latacunga, Agosto 2022

En calidad de técnico de laboratorio de la Universidad Técnica de Cotopaxi, confirmo la realización del proyecto como material didáctico **“DISEÑO DE UN BANCO EXPERIMENTAL DE BOMBEO PARA EL ANÁLISIS DE ALTURA NETA POSITIVA DE SUCCIÓN EN BOMBAS CENTRÍFUGAS”** diseñado por los señores estudiantes de la carrera de Ingeniería Electromecánica; Nombres: Byron Oswaldo Lema Jami con C.I 055060842-6 y Christian Manuel Masaquiza Guaitoso con C.I 180499219-4.

Es cuanto puedo certificar en honor a la verdad, se expide el presente para que el interesado pueda hacer el uso del mismo para los fines que crea conveniente.

Técnico de laboratorio

**Ing. Jorge Villarroel**

C.I: 050294349-1

## **AGRADECIMIENTO**

*En primer lugar, agradezco a Dios por permitirme cumplir un objetivo más en mi vida, brindarme la sabiduría e inteligencia para afrontar los obstáculos que se atraviesan.*

*También agradezco a la vida por permitirme la dicha de tener aún con vida a mis seres más queridos, el agradecimiento más sincero es a mi madre Margot, guerrera de vida, que nunca se ha rendido a pesar de todo, y que con su amor, cariño y paciencia me ha inculcado los valores y principios que me han formado a lo largo de mi vida, también a mi padre por enseñarme el valor del trabajo honrado y el esfuerzo, a mi hermana por apoyarme significativamente en este proyecto y a mis tíos Sandra y Marcelo por sus consejos y apoyo incondicional.*

*Agradezco a mi tutor académico del proyecto de investigación por su guía, consejos y ayuda desinteresada que me sirvieron para la culminación del proyecto y el aprendizaje de nuevas áreas de la ingeniería.*

*Por último, pero no menos importante agradezco a los docentes de la carrera de Ingeniería Electromecánica por brindarme sus conocimientos y consejos que fortalecen e inspiran.*

*Gracias a la vida y a los problemas que me han permitido mejorar como persona.*

**Byron L.**

## **AGRADECIMIENTO**

*El presente trabajo investigativo lo dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador y darnos fuerza para continuar en este proceso de obtener uno de los anhelos más deseados.*

*Doy gracias a mis padres, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes he logrado llegar hasta aquí, por ser los principales promotores de este sueño, por confiar y creer en nuestras expectativas, por los consejos, valores y principios que nos han inculcado.*

*A mis hermanas por estar siempre presentes, en este proceso de mi formación universitaria, y por el apoyo moral que me brindaron a lo largo de esta etapa.*

*A todas las personas que nos han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos.*

*También agradecer a la Universidad Técnica de Cotopaxi y docentes, de la carrera de Ingeniería Electromecánica, quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos hicieron que pueda crecer día a día como profesional, gracias a cada una de ustedes por su paciencia, dedicación, apoyo incondicional y amistad por ayudarnos en la elaboración del proyecto.*

**Christian M.**

## **DEDICATORIA**

*Este proyecto se lo dedico a mi familia, especialmente a mi madre Margot Jami, ya que sin ella nada de esto sería posible, por su amor, consejos y apoyo moral e incondicional en mis noches en vela. A mi padre Oswaldo Lema por enseñarme el valor de la humildad y honradez.*

*A mis tíos Sandra y Marcelo por siempre creer en mí y por su apoyo cuando más lo necesitaba.*

*Finalmente, a mi ángel del cielo que a pesar de ya no estar conmigo la sigo llevando siempre en mi mente y corazón.*

*A todos quienes forman parte de mi vida, muchas gracias.*

**Byron L.**

## **DEDICATORIA**

*Me gustaría dedicar esta Tesis a toda mi familia*

*Para mis padres Crispin Masaquiza y María Guaitoso por su comprensión y ayuda en momentos malos y buenos. Me han enseñado a encarar las adversidades sin perder nunca la dignidad ni desfallecer en el intento. Me han dado todo lo que soy como persona, mis valores, mis principios, mi perseverancia y mi empeño, y todo ello con una gran dosis de amor y sin pedir nunca nada a cambio.*

*A mis hermanas, Edith y María, por apoyarme siempre en lo que necesito, las amo mucho, y a mis pequeños de la casa, Demian, Iker y Arleth que con sus ocurrencias me alegran siempre.*

*A todos ellos,  
muchas gracias de todo corazón*

**Christian M.**

# ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE AUTORÍA .....	ii
AVAL DEL TUTOR DEL PROYECTO DE TITULACIÓN .....	iii
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN.....	iv
AVAL DE IMPLEMENTACIÓN.....	v
AGRADECIMIENTO .....	vi
DEDICATORIA.....	viii
ÍNDICE GENERAL.....	x
ÍNDICE DE TABLAS.....	xiv
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xv
ÍNDICE DE ECUACIONES .....	xvii
RESUMEN.....	xix
ABSTRACT .....	xx
AVAL DE TRADUCCIÓN.....	xxi
INFORMACIÓN GENERAL .....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	3
1.1. EL PROBLEMA.....	3
1.1.1. Planteamiento del problema .....	3
1.1.2. Formulación del problema.....	4
1.2. BENEFICIARIOS .....	4
1.2.1. Beneficiarios Directos .....	4
1.2.2. Beneficiarios Indirectos.....	4
1.3. JUSTIFICACIÓN .....	4
1.4. HIPÓTESIS .....	5
1.5. OBJETIVOS .....	6
1.5.1. Objetivo General.....	6

1.5.2.	Objetivos Específicos .....	6
1.6.	DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES Y TAREAS PROPUESTAS CON LOS OBJETIVOS ESTABLECIDOS.....	6
2.	FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	8
2.1.	ANTECEDENTES .....	8
2.2.	MARCO REFERENCIAL.....	9
2.2.1.	Bombas hidráulicas .....	9
2.2.2.	Tipos de bombas.....	9
2.2.3.	Principio De Funcionamiento De La Bomba Centrífuga .....	10
2.2.4.	Parámetros de las bombas hidráulicas.....	15
2.2.5.	Altura efectiva de bombeo.....	15
2.2.6.	Potencia de bombeo.....	15
2.2.7.	Amplitud de presión .....	16
2.2.8.	Volumen .....	16
2.2.9.	Amplitud de la velocidad.....	16
2.2.10.	Propiedades de los líquidos .....	16
2.2.11.	Densidad .....	17
2.2.12.	Peso específico .....	17
2.2.13.	Volumen específico .....	17
2.2.14.	Viscosidad .....	17
2.2.15.	Presión .....	17
2.2.16.	Número de Reynolds .....	17
2.2.17.	Pérdidas de carga por fricción en tuberías.....	18
2.2.18.	Métodos e instrumentos de medición de mecánica de los fluidos.....	18
2.2.19.	Medición de presión .....	19
2.2.20.	Dispositivos para la medición de flujo .....	20
2.2.21.	PLC LOGO de Siemens .....	21

2.2.22.	Métodos de regulación.....	22
2.2.23.	Cavitación.....	24
2.2.24.	Tipos de cavitación de las bombas hidráulicas.....	25
2.2.25.	NPSH.....	28
2.2.26.	Altura neta positiva en la succión disponible .....	28
2.2.27.	Altura neta positiva en la succión requerida.....	28
3.	METODOLOGÍA Y MATERIALES .....	29
3.1.	DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL .....	29
3.2.	CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE BOMBEO.....	31
3.2.1.	Condiciones del fluido en las que va a trabajar el equipo .....	31
3.2.2.	Características técnicas de la bomba centrífuga .....	31
3.2.2.1.	Curvas características de la bomba centrífuga PENTAX CR.....	32
3.2.3.	Elementos de Protección para el sistema de bombeo .....	33
3.2.4.	Elementos del sistema hidráulico .....	35
3.2.5.	Métodos de regulación en el banco experimental .....	36
3.2.5.1.	Estrangulamiento para $n$ constante .....	36
3.2.5.2.	Variación de frecuencia .....	37
3.2.6.	Diseño del banco experimental.....	37
3.3.	SISTEMA DE SUPERVISIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS .....	38
3.4.	Sensores de Medición .....	38
3.4.1.	Medidor de flujo de turbina líquida GT-LWGY .....	38
3.4.2.	Transmisores de presión GTPB20.....	40
3.5.	Ecuaciones .....	41
3.5.1.	Caudal y Presión.....	41
3.5.2.	Potencia y Rendimiento.....	42
3.5.3.	Curvas características .....	43
3.5.4.	Semejanza en Máquinas de Flujo .....	44

3.5.5.	Velocidad Específica, $n_s$ .....	46
3.5.6.	Cálculo de Altura Neta Positiva de Succión.....	47
3.5.7.	DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL $NPSH_{Requerido}$ .....	48
3.5.8.	Porcentaje de error relativo.....	48
4.	ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	49
4.1.	ESCALAMIENTO DE LOS TRANSMISORES DE PRESIÓN Y CAUDAL .....	50
4.1.1.	Parametrización y acondicionamiento de los sensores de presión en el PLC LOGO Siemens. ....	50
4.1.2.	Parametrización y acondicionamiento del sensor de flujo en el PLC LOGO Siemens. ....	52
4.2.	Programación en el software <i>Logo Soft Comfort</i> .....	53
4.3.	CORRELACIÓN DE LA DENSIDAD, VISCOSIDAD Y PRESIÓN DE VAPOR DEL AGUA CON RESPECTO A LA TEMPERATURA .....	54
4.3.1.	Densidad del agua.....	54
4.3.2.	Viscosidad Dinámica.....	55
4.3.3.	Presión de vapor del agua.....	56
4.4.	COMUNICACIÓN TCP/IP .....	56
4.5.	CONTROL DEL SISTEMA DE BOMBEO .....	57
4.6.	COMPROBACIÓN DE LAS MEDICIONES DE LOS SENSORES .....	58
4.7.	RESULTADOS DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DE LA BOMBA A DISTINTAS FRECUENCIAS .....	59
4.8.	APLICACIÓN DE LAS ECUACIONES DE SEMEJANZA CON LA VARIACIÓN DE FRECUENCIA .....	62
4.9.	COMPARACIÓN DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS EXPERIMENTALES Y TEÓRICAS .....	64
4.10.	ANÁLISIS DE $NPSH$ DISPONIBLE EN EL SISTEMA .....	65
4.11.	Presupuesto.....	66
5.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	69

5.1. CONCLUSIONES .....	69
5.2. RECOMENDACIONES.....	69
6. REFERENCIAS .....	70
ANEXOS .....	73

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 3.1.</b> Variables Dependientes. ....	30
<b>Tabla 3.2:</b> Variables Independientes. ....	30
<b>Tabla 3.3:</b> Propiedades del agua a distintas temperaturas .....	31
<b>Tabla 3.4:</b> Parámetros técnicos de la bomba. ....	32
<b>Tabla 3.5:</b> Elementos del sistema de bombeo. ....	35
<b>Tabla 3.6:</b> Parámetros técnicos del medidor de flujo. ....	39
<b>Tabla 3.7:</b> Parámetros técnicos de los medidores de presión. ....	40
<b>Tabla 4.1:</b> Adquisición de datos en 60 Hz .....	59
<b>Tabla 4.2:</b> Adquisición de datos en 50 Hz.....	60
<b>Tabla 4.3:</b> Adquisición de datos en 40 Hz.....	60
<b>Tabla 4.4:</b> Ecuaciones para determinar H (y) a cualquier Q (x).....	61
<b>Tabla 4.5:</b> Cálculos teóricos a diferentes frecuencias. ....	62
<b>Tabla 4.6:</b> Cálculos con las ecuaciones de semejanza.....	63
<b>Tabla 4.7:</b> Error relativo entre los datos del catálogo y los datos experimentales. ....	64
<b>Tabla 4.8:</b> Datos del NPSH con variación de frecuencia. ....	65
<b>Tabla 4.9:</b> Costos directos. ....	66
<b>Tabla 4.10:</b> Costos indirectos. ....	68
<b>Tabla 4.11:</b> Costos totales. ....	68

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.1:</b> Diagrama Causa y Efecto. ....	4
<b>Figura 2.1:</b> Bomba Centrífuga, Disposición, Esquema y Perspectiva . ....	11
<b>Figura 2.2:</b> Voluta de una bomba centrífuga . ....	11
<b>Figura 2.3:</b> Difusor de una bomba centrífuga . ....	12
<b>Figura 2.4:</b> Turbina de una bomba centrífuga . ....	12
<b>Figura 2.5:</b> Velocidades y ángulos del impulsor . ....	14
<b>Figura 2.6:</b> Altura efectiva de la bomba . ....	15
<b>Figura 2.7:</b> Pérdidas en la bomba centrífuga . ....	16
<b>Figura 2.8:</b> Flujo laminar . ....	18
<b>Figura 2.9:</b> Flujo turbulento. ....	18
<b>Figura 2.10:</b> Transductor de Presión de Piezoeléctrico . ....	19
<b>Figura 2.11:</b> Transmisor resistivo. ....	20
<b>Figura 2.12:</b> Área de sección transversal . ....	20
<b>Figura 2.13:</b> Medidor de caudal . ....	21
<b>Figura 2.14:</b> Sensor de caudal de turbina . ....	21
<b>Figura 2.15:</b> PLC LOGO Siemens . ....	22
<b>Figura 2.16:</b> Partes de una Válvula de Bola . ....	23
<b>Figura 2.17:</b> Válvulas de mariposa . ....	23
<b>Figura 2.18:</b> Método de regulación mediante variación de frecuencia . ....	24
<b>Figura 2.19:</b> Cavitación por succión . ....	25
<b>Figura 2.20:</b> Cavitación de descarga . ....	26
<b>Figura 2.21:</b> Efectos de la cavitación . ....	27
<b>Figura 2.22:</b> Formación de burbujas de vapor . ....	27
<b>Figura 2.23:</b> Curva NPSH vs Q . ....	29
<b>Figura 3.1:</b> Bomba centrífuga PENTAX CRT 100/00. ....	32
<b>Figura 3.2:</b> Curva $\eta$ vs Q. ....	32
<b>Figura 3.3:</b> Curva H vs Q. ....	33
<b>Figura 3.4:</b> Curva NPSH vs Q. ....	33
<b>Figura 3.5:</b> Contactor MC-9b. ....	34
<b>Figura 3.6:</b> Relé Térmico MT-32. ....	34

<b>Figura 3.7:</b> Válvula de bola PVC. ....	35
<b>Figura 3.8:</b> Válvula de compuerta. ....	36
<b>Figura 3.9:</b> Variador de frecuencia Kinco CV100 .....	37
<b>Figura 3.10:</b> Diseño del banco experimental y sus accesorios. ....	37
<b>Figura 3.11:</b> Sistema de Adquisición de Datos. ....	38
<b>Figura 3.12:</b> Factor de medición y frecuencia típica en los sensores. ....	39
<b>Figura 3.13:</b> Conexión Eléctrica del medidor de flujo GTLWGY.....	40
<b>Figura 4.1:</b> Diagrama P&ID del sistema de flujo.....	49
<b>Figura 4.2:</b> Configuración analógica de los sensores. ....	51
<b>Figura 4.3:</b> Instrucción Aritmética 0 a 6 Bar.....	51
<b>Figura 4.4:</b> Escalamiento del PLC Bar-Bits 0~6Bar. ....	52
<b>Figura 4.5:</b> Escalamiento del PLC Bar-Bits -1~0Bar.....	52
<b>Figura 4.6:</b> Escalamiento del PLC para 0 – 20 m <sup>3</sup> /h. ....	53
<b>Figura 4.7:</b> Diagrama sensor 0 a 6 Bar.....	53
<b>Figura 4.8:</b> Diagrama sensor -1 a 0 Bar. ....	54
<b>Figura 4.9:</b> Diagrama sensor de flujo. ....	54
<b>Figura 4.10:</b> Correlación Temperatura vs Densidad. ....	55
<b>Figura 4.11:</b> Correlación Temperatura vs Viscosidad Dinámica. ....	55
<b>Figura 4.12:</b> Correlación Temperatura vs Presión de vapor.....	56
<b>Figura 4.13:</b> Panel para la visualización de datos. ....	57
<b>Figura 4.14:</b> Circuito de control de la bomba.....	57
<b>Figura 4.15:</b> Circuito de fuerza de la bomba. ....	58
<b>Figura 4.16:</b> Curva Característica experimental a distinta frecuencia. ....	61
<b>Figura 4.17:</b> Curva característica teórica a distinta frecuencia. ....	62
<b>Figura 4.18:</b> Curvas características con las ecuaciones de semejanza. ....	63
<b>Figura 4.19:</b> Curvas características del catálogo con la curva teórica experimental.....	64
<b>Figura 4.20:</b> Curvas NPSH <sub>D</sub> vs Q en diferentes frecuencias.....	66

## ÍNDICE DE ECUACIONES

<b>Ecuación (3.1)</b> .....	36
<b>Ecuación (3.2)</b> .....	36
<b>Ecuación (3.3)</b> .....	36
<b>Ecuación (3.4)</b> .....	36
<b>Ecuación (3.5)</b> .....	36
<b>Ecuación (3.6)</b> .....	39
<b>Ecuación (3.7)</b> .....	41
<b>Ecuación (3.8)</b> .....	41
<b>Ecuación (3.9)</b> .....	42
<b>Ecuación (3.10)</b> .....	42
<b>Ecuación (3.11)</b> .....	43
<b>Ecuación (3.12)</b> .....	43
<b>Ecuación (3.13)</b> .....	43
<b>Ecuación (3.14)</b> .....	43
<b>Ecuación (3.15)(3.16)</b> .....	44
<b>Ecuación (3.17)</b> .....	44
<b>Ecuación (3.18)(3.19)</b> .....	44
<b>Ecuación (3.20)</b> .....	44
<b>Ecuación (3.21)(3.22)</b> .....	45
<b>Ecuación (3.23)</b> .....	45
<b>Ecuación (3.24)</b> .....	45
<b>Ecuación (3.25)</b> .....	45
<b>Ecuación (3.26)</b> .....	45
<b>Ecuación (3.27)</b> .....	46

<b>Ecuación (3.28)</b> .....	46
<b>Ecuación (3.29)</b> .....	46
<b>Ecuación (3.30)</b> .....	46
<b>Ecuación (3.31)</b> .....	47
<b>Ecuación (3.32)</b> .....	47
<b>Ecuación (3.33)</b> .....	47
<b>Ecuación (3.34)</b> .....	47
<b>Ecuación (3.35)</b> .....	47
<b>Ecuación (3.36)</b> .....	48
<b>Ecuación (4.1)</b> .....	50
<b>Ecuación (4.2)</b> .....	55
<b>Ecuación (4.3)</b> .....	55
<b>Ecuación (4.4)</b> .....	56



## UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

### FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

#### CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

### TÍTULO: “DISEÑO DE UN BANCO EXPERIMENTAL DE BOMBEO PARA EL ANÁLISIS DE ALTURA NETA POSITIVA DE SUCCIÓN EN BOMBAS CENTRÍFUGAS”.

**Autores:** Lema Jami Byron Oswaldo, Masaquiza Guaitoso Christian Manuel

#### RESUMEN

El presente trabajo de investigación tuvo el objetivo de implementar un banco experimental para el análisis de altura neta positiva de succión en bombas centrífugas, este proyecto se basó en el método científico partiendo por la investigación acerca de los sistemas de bombeo y las variables que influyen en el sistema, la medición de las variables se realizaron mediante un termómetro y sensores de presión y caudal para obtener datos precisos, y posteriormente, con el acondicionamiento en el PLC LOGO Siemens y la programación en un software de instrumentación se realizó la adquisición y visualización de los datos. Los ensayos se realizaron a distintas revoluciones mediante la variación de frecuencia y con los datos adquiridos de caudal, presión de descarga y presión de vacío se obtuvo las gráficas H (m) vs Q (m<sup>3</sup>/h) y NPSH (m) vs Q (m<sup>3</sup>/h). Estas gráficas determinan que, las curvas características del catálogo de la bomba no coinciden con los datos experimentales obtenidos ya que según la placa del equipo la altura máxima de bombeo es de 20,5 m, pero en la experimentación se alcanzó un caudal máximo en 60 Hz de 15 m<sup>3</sup>/h y una altura máxima de elevación de 15 m en 60 Hz, 11 m en 50 Hz y 7 m en 40 Hz. La experimentación del NPSH disponible se realizó con la manipulación de las válvulas ubicadas en la succión y en la descarga que tienen la finalidad de forzar la cavitación en la bomba y se obtuvo las gráficas a 60 Hz, 50 Hz y 40 Hz que se relacionan con el NPSH requerido de la curva del catálogo.

**Palabras claves:** Bombas centrífugas, caudal, presión, succión, descarga, NPSH, cavitación.



**COTOPAXI TECHNICAL UNIVERSITY**  
**ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES FACULTY**  
**ELECTROMECHANICAL ENGINEERING**

**TITLE:** " DESIGN OF AN EXPERIMENTAL PUMPING BENCH FOR THE ANALYSIS OF NET POSITIVE SUCTION HEAD IN CENTRIFUGAL PUMPS".

**Authors:** Lema Jami Byron Oswaldo, Masaquiza Guaitoso Christian Manuel

**ABSTRACT**

The current research work had as aim to implement an experimental bench for the net positive suction head analysis in centrifugal pumps, this project was based on the scientific method starting with the research on pumping systems and the variables, what influence system pumping, the variables measurement was performed by means a thermometer and pressure and flow sensors to get precise data, and later, with the PLC LOGO Siemens conditioning and the programming in an instrumentation software, the acquisition and data visualization. The tests were performed at different revolutions by means frequency variation and with the acquired data of flow rate, discharge pressure and vacuum pressure, the graphs  $H$  (m) vs  $Q$  ( $m^3/h$ ) and  $NPSH$  (m) vs  $Q$  ( $m^3/h$ ). These graphs determine, what the pump catalog characteristics curves do not coincide with the got experimental data, since according to the equipment plate, the maximum pumping head is 20.5 m, but in the experimentation is reached a maximum flow 15  $m^3/h$  at 60 Hz and a maximum head of 15 m at 60 Hz, 11 m at 50 Hz and 7 m at 40 Hz were reached. The available NPSH experimentation was made with the valve's manipulation located in the suction and in the discharge, which have the purpose of forcing the cavitation in the pump and it was got the graphs at 60 Hz, 50 Hz and 40 Hz what are related to the required NPSH from the catalog curve.

**Key words:** Centrifugal pumps, flow, pressure, suction, discharge, NPSH, cavitation.



## *AVAL DE TRADUCCIÓN*

En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que:

La traducción del resumen al idioma Inglés del trabajo de titulación cuyo título versa: **“DISEÑO DE UN BANCO EXPERIMENTAL DE BOMBEO PARA EL ANÁLISIS DE ALTURA NETA POSITIVA DE SUCCIÓN EN BOMBAS CENTRÍFUGAS.”** presentado por: **Lema Jami Byron Oswaldo** y **Masaquiza Guaitoso Christian Manuel**, estudiantes de la Carrera de: **Ingeniería Electromecánica**, perteneciente a la **Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas**, lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer uso del presente aval para los fines académicos legales.

Latacunga, septiembre del 2022

Atentamente,

  
Mg. Marco Beltrán

CENTRO  
DE IDIOMAS

**DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS-UTC**  
CI: 0502666514

## INFORMACIÓN GENERAL

**Título:**

Diseño de un banco experimental de bombeo para el análisis de altura neta positiva de succión en bombas centrífugas.

**Fecha de inicio:** abril 2022.

**Fecha de finalización:** agosto 2022.

**Lugar de ejecución:** Latacunga, parroquia Eloy Alfaro, Universidad Técnica de Cotopaxi, Laboratorio de la Facultad CIYA.

**Facultad que auspicia:** Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas

**Carrera que auspicia:** Ingeniería Electromecánica

**Equipo de Trabajo:**

**Tutor:** PhD. Héctor Luis Laurencio Alfonso

**Cédula de Ciudadanía:** 175836725-2

**Correo electrónico:** [hector.laurencio@utc.edu.ec](mailto:hector.laurencio@utc.edu.ec)

**Ponente uno del proyecto de investigación:**

**Nombre:** Byron Oswaldo Lema Jami

**Cédula de Ciudadanía:** 055060842-6

**Correo electrónico:** [byron.lema8426@utc.edu.ec](mailto:byron.lema8426@utc.edu.ec)

**Ponente dos del proyecto de investigación:**

**Nombre:** Christian Manuel Masaquiza Guaitoso

**Cédula de Ciudadanía:** 180499219-4

**Correo electrónico:** [christian.masaquiza2194@utc.edu.ec](mailto:christian.masaquiza2194@utc.edu.ec)

**Área de Conocimiento:**

Campo amplio	Campo específico	Campo detallado
07 ingeniería, Industria y Construcción.	071 ingeniería y Profesiones Afines.	0715 mecánica y metalurgia.

**Línea de investigación:**

Procesos Industriales

**Sub líneas de investigación de la Carrera:**

Diseño, construcción y mantenimiento de elementos, prototipos y sistemas electromecánicos.

# **1. INTRODUCCIÓN**

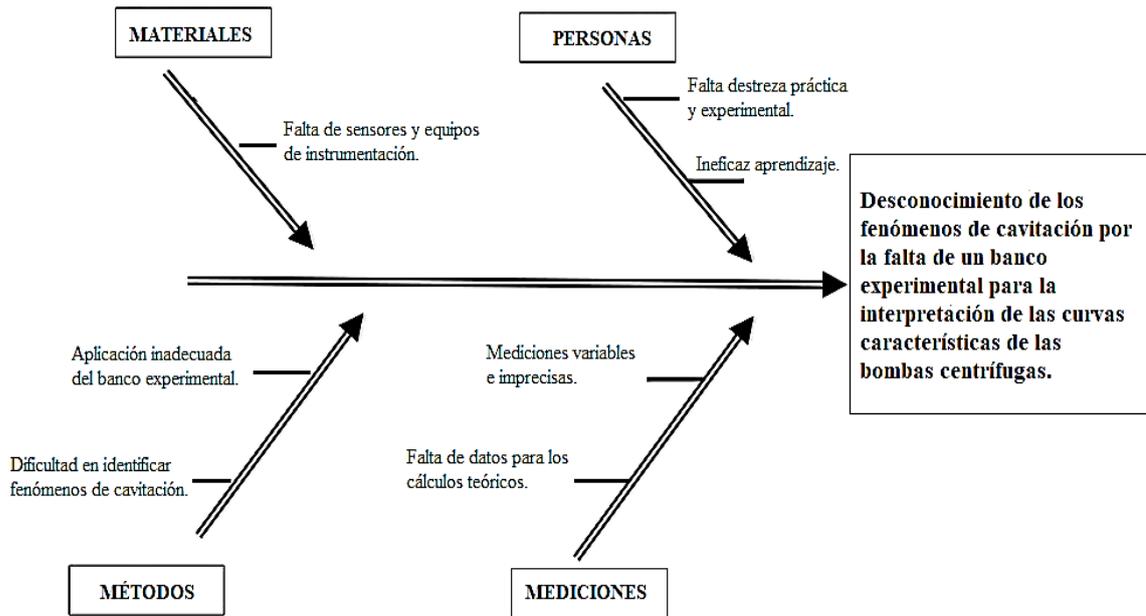
## **1.1. EL PROBLEMA**

### **1.1.1. Planteamiento del problema**

El uso de los sistemas de bombeo ha sido de gran importancia para el desarrollo económico y energético a nivel mundial, el diseño e implementación de estos sistemas se considera esencial en el estudio de toda área de la ingeniería ya que en la actualidad están presentes en sistemas eléctricos, hidráulicos, petroleros, etc. de cualquier industria, por lo que, se debe considerar varios aspectos para la conservación y análisis de estos sistemas según su aplicación.

Las bombas son los componentes más importantes de los sistemas de bombeo y muchas veces una mala selección de este elemento puede ocasionar una falta de eficiencia en todo el sistema impidiendo que la bomba trabaje en toda su capacidad debido a varios factores que se dan, siendo la cavitación una de las causas más perjudiciales en las bombas ocasionando pérdidas a nivel de producción, daño de sus componentes internos y económicamente, por sus elevados costos de mantenimiento, reparación o sustitución en un sistema.

La Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi se basa en una educación de calidad que con lleva la aplicación teórica y práctica en todas las áreas para un mejor aprendizaje y experiencia, la falta de un sistema de bombeo para el análisis de los fenómenos de cavitación en las bombas ocasionan una falta de conocimiento y destreza práctica en estos temas muy importantes dentro del contenido teórico estudiado en la Mecánica de Fluidos, por lo que de ahí nace la necesidad del diseño de un sistema de bombeo que permita el análisis de algunos factores de las bombas centrífugas y que permita al estudiante realizar prácticas experimentales para que esté en la capacidad de reconocer los elementos que conforma un sistema de bombeo y los efectos que se producen en el sistema, este banco experimental será implementado en los Laboratorios de CIYA de la Universidad.



**Figura 1.1:** Diagrama Causa y Efecto.

### 1.1.2. Formulación del problema

Baja confiabilidad de los datos del fabricante en las características funcionales de las bombas ofrecidas en los catálogos y la necesidad de un banco experimental para el análisis de los fenómenos de cavitación en bombas centrífugas que permita la ejecución de prácticas experimentales de los estudiantes de las carreras de Ingeniería Electromecánica, Industrial e Hidráulica.

## 1.2. BENEFICIARIOS

### 1.2.1. Beneficiarios Directos

Estudiantes y Docentes de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicada de las carreras de Ingeniería Hidráulica, Electromecánica e Industrial.

### 1.2.2. Beneficiarios Indirectos

Empresas de la región que emplean los sistemas de bombeo en el ámbito industrial y energético.

## 1.3. JUSTIFICACIÓN

La asignatura de Mecánica de Fluidos es importante dentro de la ingeniería en cualquier área de estudio y es un eje principal en la formación académica. El estudio de los sistemas de bombeo está orientada a la selección de los elementos adecuados que cumplan con las expectativas de diseño especialmente en el elemento principal que conforma este sistema, la bomba.

En los sistemas de bombeo, las bombas centrífugas son los equipos comúnmente utilizados en actividades productivas, energéticas, entre otros, debido a su simplicidad de manipulación, alta eficiencia y otras ventajas que ofrecen. En los sistemas hidráulicos la anomalía que frecuentemente sucede es la cavitación, este fenómeno se origina por una deficiente instalación y operación en el sistema y ocasiona pérdidas de eficiencia y daño en los componentes del sistema hidráulico, siendo la bomba la más afectada por su deterioro interno de los componentes y la reducción de su vida útil.

En el Laboratorio de Fluidos coexiste la necesidad de reacondicionar módulos para la ejecución de prácticas experimentales importantes para la formación académica, este proyecto busca optimizar el módulo mediante la implementación de transductores industriales para adquirir parámetros permitiéndose el estudio del uso y selección de las bombas en actividades de producción, entender y observar el comportamiento de las bombas en diferentes procesos para el correcto desempeño, los cuales pueden ser tratadas sin tener defecto alguno si el estudiante de ingeniería está en la capacidad de instalar y seleccionar los elementos de un sistema de bombeo de manera acertada.

Con los transductores y PLC's se puede generar y acondicionar las variables eléctricas a variables físicas con datos precisos que permitirán registrar y generar las curvas de funcionamiento de una altura neta positiva en la succión de la bomba, de esta forma se puede comparar el análisis del sistema de bombeo obtenidas experimentalmente con las que el fabricante dispone.

#### **1.4. HIPÓTESIS**

Mediante las variables de presión, caudal y temperatura, permitirá el análisis de la altura neta positiva de succión de un sistema hidráulico, posibilitará conocer los fenómenos de cavitación en el sistema comparando las curvas características del catálogo del fabricante con las experimentales considerando el margen de error y viabilizará el desarrollo de prácticas experimentales para la formación académica de los estudiantes.

## 1.5. OBJETIVOS

### 1.5.1. Objetivo General

- Implementar un banco experimental de bombeo para la medición de variables y el análisis de la altura neta positiva de succión de una bomba centrífuga, mediante la instrumentación y el uso de sensores de presión y caudal que permita el estudio de los distintos parámetros de un sistema de bombeo en prácticas experimentales.

### 1.5.2. Objetivos Específicos

- Recopilar información acerca de las variables que están presentes en un sistema de bombeo mediante la investigación teórica para el análisis y estudio de las bombas centrífugas.
- Reacondicionar el módulo de pruebas mediante la implementación de medidores de las variables para la obtención de los datos y las gráficas características de las bombas en operación.
- Evaluar los resultados de las mediciones realizadas mediante la instrumentación para la verificación de los efectos causados de la cavitación en un sistema de bombeo.

## 1.6. DESCRIPCIÓN DE LAS ACTIVIDADES Y TAREAS PROPUESTAS CON LOS OBJETIVOS ESTABLECIDOS

<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>ACTIVIDADES</b>	<b>RESULTADO DE LAS ACTIVIDADES</b>	<b>MEDIOS DE VERIFICACIÓN</b>
<b>Objetivo 1</b>	Indagación bibliográfica, documental y visual acerca del principio de funcionamiento de las bombas centrífugas, cálculos y variables que influyen en los sistemas de bombeo.	Aplicación de las variables como el caudal, presión, temperatura y los métodos de cálculo para el diseño del sistema de bombeo.	Desarrollo del marco teórico y referencias del funcionamiento.

<b>Objetivo 2</b>	<p>Diseño del módulo para el análisis de NPSH en diferentes condiciones de trabajo del sistema de bombeo.</p> <p>Implementación de medidores de presión y caudal para la adquisición de datos reales en el sistema.</p> <p>Escalamiento y acondicionamiento de las variables analógicas proporcionadas por los transductores.</p>	<p>Obtención de datos reales de presión y caudal en el sistema de bombeo.</p> <p>Obtención de las gráficas características de las bombas centrífugas mediante la instrumentación en software libre.</p>	<p>Método para la instrumentación y adquisición de datos de un sistema de bombeo.</p>
<b>Objetivo 3</b>	<p>Aplicación de los fundamentos teóricos para el cálculo de NPSH y otros parámetros que conforman el sistema de bombeo.</p>	<p>Comprobación de los parámetros obtenidos tanto teórica como experimental.</p> <p>Obtención de gráficas</p>	<p>Funcionamiento y análisis de resultados experimentales en el módulo.</p>

	Ejecución de prácticas que permitan mostrar los fenómenos de cavitación en un sistema de bombeo.	que describan los fenómenos de cavitación en las bombas centrífugas.	
--	--	--	--

## 2. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

### 2.1. ANTECEDENTES

La base para la invención de las bombas se dio hace miles de años atrás en donde con la invención de la jeringa aplicada en Egipto para el embalsamiento de las momias fue el principio de funcionamiento para la aplicación e implementación de las bombas en un sistema [1].

El estudio de las bombas surgió de la necesidad de transportar un fluido de un lugar a otro en gran escala, mediante la investigación el ser humano ideó diversos métodos para su solución, desarrollándose así mecanismos para los sistemas de bombeo que como bien se dijo la base parte de hace varios siglos atrás. Con el transcurrir de los años estos mecanismos se fueron perfeccionando con estudios y ensayos prácticos realizados, para llegar a lo que es en la actualidad, bombas de gran eficiencia para un objetivo determinado.

Las bombas tienen el objetivo de producir una fuerza de carga estática de un fluido proveniente de la energía mecánica procedente de su eje a través de un motor. El diseño de los sistemas de bombeo es de gran importancia en la industria ya que sus aplicaciones son extensas, por ejemplo, estos sistemas están destinados al funcionamiento de sistemas de riego y distribución de agua potable, sistemas de bombeo aplicados a las refinerías y aplicación de generación eléctrica por medio de turbinas. Existen diversas bombas para la implementación de estos sistemas en este caso esta investigación se centrará en el estudio y análisis de las bombas centrífugas.

Los laboratorios de la Universidad Técnica de Cotopaxi cuentan con bancos experimentales de bombeo construidos en tesis anteriores para el estudio de los distintos parámetros de las bombas y los componentes en un sistema de bombeo, sin embargo, no existe un banco experimental para el análisis de NPSH el cual es un parámetro importantísimo en la bomba ya que mediante este se puede determinar la eficiencia del equipo en un sistema y evitar los fenómenos de cavitación, el cual es la causa más común de que las bombas fallen en un sistema, por lo tanto, es necesario que los estudiantes estén en la capacidad de reconocer estos fenómenos, las causas y consecuencias de una mala selección de bombas y los accesorios que conformaría un sistema de bombeo.

En el estudio de la cavitación mediante la investigación realizada por Jorge Luis Reyes De la Cruz, Gerardo Ruiz Chavarría, Sergio Hernández Zapata con el tema “Un experimento de enseñanza e investigación sobre el fenómeno de la cavitación en bombas centrífugas” da como resultado la caída de presión que se da en el impulsor de la bomba centrífuga y el sistema de bombeo al variar el flujo del fluido que transita por la instalación produciéndose la cavitación de acuerdo a la regulación del caudal. [2]

## **2.2. MARCO REFERENCIAL**

El desarrollo de esta investigación está centrado en los principios de funcionamiento de las bombas centrífugas, las ventajas y las desventajas, como afecta la variación de caudal a los parámetros técnicos.

### **2.2.1. Bombas hidráulicas**

Una bomba de este tipo es una máquina generadora que transforma la energía mecánica a energía hidráulica, al incrementar el fluido, presión, y velocidad de una zona de menor presión o altitud relacionados al principio de Bernoulli [3].

### **2.2.2. Tipos de bombas**

#### **Según el principio de funcionamiento**

La clasificación principal de las bombas se lleva a cabo según su principio de funcionamiento:

#### **2.2.2.1.1. Bombas de desplazamiento volumétricas**

La operación de las bombas de tipo volumétrica está basada en la hidrostática por el incremento de presión que empuja las paredes de las cámaras y varía su volumen.

#### 2.2.2.1.2. Bombas rotodinámicas

La principal actividad del equipo está basada en el intercambio de la cantidad de movimiento a través de la máquina y el fluido en un campo de presiones [4].

#### 2.2.2.1.3. Bombas centrífugas

A este tipo de bomba se le conoce como bombas hidráulicas que cambia la energía mecánica de un impulsor rotatorio a otra energía cinética y a la potencia requerida.

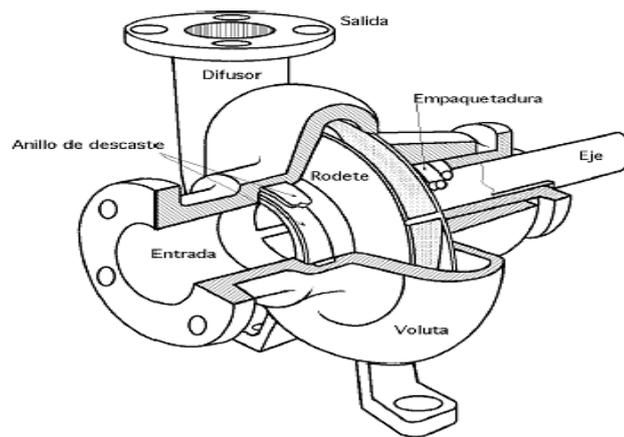
#### 2.2.3. Principio De Funcionamiento De La Bomba Centrífuga

Las bombas centrífugas son máquinas con control hidráulico por su capacidad de transmitir energía a los fluidos por el trabajo de un campo de fuerza centrífuga.

Su propósito principal es transferir fluidos por aumento de presión, las bombas centrífugas pueden tener estructuras, pero su principio de funcionamiento y características dinámicas de fluidos son siempre las mismas.

Los elementos que costa una instalación son:

- a) **Tubería de aspiración:** es la tubería que se ubica en la entrada de la bomba que permite la succión del fluido al interior de la cámara.
- b) **Impulsor o rodete:** formada por un conjunto de palas que pueden tomar varias formas, al rodete se le puede impulsar mediante un motor hasta su eje siendo la principal parte móvil de una bomba. El líquido entra axialmente a través del tubo de succión del impulsor, experimentando un cambio brusco de dirección, volviéndose radial, o permaneciendo axialmente, acelerando y trabajando.
- c) **Los álabes del rodete:** someten a las partículas líquidas a un movimiento de rotación muy rápido, siendo lanzadas hacia delante por la fuerza centrífuga, creando una altura dinámica para salir del impulsor hacia la voluta a alta velocidad, aumentando su presión sobre el impulsor en función de la distancia desde el eje.
- d) **La voluta:** es un órgano fijo que se dispone en forma alrededor del *labrum*, a su salida. Su misión es recoger el líquido que sale del impulsor a alta velocidad, para cambiar el sentido de su movimiento y dirigirlo hacia la brida de descarga de la bomba.
- e) **Tubería de impulsión:** sirve para evacuar a presión el fluido después de adquirir una fuerza centrífuga dentro de la cámara.



**Figura 2.1:** Bomba Centrífuga, Disposición, Esquema y Perspectiva [5].

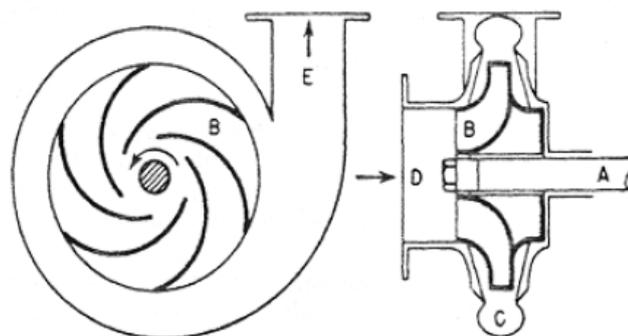
En general, estos son los componentes de una bomba centrífuga, hay diferentes tipos y variantes. Estas bombas generalmente comprenden tres conjuntos de álabes: el primero que consta de álabes de guía de entrada; la segunda con palas giratorias o la propia hélice, la tercera con palas guía de salida.

### 2.2.3.1.1. Clasificación de las bombas centrífugas

Las bombas centrífugas se las pueden clasificar en:

#### **Bomba centrífuga voluta**

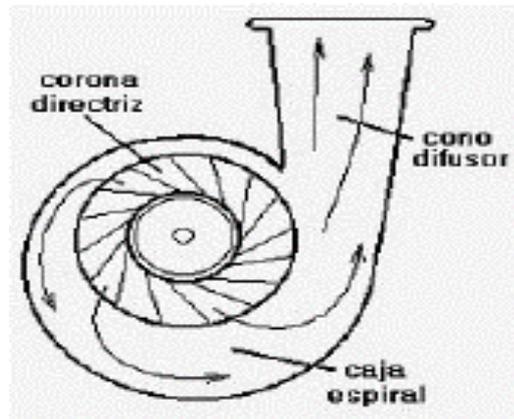
Este tipo de bomba son ideales para aplicaciones sanitarias y no sanitarias proporcionadas para que el agua fluya a través del sistema mientras aumenta la presión. Por esta razón estas bombas reducen la rugosidad en las superficies.



**Figura 2.2:** Voluta de una bomba centrífuga [6].

#### **Bomba centrífuga difusor**

El difusor es un elemento móvil, con álabes divergentes o fijado a un eje que recibe energía del exterior. Estos se expanden gradualmente y cambian la dirección del líquido y convierten la energía de la velocidad en columna de la falla de una bomba centrífuga.

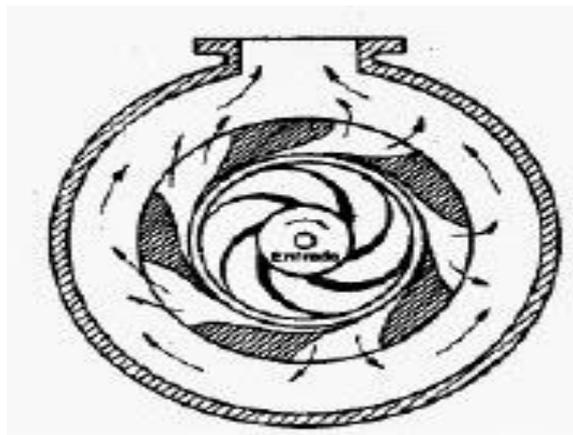


**Figura 2.3:** Difusor de una bomba centrífuga [7].

La energía centrífuga radial se transfiere al líquido por la acción de la fuerza centrífuga y en la axial por el impulso que ejercen los álabes sobre él [8].

### **Bomba centrífuga turbina**

Esta bomba permite producir remolinos en los álabes, y las velocidades cuando son muy altas en el canal anular hacen que estén girando en el impulsor.



**Figura 2.4:** Turbina de una bomba centrífuga [9].

### **Características de la bomba centrífuga**

En la gran variedad de las bombas centrífugas encontramos las siguientes características:

- Están formadas por un eje y uno o más rodets.
- Están conformadas por una carcasa.

- Elementos de cierre.
- Por la acción de la fuerza centrífuga se aumenta la energía del fluido.
- El líquido se expulsa perpendicularmente al eje de rotación del álabe.
- En varios rotores en serie se pueden emplear bombas de alta presión.
- El difusor tiene un canal en espiral, en las bombas de baja presión.
- La acción del rotor es en gran medida radial cuando los flujos son bajos y tienen altas presiones.
- La dirección de flujo en el interior de la bomba es paralela al eje del rotor cuando los flujos son más elevados y su presión de salida es menor.
- Las bombas centrífugas no son auto aspirantes y requieren de cebado previo al funcionamiento.

### **Ventajas principales de las bombas centrífugas**

Son menos costosas que las bombas de émbolo. Las bombas centrífugas son muy versátiles en cuanto a capacidades y presiones.

Algunas de sus ventajas son:

- Caudal constante.
- Presión uniforme.
- Sencillez de construcción.
- Tamaño reducido.
- Bajo mantenimiento.
- Flexibilidad de regulación.

### **Teoría del impulsor**

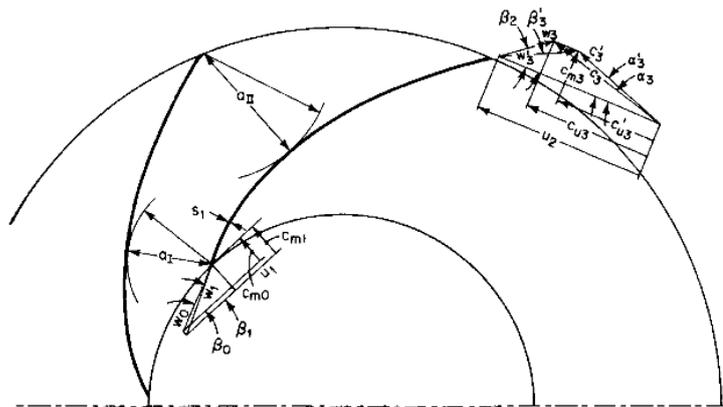
La teoría del impulsor estudia la velocidad del flujo, que se gestiona mediante un procedimiento gráfico en el que intervienen vectores, de forma que el diagrama vectorial es triangular, se le llama la velocidad.

Estos triángulos se pueden expandir para cualquier tipo de punto en la ruta del flujo a través del impulsor, pero convenientemente esto se hace en la entrada y salida del flujo.

Los vectores se expresan de la siguiente manera:

- $u$ : velocidad periférica del impulsor.
- $w$ : velocidad relativa del flujo.
- $c$ : velocidad absoluta del flujo.

La velocidad relativa es considerada con respecto con relación al impulsor, con respecto a la carcasa, siendo la velocidad absoluta siempre igual al vector suma de la relativa de la circunferencial. En general, las velocidades tienen índices 1 o 2 según estén a la entrada o la salida del impulsor [10].



**Figura 2.5:** Velocidades y ángulos del impulsor [11].

### **Ventajas del impulsor abierto sobre el cerrado en las bombas centrífugas**

- El impulsor abierto puede bombear líquidos corrosivos y sólidos.
- Menos tendencia a obstruirse, convirtiéndolo en líquidos sucios.
- El menor rozamiento hidráulico del disco, que tiene una sola rotación, de lo que se deduce un buen rendimiento.
- Mayor accesibilidad a los álabes para el mecanizado, lo que se traduce en mejores acabados.

#### 2.2.4. Parámetros de las bombas hidráulicas

#### 2.2.5. Altura efectiva de bombeo

La altura efectiva de bombeo, como se muestra en la Figura 7, se conoce como la resistencia al flujo del fluido, para que este líquido fluya completamente a través del sistema de bombeo, la bomba debe superar su resistencia al flujo [12].

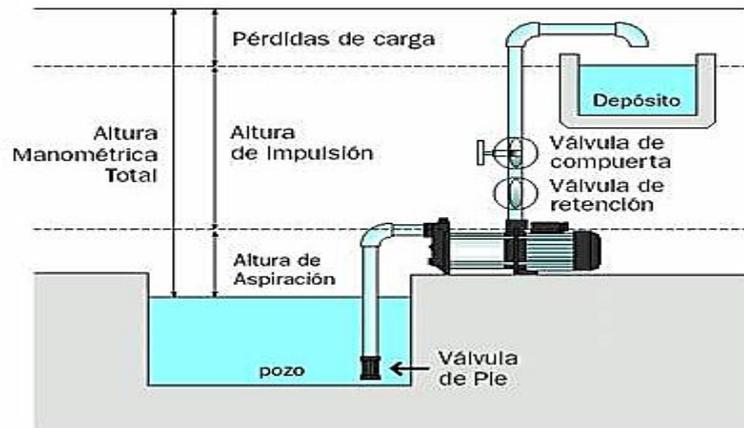


Figura 2.6: Altura efectiva de la bomba [13].

Donde:

$h$ : Altura útil total a vencer de una bomba. [m]

$h_p$ : Altura de pérdidas. [m]

$h_d$ : Altura estática de descarga. [m]

$h_s$ : Altura estática de succión. [m]

#### 2.2.6. Potencia de bombeo

Es la potencia suministrada por la bomba al fluido que la atraviesa y que depende de la altura efectiva. La potencia que se debe suministrar al eje de la bomba es mayor que la potencia debida a las pérdidas que se producen en la bomba que por general son tres tipos:

##### 2.2.6.1.1. Pérdidas volumétricas

Son las pérdidas ocasionadas por el fluido que regresa de la descarga a la succión impulsados por el cambio de presión. Debido a corrientes secundarias, falta de accesibilidad, retorno del fluido, entre otros [14].

### 2.2.6.1.2. Pérdidas hidráulicas

Ocasionadas por el roce del fluido en las paredes del interior de la carcasa, de los conductos de transporte de los líquidos y los cambios de trayectoria de los fluidos que pasan por la bomba [14].

### 2.2.6.1.3. Pérdidas mecánicas

Por fricción entre elementos mecánicos. Son las pérdidas ocasionadas por los elementos móviles de la bomba tales como cojinetes, sellos mecánicos, entre otros [14].

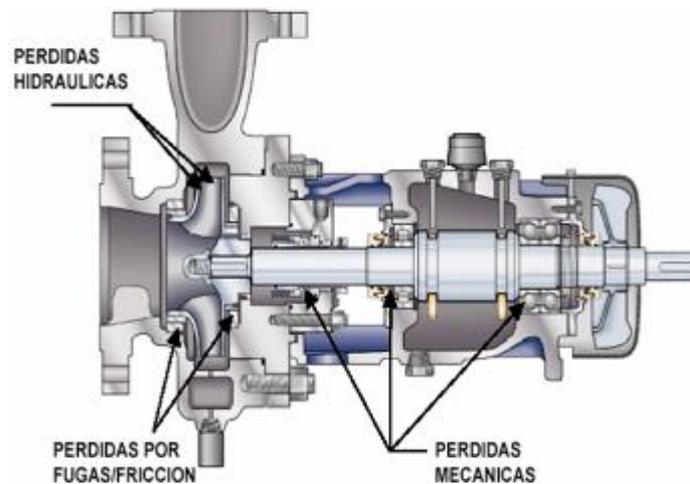


Figura 2.7: Pérdidas en la bomba centrífuga [15].

### 2.2.7. Amplitud de presión

Estos son los límites máximos de presión dentro de los cuales la bomba puede funcionar correctamente.

### 2.2.8. Volumen

Esta es la cantidad de líquido que una bomba puede suministrar a la presión de funcionamiento.

### 2.2.9. Amplitud de la velocidad

Constituyen los límites máximo y mínimo bajo los cuales las condiciones en la succión y en el soporte de carga permitirán que la bomba funcione satisfactoriamente.

### 2.2.10. Propiedades de los líquidos

La mecánica de fluidos es una combinación de investigación teórica y experimental presentada por técnicos hidráulicos y matemáticos, que estudian las leyes del movimiento de fluidos y sus operaciones en el contexto de los sólidos y abordando el problema desde una perspectiva analítica. La fluidez es la propiedad básica de los líquidos, porque los líquidos

sufren cambios constantes de forma cuando se someten a esfuerzo cortante, por más reducido que sea; algunos se moverán más rápido que otros debido a la densidad de cada uno de los fluidos, pero cuando hay esfuerzo cortante, aún pueden moverse [16].

#### **2.2.11. Densidad**

Se define de una sustancia; de sólido, líquido o gas relacionado con su masa por unidad de volumen. Su unidad en el sistema internacional es  $[\text{kg}/\text{m}^3]$ .

#### **2.2.12. Peso específico**

Es el peso por la unidad de volumen. En el sistema internacional sus unidades son  $[\text{N}/\text{m}^3]$  [17].

#### **2.2.13. Volumen específico**

Es el volumen ocupado por unidad de masa de la sustancia. Es el inverso de la densidad, independientemente de la cantidad de material. Sus unidades en el sistema internacional son  $[\text{m}^3/\text{kg}]$  [18].

#### **2.2.14. Viscosidad**

Es la resistencia ejercida, que surge por una falta en el deslizamiento de un fluido, si todos los demás factores son iguales, es proporcional a la velocidad a la que las partes del fluido se separan entre sí.

#### **2.2.15. Presión**

Es la magnitud que mide una fuerza ejercida a la capacidad de penetración de la intensidad del área de contacto. En el sistema internacional su unidad es el Pascal ( $1 \text{ Pascal} = 1 \text{ N}/\text{m}^2$ ).

#### **2.2.16. Número de Reynolds**

El número de Reynolds permite dimensionar el fluido y considerarse la relación entre la fuerza dinámica y la masa de un fluido y la tensión de deformación.

Cuando un líquido fluye con una velocidad baja por un tubo en líneas de paralelo a este fenómeno se le conoce como “flujo laminar”. Mientras acorde aumenta la velocidad a esto se le conoce “velocidad crítica”, cuando el flujo se dispersa hasta adquirir un movimiento de torbellino y hace una forma de corrientes cruzadas y remolinos se conoce como “flujo turbulento” [19].

### 2.2.16.1.1. Flujo laminar

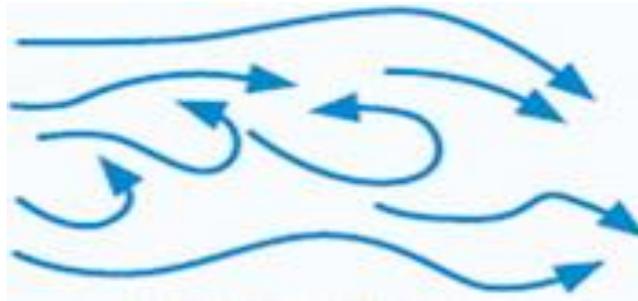
Es donde las partículas se mueven en capas o placas paralelas sin inundar los caminos de otras partículas.



**Figura 2.8:** Flujo laminar [20].

### 2.2.16.1.2. Flujo turbulento

Es el movimiento de los fluidos, se da de manera caótica, las partículas del fluido se mueven de manera desorganizada y los elementos se encuentran a través de la formación de partículas pequeñas.



**Figura 2.9:** Flujo turbulento [20].

### 2.2.17. Pérdidas de carga por fricción en tuberías

Las pérdidas por fricción se deben al fluido durante la circulación por tuberías o conductores. La pérdida es ocasionada por cortos tramos mientras el tramo largo puede ser importante, y estas pérdidas son: pérdidas primarias y pérdidas secundarias [21].

### 2.2.18. Métodos e instrumentos de medición de mecánica de los fluidos

En sistemas de bombeo y otros es importante el análisis y estudio de los diferentes procesos y técnicas utilizadas para la medición de las distintas variables como la presión, velocidad, temperatura, etc. En Mecánica de Fluidos se utilizan instrumentos de medición, como los medidores de flujo volumétrico o medidores de caudal, presión y temperatura.

### 2.2.19. Medición de presión

La presión se mide usando una diversidad de transductores mecánicos tales como tuberías de Bourdon, manómetros, entre otros. Estos dispositivos aplicados en la industria han permitido mediante señales eléctricas obtener el valor de las variables físicas como es la presión, indican el valor de cambio de presión en relación entre longitud, distancia, desplazamiento y presión de medida, la mayoría de los transductores requieren más precisión y estabilidad [22].

#### Medidor de presión piezorresistivo

Es un dispositivo que realiza cambios en la resistividad de materiales semiconductores cuando están sometidos a una tensión mecánica para efectuar una acción electrónica. El piezorresistivo son en general de la familia metálicas básicas y de silicio que son utilizados por la mayoría de componentes electrónicos. Estos medidores de presión son adecuados para medir la presión baja y permite obtener factores de sobrecarga y presión diferencial [23].

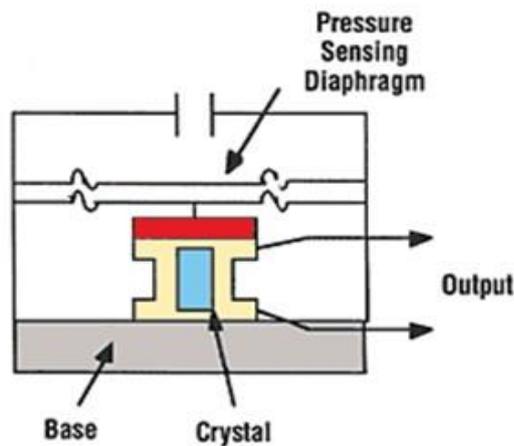


Figura 2.10: Transductor de Presión de Piezoeléctrico [24].

#### Ventajas:

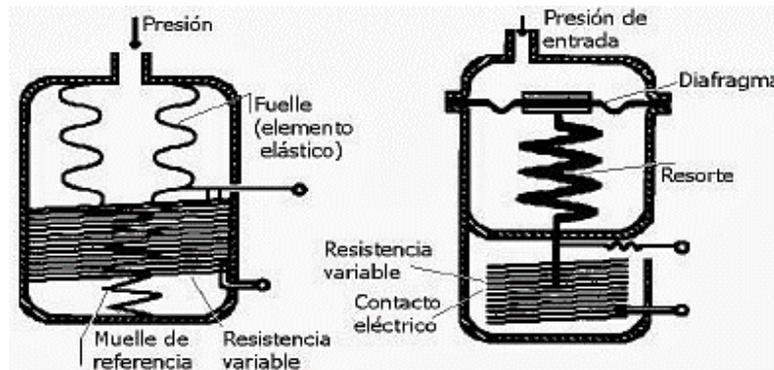
- Tiene una sensibilidad alta
- Posee una rigidez alta

#### Desventajas

- Su frecuencia es limitada
- Tiene problemas en su acondicionamiento

#### Medidores de presión resistivo

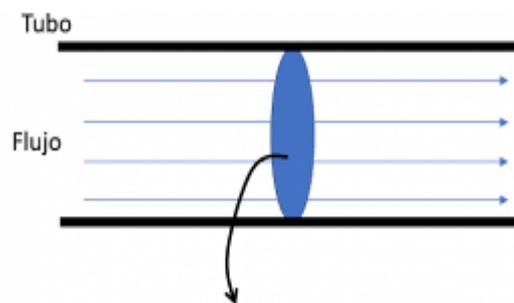
Los transmisores eléctricos consisten en elemento elástico su principal funcionamiento es cuando la resistencia del elemento cambia por la variación de la presión. Estos elementos están formados por un elemento elástico y al mismo hacen variar la resistencia de un potenciómetro en la función de la presión que se aplica.



**Figura 2.11:** Transmisor resistivo [25].

### 2.2.20. Dispositivos para la medición de flujo

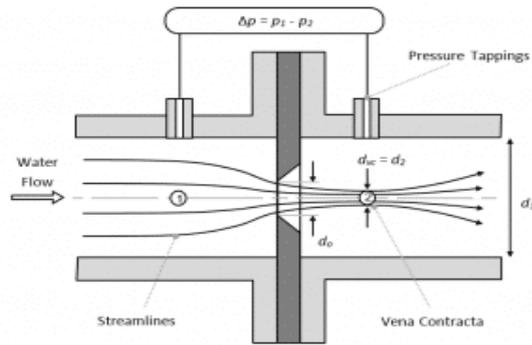
Permiten determinar el volumen y la masa que circula por un sistema de unidad. Los medidores de flujo también determinan la tasa del flujo volumétrico del líquido mediante los distintos dispositivos de: presión, velocidad, fuerza, área variable, etc.



**Figura 2.12:** Área de sección transversal [26].

#### Medidor de caudal placa orificio

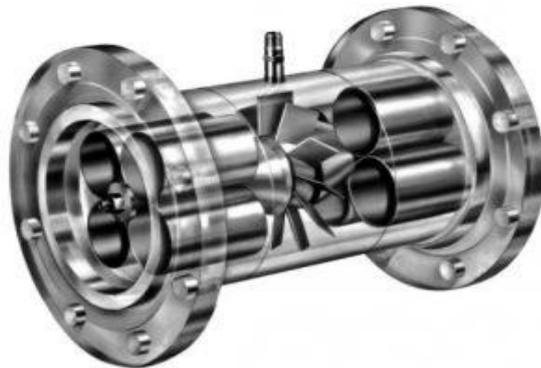
Este medidor de caudal posee una perforación que esta insertada dentro de una tubería el cual genera una caída de presión en cada extremo, por los cuales se mide la presión diferencial.



**Figura 2.13:** Medidor de caudal [27].

### Sensor de caudal tipo turbina

Este sensor de turbina es usado a conocer las revoluciones de la turbina para conocer la razón del flujo que circula por las turbulencias. Para la medición de la velocidad de giro de la turbina se utilizan transformadores electromagnéticos inductivos y capacitivos con los que se pueden determinar la frecuencia y así calcular el caudal que circula por la turbina.



**Figura 2.14:** Sensor de caudal de turbina [28].

#### 2.2.21. PLC LOGO de Siemens

Es un módulo lógico inteligente que es diseñado para proyecto de automatización en entornos industriales. Con la unidad de control de PLC LOGO se pueden crear y editar programas por medio de una interfaz Ethernet o por un cable PC, se puede cargar, subir programas externos de software de programación.



**Figura 2.15:** PLC LOGO Siemens [29].

### **2.2.22. Métodos de regulación**

El objetivo de la regulación es suministrar a la red, el caudal  $Q$  necesario.

#### **a) Estrangulamiento para $n$ constante**

Este método se genera por la caída de presión cuando un fluido atraviesa tuberías delgadas, válvulas, y obturadores. En este proceso puede haber disminución de temperatura del líquido.

El estrangulamiento corresponde a la llamada ecuación de Joule – Thomson ( $h_1 = h_2$ ).

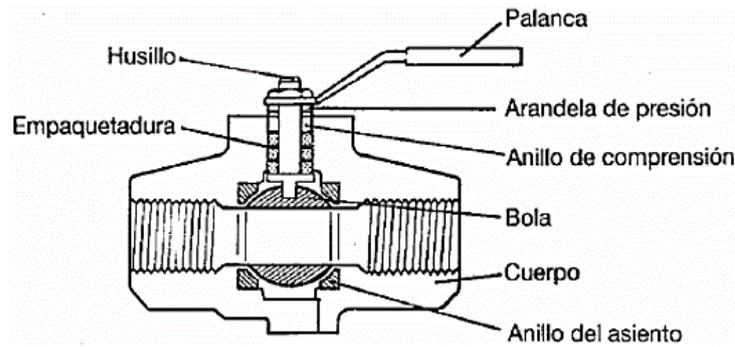
Mediante las válvulas de estrangulamiento es posible este método, pues este al obtener una velocidad alta el líquido se disipa con turbulencia.

#### **Válvulas de estrangulamiento**

Una válvula de estrangulamiento en términos coloquiales es una llave para controlar el nivel del líquido que atraviesa por una tubería, si bien se comprime la presión, no efectúa trabajo y por lo general la generación de calor es baja.

La utilización de estas válvulas es muy común según sea la aplicación y la instalación de una válvula específica se realiza de una manera adecuada si se conoce los tipos de válvulas de estrangulación, las principales son: válvulas de globo, válvulas de bola, válvulas de mariposa.

La válvula de bola comúnmente son las más utilizadas en un sistema, tienen una esfera al interior y su regulación es de un cuarto de vuelta [30].



**Figura 2.16:** Partes de una Válvula de Bola [30].

La válvula de mariposa se caracteriza por tener gran precisión, con el disco con eje descentrado en el eje de la válvula el movimiento es excéntrico y permite un mejor control de regulación [31].



**Figura 2.17:** Válvulas de mariposa [31].

#### **b) Variación de frecuencia**

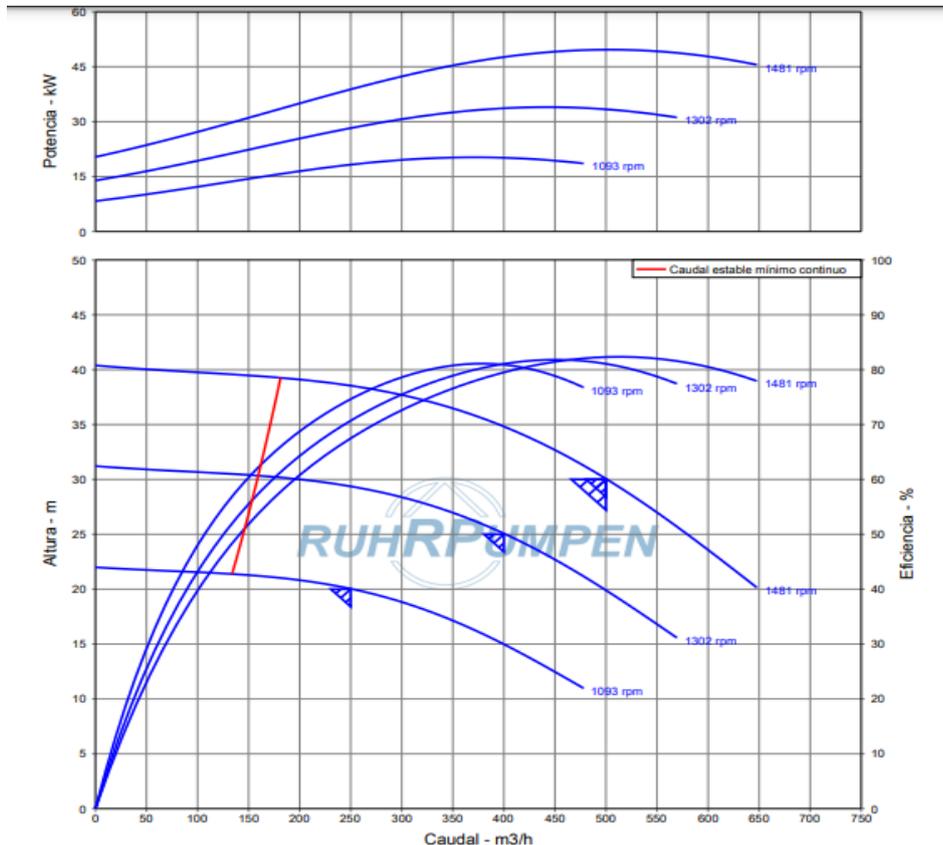
La regulación mediante la variación de frecuencia en las bombas es uno de las metodologías más aplicadas y eficientes para la regulación de caudal en las bombas hidráulicas [32].

Ventajas:

- Ahorro energético
- Confiabilidad
- Sistemas de tuberías reducidos (eliminación de válvulas de control y líneas de derivación)
- Arranque y parada suaves

La variación de frecuencia permite la variación del número de revoluciones del giro de un motor. Por lo que mediante este principio en las bombas hidráulicas es posible controlar el caudal de salida y con el mismo la curva característica de la bomba varía.

La curva características de la bomba es la interpretación del rendimiento de una bomba, la Figura 2.18. representa el rendimiento a diferentes revoluciones o la variación de frecuencia de una bomba.



**Figura 2.18:** Método de regulación mediante variación de frecuencia [32].

### 2.2.23. Cavitación

La cavitación es la principal causa a lo que refiere los problemas para el bombeo de un fluido. Muchas veces se cree que la cavitación es el problema en sí mismo de la bomba, sin embargo, el problema parte de las condiciones de instalación o en el mayor de los casos por una mala instalación o selección de la bomba. Sea el tipo de bomba que sea con una mala instalación, pueden sufrir los efectos de la cavitación [33].

La cavitación es un fenómeno caracterizado por la formación de vapor en el líquido, ocurre cuando la presión estática iguala a la presión de vapor del líquido. En bombas centrífugas, la cavitación se produce por la caída de presión en la aspiración, un incremento de la temperatura del fluido o el aumento de la velocidad de flujo.

## 2.2.24. Tipos de cavitación de las bombas hidráulicas

### a) Cavitación de succión

El fenómeno de cavitación por succión se origina cuando la bomba se encuentra en baja presión o alto vacío. Muchas veces, la caída de presión es significativa y hace que el fluido líquido cambie sus propiedades y se convierta en vapor cuando la presión local cae por debajo de la presión de saturación del fluido que se bombea [34].

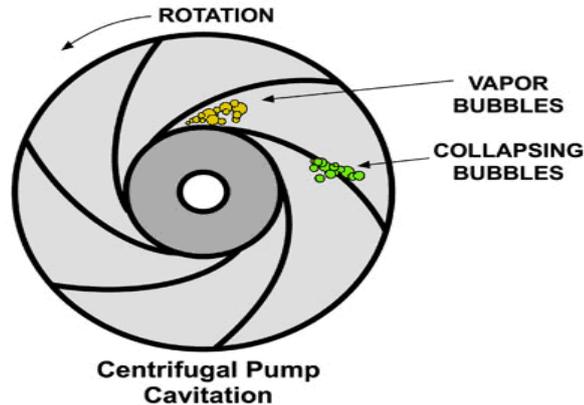


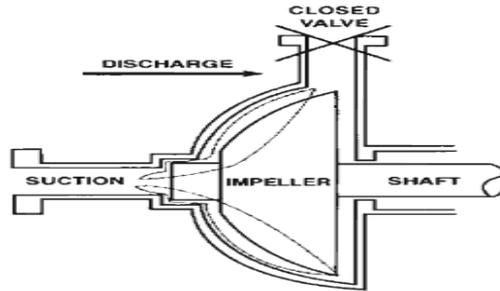
Figura 2.19: Cavitación por succión [34].

Causas de la cavitación por succión:

- La bomba trabaja lejos en la curva característica
- Malas condiciones en la succión
- Interferencia en la tubería de succión
- Tubería inapropiada
- Elevada temperatura del líquido.

### b) Cavitación de descarga

El fenómeno de cavitación de descarga se origina cuando la presión de descarga es alta o cuando el flujo de descarga está obstruido y no puede liberarse de la bomba (por ejemplo, una válvula de salida cerrada). La presión de descarga extremadamente alta hace que la mayoría del fluido bombeado quede en el interior de la bomba ocasionando el fenómeno de cavitación [34].



**Figura 2.20:** Cavitación de descarga [34].

Causas de la cavitación de descarga:

- La bomba trabaja demasiado a la izquierda en la curva de la bomba.
- Interferencia en la tubería de descarga.
- Tubería inapropiada.

Número de cavitación

El número de cavitación ( $Ca$ ) es adimensional y se aplica en los cálculos de flujo. Mediante este cálculo se determina las propiedades de la presión de flujo del fluido a la presión del vapor.

El número de cavitación se expresa como:

$$Ca = \frac{p - p_v}{\frac{1}{2}\rho v^2} \quad (2.1)$$

Donde:

$Ca$  = Número de cavitación

$p$  = presión local (Pa)

$p_v$  = presión de vapor del fluido (Pa)

$\rho$  = densidad del fluido ( $\text{kg/m}^3$ )

$v$  = velocidad del fluido (m/s)

### Consecuencias de la cavitación

La cavitación es un fenómeno indeseable que muchas veces se da por una mala instalación del sistema y una errónea selección de los elementos que conforman un sistema de bombeo. En

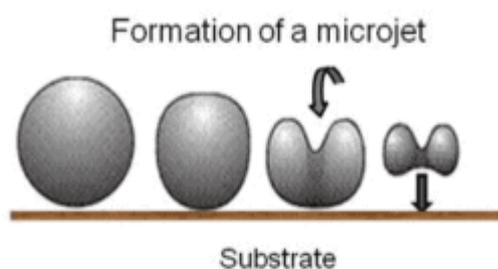
cualquier tipo de bomba la cavitación causa serios daños a los componentes (erosión), ruido, vibraciones y pérdidas de eficiencia.



**Figura 2.21:** Efectos de la cavitación [34].

El deterioro del material y elementos de los sistemas de bombeo es el problema de ingeniería más importante causado por la cavitación esto se da cuando las burbujas de vapor colapsan cerca de las superficies de los elementos que forman un sistema hidráulico. El choque de las burbujas de vapor se caracteriza por ser un proceso violento que ocasiona ondas de choque localizado altamente perjudicial en la bomba. El líquido energético forzado en diminutas cantidades crea puntos a altas temperaturas, perturbaciones localizadas y transitorias afectando al equipo y al sistema. Debido al golpe de ariete la erosión aparece como picaduras ocasionando el colapso de las burbujas de vapor. Con el aumento volumétrico del caudal el daño por cavitación se incrementa.

Los daños ocasionados por la cavitación se deben a la fatiga de los materiales ya que se utilizan materiales duros en bombas centrífugas en la mayoría de aplicaciones y debido al estrés cíclico ocasionado por el colapso repetido de las burbujas puede causar fallas locales por fatiga superficial [34].



**Figura 2.22:** Formación de burbujas de vapor [35].

El colapso de las burbujas de vapor ocasiona eventos de energía relativamente bajo, pero los colapsos altamente localizados durante extensos períodos de tiempo ocasionan la erosión de los materiales, como el acero. El fenómeno de cavitación causado por el colapso de las cavidades produce desgaste en los componentes y acorta drásticamente la vida útil de los elementos internos de la bomba y de los componentes del sistema de bombeo como tuberías, válvulas, entre otros.

### **Efectos de la cavitación en las bombas**

- Ruido. Se ocasiona por el colapso de las cavidades. Mediante el ruido se identifica la gravedad de la cavitación.
- Vibraciones. Las vibraciones del equipo son de baja frecuencia originadas por el golpe de ariete.
- Reducción de la eficiencia de la bomba. La disminución de la eficiencia en términos de ingeniería es el efecto más considerado en determinar el efecto de cavitación [34].

#### **2.2.25. NPSH**

El NPSH o ANPA (altura neta positiva de aspiración) es la diferencia entre la presión del líquido y la tensión de vapor del líquido.

El NPSH es el parámetro más importante de las bombas hidráulicas ya que nos permite conocer si existirá o no cavitación en el sistema de bombeo según se haya diseñado el sistema.

#### **2.2.26. Altura neta positiva en la succión disponible**

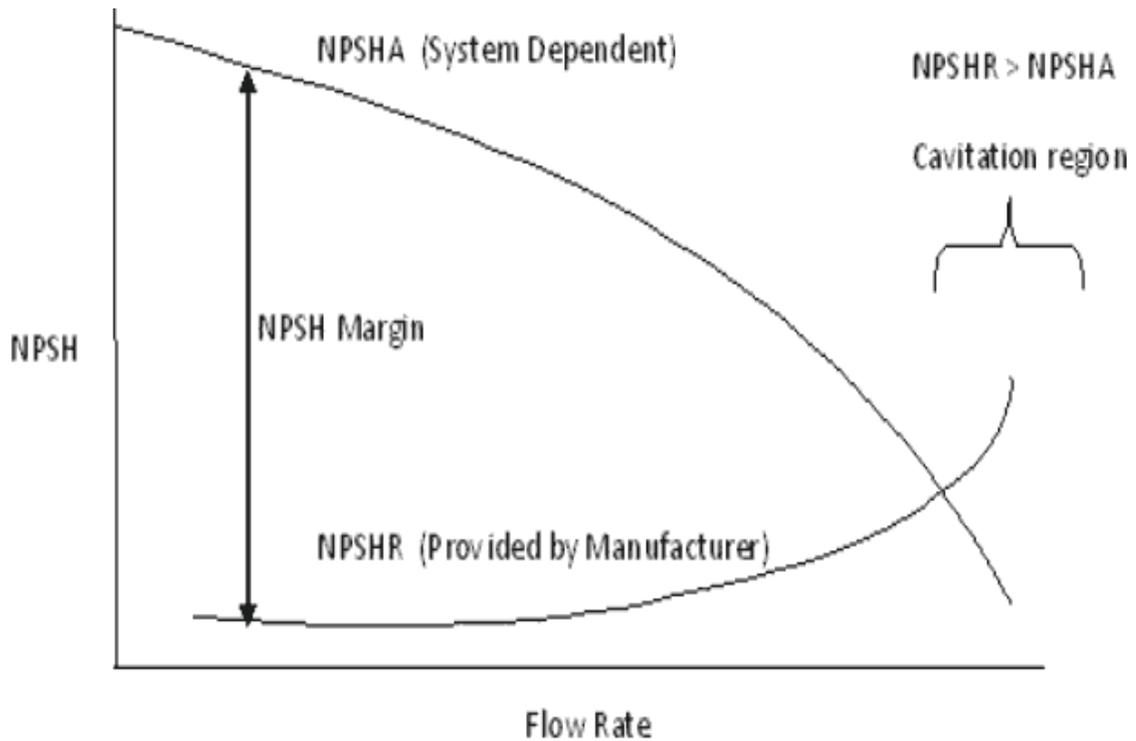
El  $NPSH_{disponible}$  se determina por las características de instalación del sistema y se puede corregir cambiando el diámetro de la tubería de succión, reduciendo la distancia en la tubería de aspiración y la cantidad de accesorios.

Para que mediante esto  $NPSH_{disponible} > NPSH_{Requerido}$ .

#### **2.2.27. Altura neta positiva en la succión requerida**

El  $NPSH_{Requerido}$  es un parámetro de la bomba, este parámetro está determinado según la bomba, y es un dato proporcionado por el fabricante en los catálogos.

Para el diseño de un sistema de bombeo es necesario comparar el  $NPSH_{disponible}$  con el  $NPSH_{Requerido}$  para determinar que el sistema sea eficiente según los cálculos y los parámetros.



**Figura 2.23:** Curva NPSH vs Q [36].

### 3. METODOLOGÍA Y MATERIALES

#### 3.1. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN DEL SISTEMA EXPERIMENTAL

Las bombas son el elemento principal de un sistema de bombeo, y es necesario el estudio para que al momento del diseño del sistema la elección de esta sea la correcta y que no influyan fenómenos de cavitación que muchas veces afecta directamente al elemento ocasionando pérdidas de energía y de producción.

Para realizar el análisis de los fenómenos que ocurren en las bombas centrífugas, se realiza el estudio previo de las variables que influyen en la selección de los elementos para la conformación de un sistema.

El proyecto se basa en la implementación de un sistema experimental de bombeo que permita el análisis de NPSH a través de variables como son la presión de succión, presión de descarga y caudal o flujo, obtenidos mediante la incorporación de transductores que realicen el tratamiento y escalonamiento de las variables analógicas para la medición de los parámetros de una bomba centrífuga de 1HP. Por medio de estos parámetros se obtendrá las curvas

características de la bomba y mediante la experimentación con válvulas que se encuentran localizadas en la tubería de succión y en la tubería de descarga se podrá comprobar el fenómeno de cavitación en las bombas centrífugas con el estrangulamiento de las dos válvulas para el debido análisis del sistema.

Las curvas de este sistema de bombeo se obtienen con la supervisión y adquisición de datos por lo que mediante un software libre se realizará la debida instrumentación para obtener las curvas características que proporciona el fabricante en el manual de la bomba. Los resultados se podrán comprobar entre los datos experimentales obtenidos del módulo y las prácticas con los datos técnicos ofrecidos en el catálogo de la bomba.

La metodología para esta propuesta permite incrementar las prácticas experimentales en el laboratorio de Fluidos de la facultad de CIYA de la Universidad Técnica de Cotopaxi, esta implementación debe ser eficiente para realizar el estudio del comportamiento de las bombas, además la familiarización de las variables con las que se trabaja en la Mecánica de Fluidos.

**Tabla 3.1.** Variables Dependientes.

<b>Variables Dependientes</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>
Flujo volumétrico	Es la cantidad de líquido que atraviesa a través de una tubería por unidad de tiempo.	m <sup>3</sup> /h
Presión de succión	Es la presión (presión negativa) en el lado de aspiración de la bomba.	Pa
Presión de descarga	Describe la presión de un líquido cuando sale de una bomba.	Pa

**Tabla 3.2:** Variables Independientes.

<b>Variables Independientes</b>
Posición de cierre de las válvulas de succión.
Frecuencia de rotación en la bomba.

### 3.2. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE BOMBEO

El sistema de bombeo está diseñado con las tuberías características de un sistema hidráulico, la tubería de succión y tubería de descarga, en donde por medio de los distintos métodos de regulación se puede forzar el fenómeno de cavitación.

#### 3.2.1. Condiciones del fluido en las que va a trabajar el equipo

Se utilizará el agua como el fluido de este sistema, y se usará un termómetro para la medición de la temperatura y determinar sus propiedades. Las propiedades del agua a diferentes temperaturas se muestran en la Tabla 3.3.

**Tabla 3.3:** Propiedades del agua a distintas temperaturas

Temperatura T (°C)	Densidad $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Módulo elasticidad K.10 <sup>-9</sup> (N/m <sup>2</sup> )	Viscosidad dinámica $\mu$ .10 <sup>-3</sup> (N.s/m <sup>2</sup> )	Viscosidad cinemática $\nu$ .10 <sup>6</sup> (m <sup>2</sup> /s)	Tensión superficial $\sigma$ (N/m)	Presión de vapor Pv kPa
0	999,8	1,98	1,781	1,785	0,0756	0,61
5	1000	2,05	1,518	1,519	0,0749	0,87
10	999,7	2,1	1,307	1,306	0,0742	1,23
15	999,1	2,15	1,139	1,14	0,0735	1,7
20	998,2	2,17	1,002	1,003	0,0728	2,34
25	997	2,22	0,89	0,893	0,072	3,17
30	995,7	2,25	0,798	0,8	0,0712	4,24
40	992,2	2,28	0,653	0,658	0,0696	7,38
50	988	2,29	0,547	0,553	0,0679	12,33
60	983,2	2,28	0,466	0,474	0,0662	19,92
70	977,8	2,25	0,404	0,413	0,0644	31,16
80	971,8	2,2	0,354	0,364	0,0626	47,34
90	965,3	2,14	0,315	0,326	0,0608	70,1
100	958,4	2,07	0,282	0,294	0,0589	101,33

#### 3.2.2. Características técnicas de la bomba centrífuga

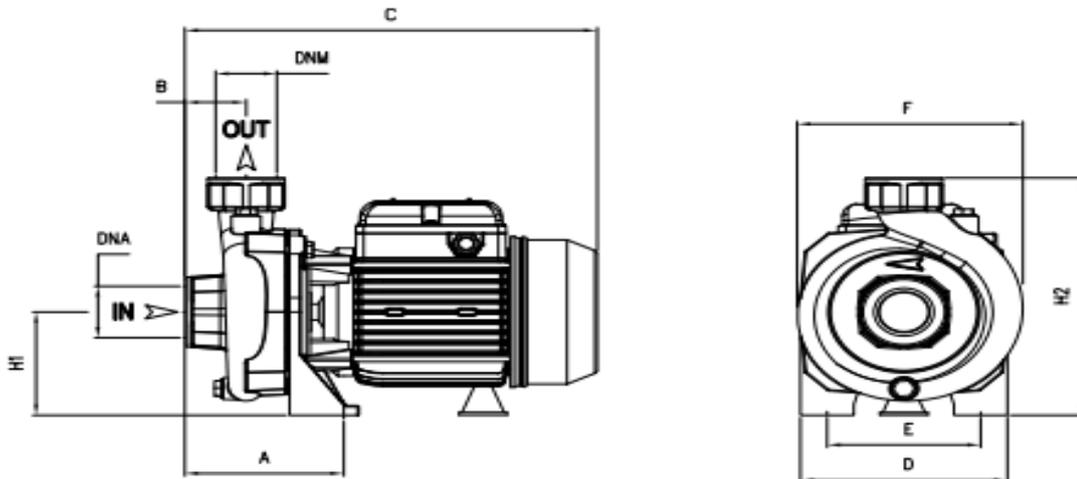
Este equipo tiene la característica de ser una bomba de caudal mediano para aplicaciones pequeñas y medianas, utilizadas para aplicaciones domésticas o agrícolas. La bomba centrífuga es de la marca PENTAX, su potencia de trabajo es de 1 hp. Los parámetros técnicos de la bomba se muestran en la siguiente tabla.

**Tabla 3.4:** Parámetros técnicos de la bomba.

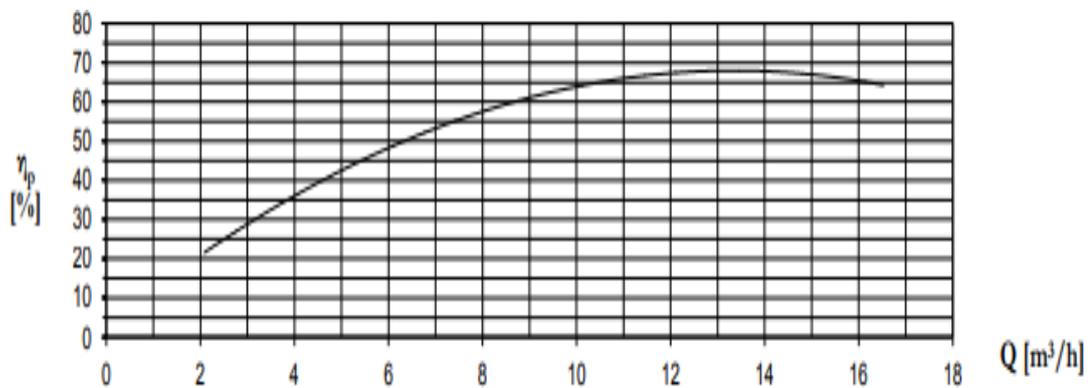
Type: CRT 100/00		
Marca: PENTAX	V: 3~ 220-380V / 1~ 220V	I: 4,15-2,4 A
P: 1 HP/0,74 kW	Q: 50-280 l/min	n: 3400 rev/min
Frecuencia: 60 Hz	Hmax: 20,5 m	Hmin: 10,5 m

Las bombas centrífugas tienen características técnicas para la interpretación de la eficiencia en un sistema específico, por lo que el catálogo de la bomba es importante para la correcta selección y con ello se obtiene la curva característica de una bomba, la interpretación es importante para el análisis de una bomba hidráulica.

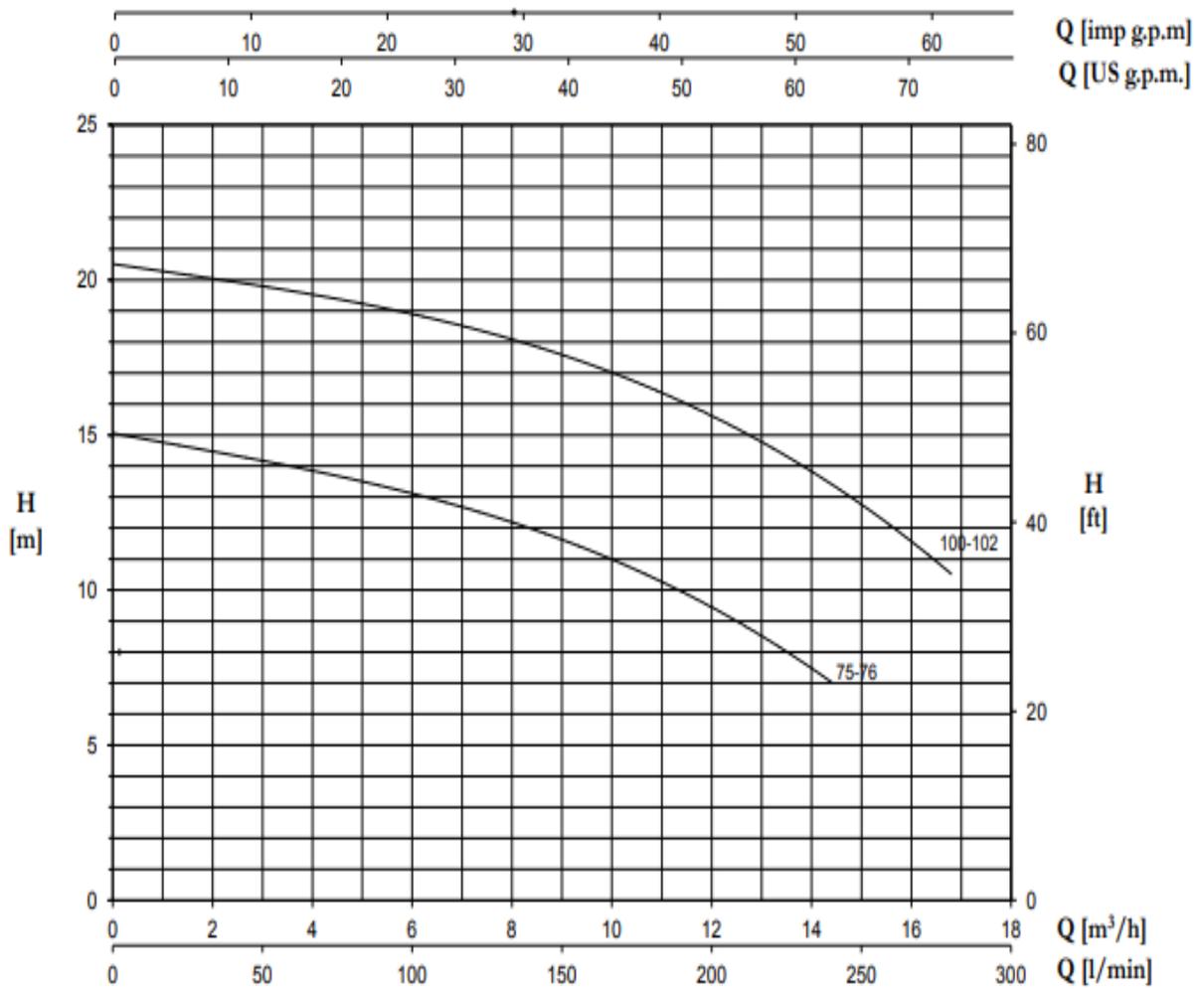
### 3.2.2.1. Curvas características de la bomba centrífuga PENTAX CR



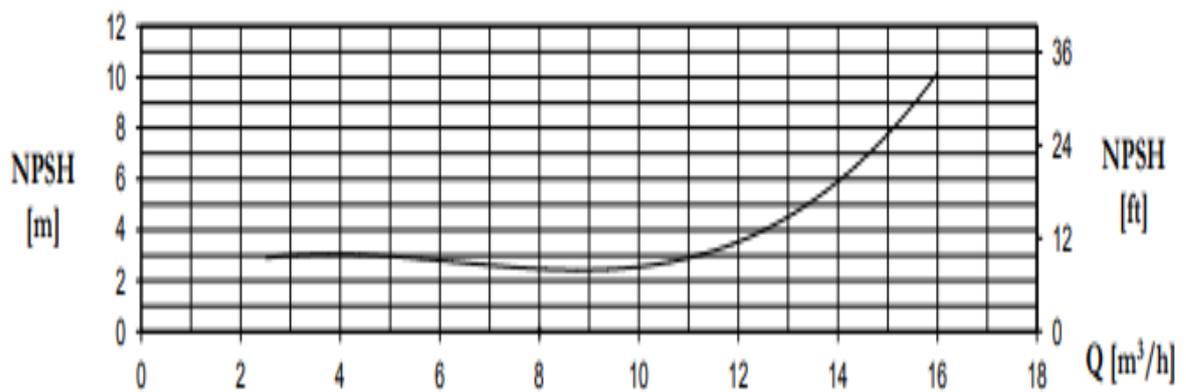
**Figura 3.1:** Bomba centrífuga PENTAX CRT 100/00.



**Figura 3.2:** Curva  $\eta$  vs Q.



**Figura 3.3:** Curva H vs Q.



**Figura 3.4:** Curva NPSH vs Q.

### 3.2.3. Elementos de Protección para el sistema de bombeo

Mediante los elementos de protección eléctrica se protegerá el circuito de fuerza que alimentará a la bomba. Por lo que se debe elegir los elementos adecuados para un correcto funcionamiento del sistema.

### Contactor Metasol MC-9b



**Figura 3.5:** Contactor MC-9b.

#### Características:

- Tipo de contactor: Contactor 3 polos.
- Tensión de alimentación: 220 V.
- Tipo de alimentación: VCA / VCCVCA.
- Corriente nominal es AC1 (A) IEC-60947: 25
- Corriente nominal en tensión AC3 200-240V (A) IEC-60947: 11

### Relé térmico MT-32



**Figura 3.6:** Relé Térmico MT-32.

#### Características:

Tensión nominal de funcionamiento: 690 V.

Tensión nominal de aislamiento: 690 V.

Tensión soportada de impulso nominal: 6 kV.

Rango de ajuste: 0,1 ~ 40 A.

### 3.2.4. Elementos del sistema hidráulico

**Tabla 3.5:** Elementos del sistema de bombeo.

Descripción	Cantidad
Válvulas de compuerta de 1 in.	2
Válvula de bola de 1 in.	1
Válvula de bola de 3/4 in.	1
Universal de 1 in.	2
Uniones de 1 in.	11
Uniones de 2 in.	2
Codos de 1 in.	5
Codos de 2 in.	1
Salida de fluido	1
Entrada de fluido	1
Tanque	1

#### Válvula de bola PVC o esfera

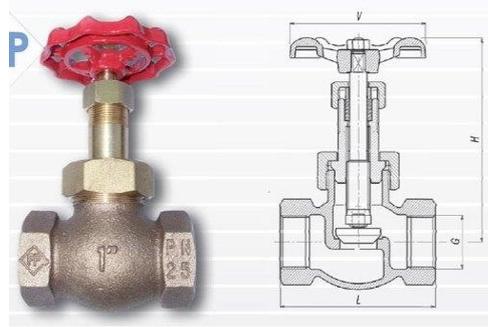
Es una válvula que se abre mediante una manija o engranaje de válvula. Esta válvula permite terminar y controlar el paso del fluido de agua en los sistemas de presión en agua fría.



**Figura 3.7:** Válvula de bola PVC.

#### Válvula de compuerta

La válvula de globo tiene un movimiento perpendicular del disco en la relación con el aislamiento lo que garantiza que se forme en forma de anillos se cierran gradualmente a medida que la válvula va cerrando adecuadamente para la regulación.



**Figura 3.8:** Válvula de compuerta.

### 3.2.5. Métodos de regulación en el banco experimental

#### 3.2.5.1. Estrangulamiento para $n$ constante

La diferencia cinética no se ve afectada a pesar de que la velocidad de salida del fluido es mayor que la velocidad a la entrada.

$$Energía\ cinética_{salida} - Energía\ cinética_{entrada} = 0 \quad (3.1)$$

La diferencia de energía potencial es nula por que la variación de altura es despreciable. No obstante, hay una variación de presión significativa; esto genera una diferencia de la energía contenida en el trabajo de flujo.

$$(Presión * volúmen)_{salida} - (Presión * volumen)_{entrada} \neq 0 \quad (3.2)$$

Por los cambios de temperatura existe variación de energía interna en la entrada y salida del proceso.

$$Energía\ interna_{salida} - Energía\ interna_{entrada} \neq 0 \quad (3.3)$$

Ya que no existe una energía en circulación (trabajo o calor) para realizar el proceso de estrangulamiento. Además, como pasa de manera frágosa y el área es pequeña, no hay transferencia de energía calórica. Es adiabático, no existe manera en la cual la energía que posee el fluido cambie en la entrada y la salida.

$$Pv_{salida} + u_{salida} = Pv_{entrada} + u_{entrada} \quad (3.4)$$

No siempre el estrangulamiento hace que la temperatura reduzca. El coeficiente de Joule-Thomson representa el comportamiento de la temperatura del fluido en el estrangulamiento.

Se puede calcular como:

$$\mu_{JT} = \frac{\Delta T}{\Delta P} \quad (3.5)$$

$\mu_{JT} < 0$  la temperatura aumenta

$\mu JT = 0$  la temperatura se mantiene

$\mu JT > 0$  la temperatura disminuye

### 3.2.5.2. Variación de frecuencia

Mediante el variador de frecuencia Kinco VFD CV100 se realizará la regulación de caudal  $Q$  para el sistema, ajustándose en un parámetro de operación en intervalos de 20 Hz, siendo 40 Hz el mínimo y 60 Hz el máximo para la obtención de las curvas de la bomba.



**Figura 3.9:** Variador de frecuencia Kinco CV100

### 3.2.6. Diseño del banco experimental.

Mediante un software de modelado 3D se puede realizar el diseño del sistema de bombeo que se caracteriza por la tubería de succión y tubería de descarga, implementado con el sensor de presión de vacío, sensor de presión de descarga y el sensor de flujo o caudal.



**Figura 3.10:** Diseño del banco experimental y sus accesorios.

### 3.3. SISTEMA DE SUPERVISIÓN Y ADQUISICIÓN DE DATOS

Mediante la instrumentación se obtendrá un sistema de supervisión y adquisición de datos que permitirá medir las variables del banco experimental de bombeo como es la presión de succión, presión de descarga y el caudal y a partir de ello se podrá obtener las curvas características del sistema.

Con la utilización de un software libre se podrá receptor los datos y mediante la programación se podrá visualizar las curvas características del sistema de bombeo.

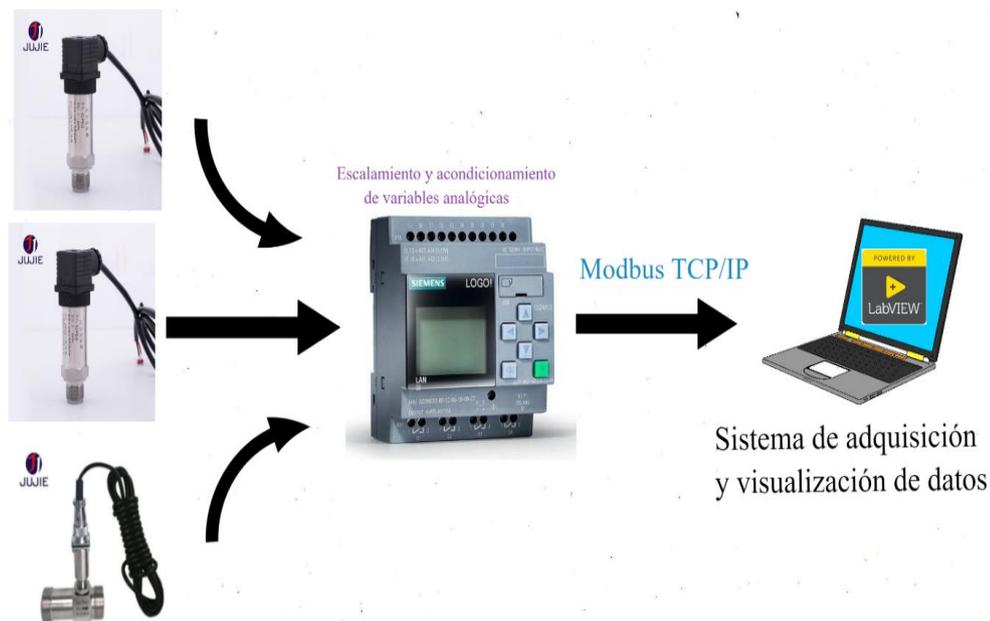


Figura 3.11: Sistema de Adquisición de Datos.

### 3.4. Sensores de Medición

#### 3.4.1. Medidor de flujo de turbina líquida GT-LWGY

Cuando el líquido medido fluye a través del sensor, el impulsor se ve obligado a girar bajo la acción del fluido y su velocidad de rotación es proporcional a la velocidad de flujo promedio de la tubería. La rotación del impulsor cambia periódicamente el valor de la resistencia magnética del circuito magnético, y el flujo magnético en la bobina de detección cambia periódicamente, generando una fuerza electromotriz inducida que tiene la misma frecuencia que la frecuencia de rotación de la pala, y luego de ser amplificada, se convierte y es procesada.

La ecuación de caudal práctica para un caudalímetro de turbina es:

$$Q = \frac{f}{K} \quad (3.6)$$

Donde:

Q: Caudal (m<sup>3</sup>/s)

f: Frecuencia de Salida (Hz)

K: Factor de medida (l/ m<sup>3</sup>)

Para el banco experimental se utilizará el sensor de diámetro DN40 especificado en la tabla ya que según las características de la bomba es el que cumple con el rango de medición de caudal. La Figura 3.12 muestra el factor de medida (K) y la frecuencia (f) aplicada en la programación para el acondicionamiento y parametrización en la lectura del caudal con el sensor.

Instrument diameter (mm)	Meter factor (time / L)	Frequency band (Hz)
DN 4	16000	177.8-1111
DN 6	8200	227.8-1366
DN 10	1800	100.0-600
DN 15	830	138.3-1383
DN 20	600	133.3-1333
DN 25	212	58.9-588
DN 32	150	62.5-625
DN 40	77	42.8-427
DN 50	27	30.0-300
DN 65	12.1	23.5-235
DN 80	6.1	16.9-169
DN 100	4.3	23.8-238
DN 125	3.1	21.5-215
DN 150	2.2	18.3-183
DN 200	1.2	26.7-266

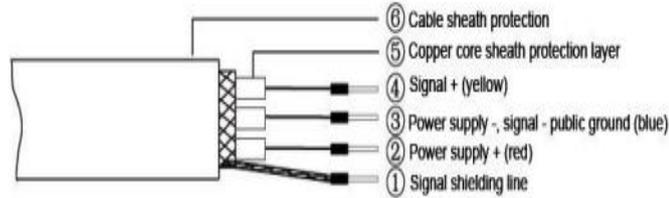
**Figura 3.12:** Factor de medición y frecuencia típica en los sensores.

**Tabla 3.6:** Parámetros técnicos del medidor de flujo.

Medidor de flujo GTLWGY40NLC1SSN	Características Técnicas
	<p>Rango de Medición: 2-20 m<sup>3</sup>/h</p> <p>Nivel de precisión: ±0,5%</p> <p>Factor de Medida: 74,32 Pulsos/litro</p> <p>Tensión de alimentación: 12 -24 VDC</p> <p>Salida de señal: Pulso de 4-20mA</p> <p>Presión máx: ≤6.3 MPa</p>

## Conexión Eléctrica

La figura 4.13. muestra los terminales de conexión del medidor de flujo.



**Figura 3.13:** Conexión Eléctrica del medidor de flujo GTLWGY.

### 3.4.2. Transmisores de presión GTPB20

El transmisor de presión compacto GTPB20 utiliza un chip de detección de presión de alto rendimiento y una tecnología avanzada de procesamiento de circuitos y compensación de temperatura para convertir los cambios de presión en señales de voltaje o corriente lineal. y al ponerse en contacto con algunos materiales compatibles con el medio gaseoso y líquido, se puede usar para medir presión, presión negativa y presión absoluta.

Este producto es ampliamente utilizado en plantas de agua, refinerías de petróleo, plantas de tratamiento de aguas residuales, industria ligera, maquinaria y otros campos industriales para lograr la medición de presión de líquido, gas y vapor.

Para el sistema se utilizará dos sensores de presión, en la tubería de succión se utilizará un medidor de presión de vacío o vacuómetro, mientras que en la tubería de descarga se utilizará un medidor de presión. Según los datos técnicos de la bomba la presión máxima de trabajo en la bomba es de 6 Bares por lo que a continuación se describen las características técnicas de los sensores utilizados en el banco experimental.

**Tabla 3.7:** Parámetros técnicos de los medidores de presión.

<b>Modelo del transmisor de presión: GTPB20B0.6MBIG1/2C3</b>	<b>Características Técnicas</b>
	<p>Rango de presión: 0 ~ 6 bar                      Salida de señal: 4-20mA                      Precisión: <math>\pm 0.5\%</math>                      Fuente de alimentación: 24VDC                      Conexión: G1/2 hilo macho</p> <p>Fabricante: Anhui Jujie tecnología de automatización Co. LTD.</p>

Modelo del transmisor de presión: GTPB20B0.1MBIG1/2C3	Características Técnicas
	<p>Rango de presión: -1 ~ 0 bar  Salida de señal: 4-20mA  Precisión: ± 0.5%  Fuente de alimentación: 24VDC  Conexión: G1/2 rosca macho</p> <p>Fabricante: Anhui Jujie tecnología de automatización Co. LTD.</p>

### 3.5. Ecuaciones

#### 3.5.1. Caudal y Presión

Los valores brindados por los transductores de flujo y presión servirán para la medición del caudal, presión en la succión y presión de descarga.

#### Diferencia de Presión $\Delta P$

La variación de presión se obtiene de la diferencia de presión a la entrada o succión de la bomba con la presión de salida o descarga. La presión de entrada suele ser positiva o negativa. Para obtener la diferencia de presión se ingresó la fórmula en la programación del software, la ecuación se representa de la siguiente manera:

$$\Delta P = P_{salida} - P_{entrada} \quad (3.7)$$

Donde:

$\Delta P$ : Diferencia de presión (Pa)

$P_{salida}$ : Presión de salida de la bomba (Pa)

$P_{entrada}$ : Presión de entrada a la bomba (Pa)

#### Altura de Elevación $\Delta H$

La altura de elevación se refiere a la elevación máxima a la que una bomba puede bombear el líquido. La ecuación matemática que relaciona la altura se expresa como:

$$\Delta H = \frac{\Delta P}{\rho \cdot g} \quad (3.8)$$

Donde:

$\Delta H$ : Altura de elevación (m)

$\Delta P$ : Diferencia de presión (Pa)

$\rho$  = Densidad del agua ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )

$g$  = Gravedad ( $\text{m}/\text{s}^2$ )

### 3.5.2. Potencia y Rendimiento

#### Pérdidas hidráulicas

Surgen como resultado del rozamiento hidráulico y la formación de torbellinos en la zona de paso de la máquina.

$$\eta_h = \frac{H_b}{H_{tz}} (0,8 - 0,96) \quad (3.9)$$

Donde:

$\eta_h$ : Pérdidas hidráulicas (%)

$H_b$ : Altura de bombeo (m)

$H_{tz}$ : Altura de la bomba álabes (m)

Factores de los que depende:

- a) Forma del conducto de paso
- b) Tratamiento de las superficies interiores
- c) Viscosidad el líquido

#### Pérdidas volumétricas

Se establece por el paso del fluido a través de las holguras entre el impelente y el cuerpo de la máquina, desde la zona de alta presión a la de baja.

$$\eta_v = \frac{Q}{Q + \Delta Q} (0,96 - 0,98) \quad (3.10)$$

Donde:

$\eta_v$ : Pérdidas volumétricas (%)

$Q$ : Caudal ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

$\Delta Q$ : Diferencia de caudal ( $\text{m}^3/\text{h}$ )

Factores de los que depende:

- Holgura o juego radial,  $\delta_r$

### **Potencia interna**

Es la potencia desarrollada por las paletas de trabajo que se mueven en el fluido.

$$\eta_{int} = \eta_h \cdot \eta_v \quad (3.11)$$

$$\eta_{int} = g\rho(Q + \Delta Q) \quad (3.12)$$

Donde:

$\eta_{int}$ : Potencia Interna (%)

g: gravedad ( $m/s^2$ )

$\rho$ : densidad ( $kg/m^3$ )

### **Rendimiento mecánico**

Se debe al rozamiento mecánico de los cojinetes y las empaquetaduras del árbol y al rozamiento hidráulico de las superficies externas de la rueda.

$$\eta_{mec} = \frac{\eta_{int}}{N} \quad (3.13)$$

$\eta_{mec}$ : Rendimiento mecánico (%)

N: es la potencia suministrada por el árbol de la máquina

Factores de los dependen:

- Propiedades mecánicas
- Estructura
- Estado de los cojinetes

### **Rendimiento de la bomba**

Se relacionan todos los rendimientos de la máquina.

$$\eta_{bomba} = \eta_h \cdot \eta_v \cdot \eta_{mec} \quad (3.14)$$

#### **3.5.3. Curvas características**

Es la representación gráfica de cualquier parámetro con respecto al caudal suministrado por la bomba. Los catálogos de los fabricantes ofrecen estas curvas características.

$H$  vs  $Q$

$N$  vs  $Q$

$n$  vs  $Q$

$NPSH$  vs  $Q$

### 3.5.4. Semejanza en Máquinas de Flujo

Son cálculos precisos de los elementos, en el diseño de máquinas de flujo se utilizan datos experimentales.

#### Leyes de semejanza

##### Ecuación del caudal

$$Q_a = \pi D_{2a} b_{2a} C r_{2a} \eta_{va} \quad (3.15)$$

$$Q_b = \pi D_{2b} b_{2b} C r_{2b} \eta_{vb} \quad (3.16)$$

##### Ley de Semejanza de caudal

$$\frac{Q_a}{Q_b} = \frac{D_{2a}^3 n_a \eta_{va}}{D_{2b}^3 n_b \eta_{vb}} \quad (3.17)$$

La relación entre caudales de 2 máquinas semejantes es:

- Proporcional al cubo del coeficiente  $\delta_l$
- Proporcional a la 1ra potencia de  $n$  y  $\eta_v$

##### Ecuación de la carga

$$H_a = u_{2a} C u_{2a} \eta_{\square a} \quad (3.18)$$

$$H_b = u_{2b} C u_{2b} \eta_{\square b} \quad (3.19)$$

##### Ley de Semejanza de la carga

$$\frac{H_a}{H_b} = \frac{D_{2a}^2 n_a^2 \eta_{\square a}}{D_{2b}^2 n_b^2 \eta_{\square b}} \quad (3.20)$$

La relación entre cargas de 2 máquinas semejantes es:

- Proporcional al cuadrado del coeficiente  $\delta_l$  y de  $n$
- Proporcional a la 1ra potencia de  $\eta_h$

### Ecuación de la Presión

$$P_a = \rho_a H_a = \rho_a u_{2a} C u_{2a} \eta_{ha} \quad (3.21)$$

$$P_b = \rho_b H_b = \rho_b u_{2b} C u_{2b} \eta_{hb} \quad (3.22)$$

### Ley de Semejanza de la presión

$$\frac{P_a}{P_b} = \frac{\rho_a D_{2a}^2 n_a^2 \eta_{ha}}{\rho_b D_{2b}^2 n_b^2 \eta_{hb}} \quad (3.23)$$

La relación entre presiones de 2 máquinas semejantes es:

- Proporcional al cuadrado del coeficiente  $\delta_l$  y de  $n$
- Proporcional a la 1ra potencia de  $\eta_h$  y  $\rho$

### Ecuación de la Potencia

$$Na = \frac{\rho_a Q_a H_a}{\eta_{ba}} = \frac{\rho_a D^5 2a n^3 a}{\eta_{ba}} \quad (3.24)$$

$$Nb = \frac{\rho_b Q_b H_b}{\eta_{bb}} = \frac{\rho_b D^5 2b n^3 b}{\eta_{bb}} \quad (3.25)$$

### Ley de Semejanza de la potencia

$$\frac{Na}{Nb} = \frac{\rho_a D^5 2a n^3 b n_{bb}}{\rho_b D^5 2a n^3 b n_{ba}} \quad (3.26)$$

La relación entre la potencia de 2 máquinas semejantes es:

- Proporcional a la quinta potencia del coeficiente  $\delta_l$
- Proporcional a la 1ra potencia de  $\eta_b$  y  $\rho$
- Proporcional al cubo de  $n$

### Leyes de Semejanza del Caudal

$$Q_b = Q_a \cdot \left( \frac{n_a}{n_b} \right) \quad (3.27)$$

### Leyes de Semejanza de la altura

$$\text{Ecuación } H_b = H_a \cdot \left( \frac{n_a^2}{n_b^2} \right) \quad (3.28)$$

Donde:

Q: Caudal (m<sup>3</sup>/h)

n: número de revoluciones (rev/min)

H: Altura (m)

#### Pasos:

- Seleccionar en la curva “a” el par de puntos  $Q_a'$  y  $H_a'$
- Con las ecuaciones, obtener el par de puntos  $Q_b'$  y  $H_b'$
- Se repiten los pasos 1 y 2, con otros pares
- Unir con una curva suave, los puntos 1b, 2b, 3b

#### 3.5.5. Velocidad Específica, $n_s$

La velocidad específica,  $n'$  es la frecuencia de rotación de la máquina, geoméricamente semejante a la máquina dada, pero con un caudal  $Q=1$  m<sup>3</sup>/s y una altura  $H=0,102$  m con máximo rendimiento.

$$n' = n \frac{\sqrt[3]{Q}}{(H)^4} \quad (3.29)$$

Práctica de las máquinas centrífugas

$$n_s = \frac{n\sqrt[3]{Q}}{(H)^4} \quad (3.30)$$

Donde:

$n_s$ : velocidad específica (rev/min)

$n$ : número de revoluciones nominal (rev/min)

$Q$ : caudal ( $m^3/h$ )

$H$ : altura de bombeo (m)

### 3.5.6. Cálculo de Altura Neta Positiva de Succión

El cálculo de  $NPSH_{disponible}$  se puede realizar mediante las siguientes fórmulas:

$$(NPSH)_{disp} = \frac{P_{atm}}{\gamma} \pm H_{succ} - \Sigma h - H_t \quad (3.31)$$

$$\Sigma h = \left( \frac{\lambda_t \cdot l_t}{d_{tub}} + \Sigma \zeta_{succ} \right) \cdot \frac{8 \cdot Q^2}{\pi^2 \cdot d^4 \cdot g} \quad (3.32)$$

El cálculo de  $NPSH_{requerido}$  se puede realizar mediante las siguientes fórmulas:

$$Ecuación (NPSH)_{req} = 10 * \left( \frac{n \sqrt{Q}}{C} \right)^{3/4} \quad (3.33)$$

Bombas con el rodete en voladizo

$$C = 880 \log n_s^{3/4} \quad (3.34)$$

Bombas con el rodete entre apoyos

$$C = 800 \log n_s^{3/4} \quad (3.35)$$

### Medidas para eliminar la cavitación (en función del $NPSH_{disponible}$ )

$H_s$ : Disminuir altura de succión.

Resistencia:

- Disminuir las pérdidas locales de la succión.
- Aumento del diámetro de la tubería de succión.
- Disminuir longitud de la tubería de succión.

$H_v$ : Disminuir la temperatura del líquido.

### 3.5.7. DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DEL $NPSH_{Requerido}$

Para determinar el  $NPSH_{Requerido}$  de una bomba se realiza en un banco de ensayos con el fluido en circuito cerrado; para el caudal y altura la succión de la bomba se somete a baja presión.

Para ello se coloca un vacuómetro a la entrada de la tubería de succión para medir la presión de vacío y una válvula en la descarga de la bomba para variar el caudal y un medidor de flujo para medir el caudal y la velocidad de entrada.

Para una cierta altura de aspiración  $H$  (m) se gira gradualmente la válvula hasta que aparezca la cavitación; en ese momento se miden el caudal y la presión de succión y se obtiene el  $NPSH_{Requerido}$  correspondiente. Repitiendo el ensayo con otras alturas de aspiración  $H_a$  se obtienen una serie de puntos ( $NPSH_{Requerido}$ ) de la curva característica, que primero es decreciente y después creciente, variando mucho estas circunstancias de unas bombas a otras. En el momento en que la altura diferencial o el rendimiento de la bomba cae en un 3% de su valor, se considera que la bomba comienza a cavitarse por falta de  $NPSH_{disponible}$  en la tubería; en ese instante el  $NPSH_{Requerido} = NPSH_{disponible}$ .

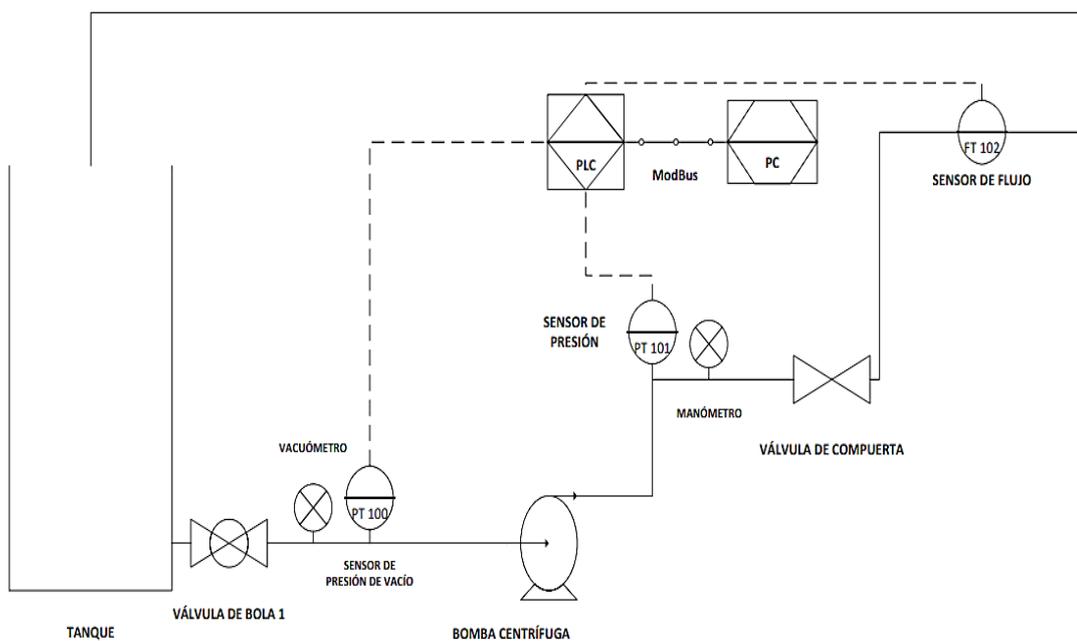
### 3.5.8. Porcentaje de error relativo

Para el cálculo del porcentaje de error que existe entre la experimentación y la teoría se utiliza la siguiente ecuación:

$$ERROR_{relativo} = \frac{Teórico - Experimental}{Teórico} \cdot 100\% \quad (3.36)$$

## 4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

La propuesta del banco experimental de un sistema de bombeo para el análisis de altura neta positiva de succión tiene el fin de la ejecución de prácticas experimentales para la comprensión teórica práctica de los estudiantes y futuros profesionales, mediante la bomba, que es el elemento principal de estudio dentro de este sistema se realizará la impulsión del fluido que será aspirado desde el tanque de reserva y descargado en el mismo, mediante la utilización de transductores se podrá medir el caudal ( $m^3/h$ ), presión de aspiración (Bar) y presión de descarga (Bar). Estas variables permitirán visualizar, analizar y comprobar las curvas características de la bomba centrífuga que normalmente el fabricante ofrece en los catálogos. Mediante la programación de un PLC LOGO de Siemens se realizará la parametrización y acondicionamiento de las señales eléctricas dadas por los sensores para obtener las variables físicas antes mencionadas y mediante la comunicación Modbus TCP/IP estos datos serán enviados hacia un software libre para la monitorización y adquisición de datos. Esto nos permitirá realizar pruebas en la bomba a distintas frecuencias para obtener la curva característica, además experimentalmente en el banco se podrá simular el efecto de cavitación conociendo que si el  $NPSH_{DISPONIBLE} < NPSH_{REQUERIDO}$  la bomba cavitara, eso se obtiene mediante la reducción de la resistencia de flujo en la aspiración con la válvula de compuerta ubicada en la tubería de succión. Los datos serán adquiridos y comparados a distintas frecuencias.



**Figura 4.1:** Diagrama P&ID del sistema de flujo.

#### 4.1. ESCALAMIENTO DE LOS TRANSMISORES DE PRESIÓN Y CAUDAL

El escalamiento de los sensores ayuda a transformar una señal eléctrica proporcionada por el sensor en una variable física como la presión y caudal mediante el acondicionamiento y parametrización realizada en el PLC. Generalmente los transmisores son lineales, por lo que el escalamiento corresponde a una ecuación lineal.

$$y - y_1 = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} (x - x_1) \quad (4.1)$$

Valores de voltaje estándar

2V – 10V

Datos Transmisor de salida

4 mA - 20 mA

Aplicación de la Ley de Ohm utilizando 2V – 10V

$$R = \frac{V}{I}$$

$$R = \frac{2V}{0,004 A} = 500\Omega$$

$$R = \frac{V}{I}$$

$$R = \frac{10V}{0,02 A} = 500\Omega$$

Por lo que la resistencia utilizada en ambos sensores de presión será de 500Ω.

##### 4.1.1. Parametrización y acondicionamiento de los sensores de presión en el PLC LOGO Siemens.

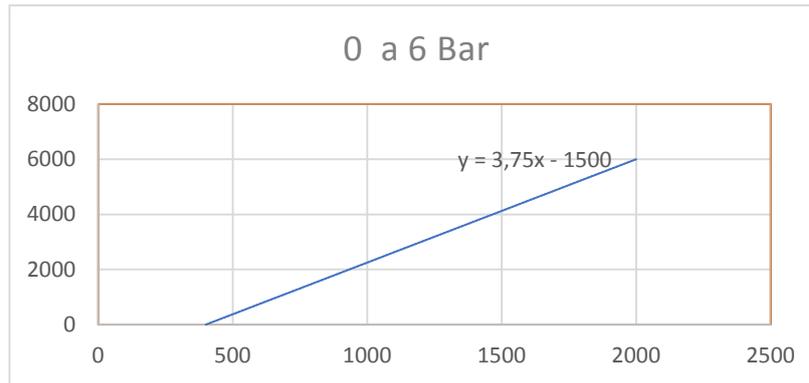
Existe una variedad de métodos para realizar el acondicionamiento de los sensores por lo que mediante la programación se realiza la configuración analógica como se muestra en la figura 4.2.

**Figura 4.2:** Configuración analógica de los sensores.

Mediante el bloque de la instrucción aritmética se acondiciona los valores de los sensores de acuerdo al rango de medición proporcionada por el fabricante.

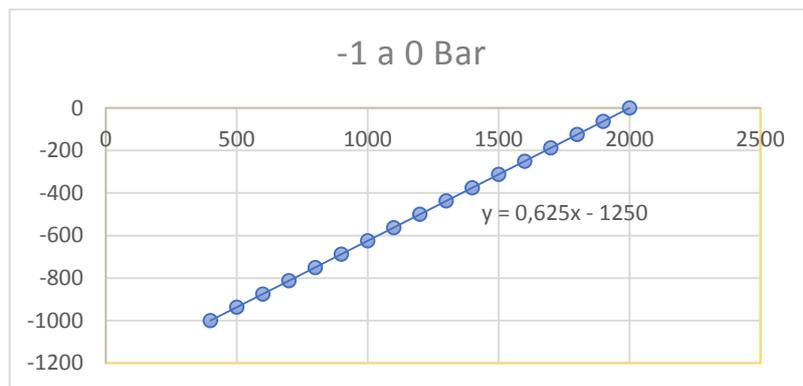
La figura 4.3 muestra la instrucción aritmética del sensor de presión que tiene un rango de medición de 0 a 6 Bar o en términos de BITS sería de 0 a 6000 bits ya que el PLC LOGO no acepta valores con decimales y para la aplicación se necesita leer el dato de presión con decimales, mediante la resta se regresa a 0 el valor del bit configurado anteriormente de 4 a 20 mA o de 400 a 2000 bits. Las entradas analógicas del PLC LOGO son de 0 a 10 V o 0 a 20mA en este caso la señal de salida de los sensores es de 4 a 20 mA o de 2 a 10 V, mediante esta lógica se realiza el cálculo para determinar la ecuación de la recta.

**Figura 4.3:** Instrucción Aritmética 0 a 6 Bar.



**Figura 4.4:** Escalamiento del PLC Bar-Bits 0~6Bar.

Para el sensor de presión de -1 a 0 Bar se aplica la misma lógica de programación con la diferencia de que el escalamiento del sensor se encuentra en el cuarto cuadrante como muestra la figura 4.5 por que la medición de presión es negativa o de succión.



**Figura 4.5:** Escalamiento del PLC Bar-Bits -1~0Bar.

#### 4.1.2. Parametrización y acondicionamiento del sensor de flujo en el PLC LOGO Siemens.

De acuerdo a los parámetros del fabricante se procede a realizar el escalamiento en el sensor de flujo tipo turbina, la señal de salida de este sensor es de pulso por lo que la entrada es digital para la medición de la frecuencia y la respectiva parametrización en el PLC LOGO.

Especificaciones del medidor de flujo:

Rango de flujo

2 – 20 m<sup>3</sup>/h

Banda de frecuencia

42,8 – 427 Hz

Factor de medición según el fabricante: 74,32 Pulsos/Litro

Mediante la ecuación 3.6 se puede determinar el caudal.

Entonces:

$$Q = \frac{f}{K}$$

$$Q = \frac{f}{74,32 \text{ Pulsos/Litro}}$$

Con estos parámetros se puede realizar la programación en el software.

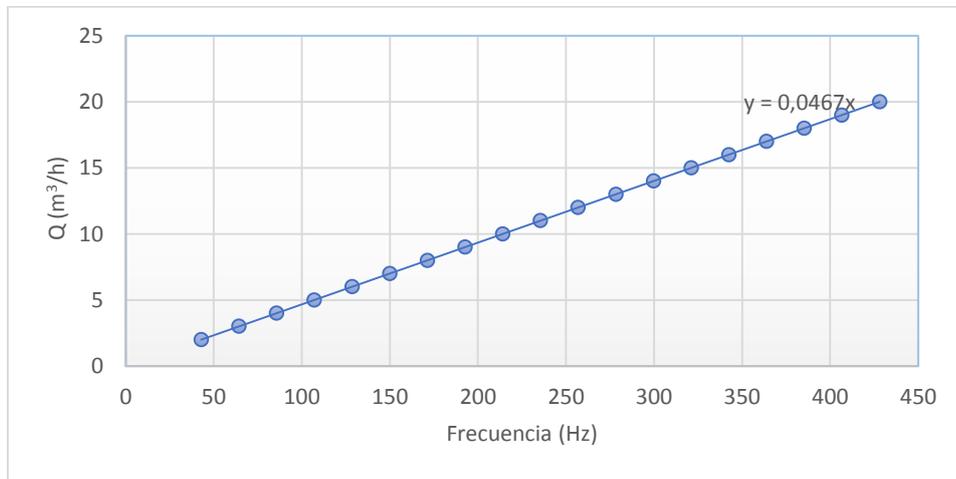


Figura 4.6: Escalamiento del PLC para 0 – 20 m3/h.

#### 4.2. Programación en el software *Logo Soft Comfort*

A continuación, se muestra el diagrama de programación del escalamiento para la lectura de los datos de los sensores.

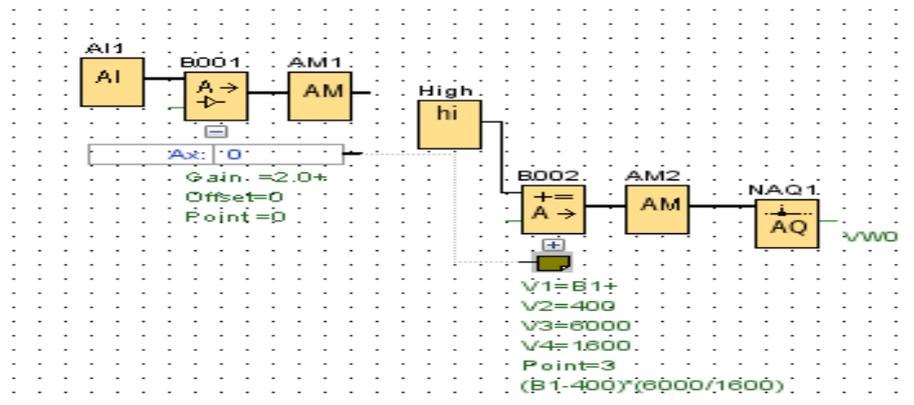


Figura 4.7: Diagrama sensor 0 a 6 Bar.

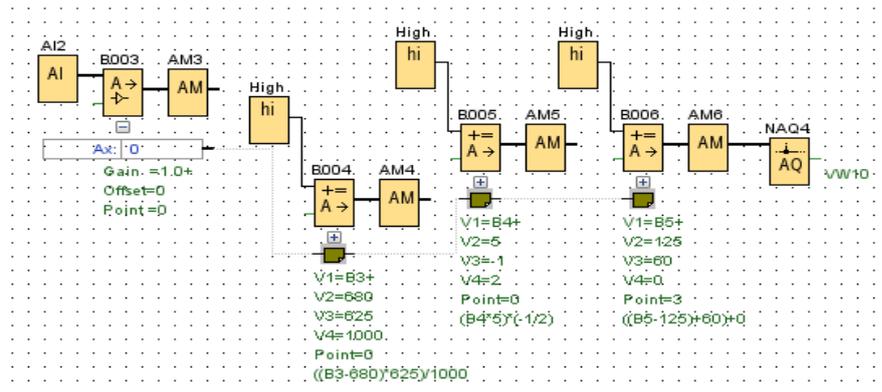


Figura 4.8: Diagrama sensor -1 a 0 Bar.

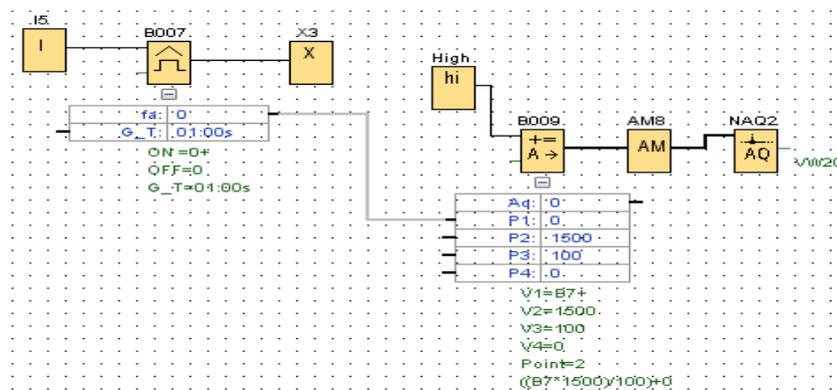


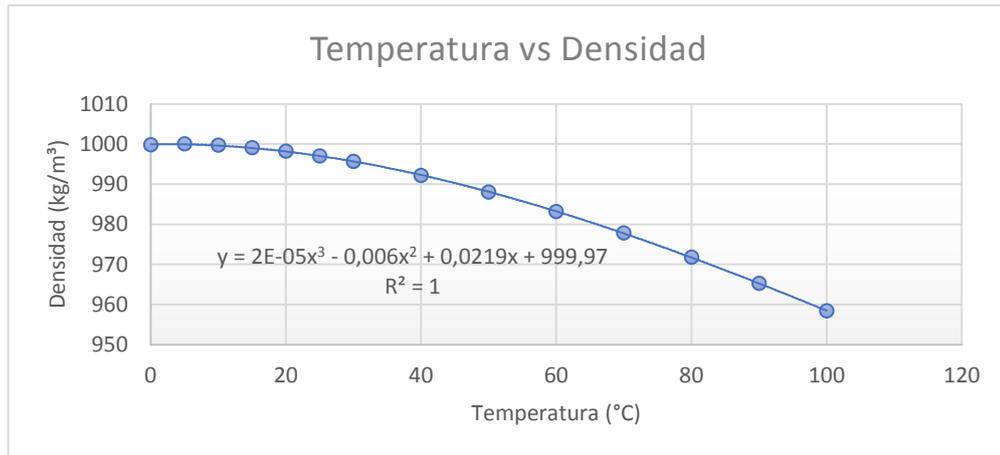
Figura 4.9: Diagrama sensor de flujo.

### 4.3. CORRELACIÓN DE LA DENSIDAD, VISCOSIDAD Y PRESIÓN DE VAPOR DEL AGUA CON RESPECTO A LA TEMPERATURA

El agua es el fluido utilizado para este experimento, mediante el software de cálculo se determinará la ecuación para obtener las propiedades del agua con respecto a la temperatura que se encuentre el fluido, estos datos se obtienen de la Tabla 3.3 con una ecuación polinómica se puede determinar la densidad, viscosidad dinámica y la presión de vapor del líquido, esta ecuación se debe apegar a un valor de R=1 por lo que con una ecuación cuadrática no es suficiente.

#### 4.3.1. Densidad del agua

La figura 4.10 representa la curva de la densidad con respecto a la temperatura con la obtención de la ecuación polinómica se puede determinar la densidad del agua a la temperatura que esta se encuentre.



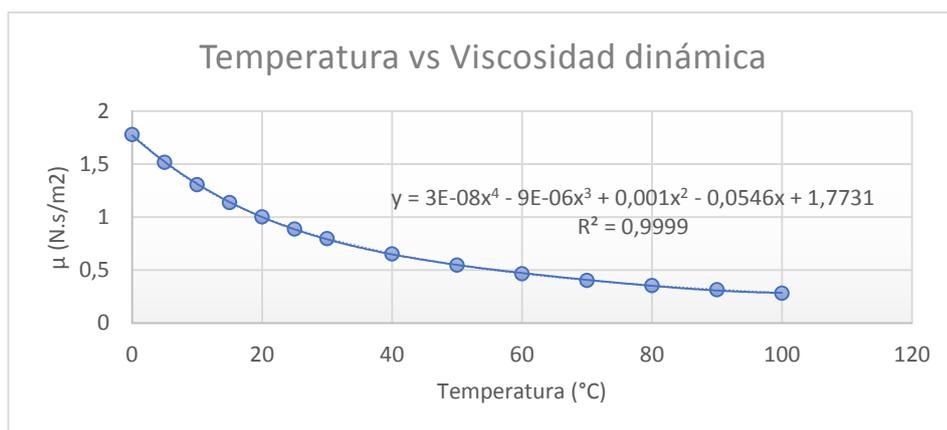
**Figura 4.10:** Correlación Temperatura vs Densidad.

Con la ecuación polinómica es posible obtener la densidad del agua de acuerdo a la temperatura que mida el termómetro ubicado en el tanque, y mediante la programación se puede visualizar el dato en la pantalla de visualización.

$$y = 2E-05x^3 - 0,006x^2 + 0,0219x + 999,97 \quad (4.2)$$

### 4.3.2. Viscosidad Dinámica

La figura 4.11 representa la curva de la viscosidad dinámica con respecto a la temperatura con la obtención de la ecuación polinómica se puede determinar la viscosidad dinámica del agua a la temperatura que esta se encuentre.



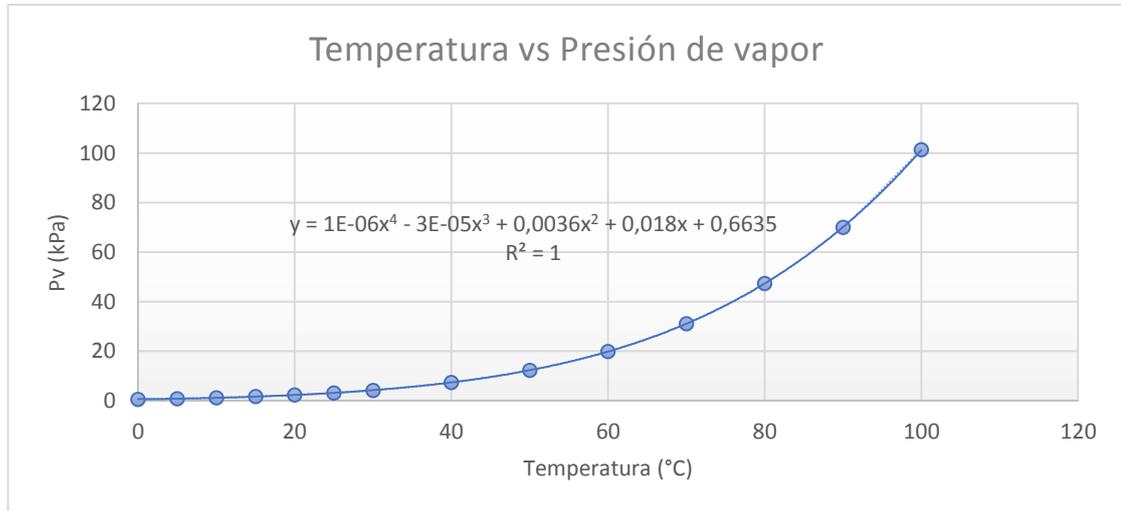
**Figura 4.11:** Correlación Temperatura vs Viscosidad Dinámica.

Con la ecuación polinómica es posible obtener la viscosidad dinámica del agua de acuerdo a la temperatura que mida el termómetro ubicado en el tanque, y mediante la programación se puede visualizar el dato en la pantalla de visualización.

$$y = 3E-08x^4 - 9E-06x^3 + 0,001x^2 - 0,0546x + 1,7731 \quad (4.3)$$

### 4.3.3. Presión de vapor del agua

La figura 4.12 representa la curva de la Presión de vapor del líquido con respecto a la temperatura con la obtención de la ecuación polinómica se puede determinar la Presión de vapor del agua a la temperatura que esta se encuentre.



**Figura 4.12:** Correlación Temperatura vs Presión de vapor.

Con la ecuación polinómica es posible obtener la presión de vapor del agua de acuerdo a la temperatura que mida el termómetro ubicado en el tanque, y mediante la programación se puede visualizar el dato en la pantalla de visualización.

$$y = 1E-06x^4 - 3E-05x^3 + 0,0036x^2 + 0,018x + 0,6635 \quad (4.4)$$

En cada gráfica se puede observar que  $R^2$  se aproxima a 1 esto es importante ya que en la programación los datos son acertados con respecto a la temperatura si se aproxima a 0,98 los datos de los parámetros se calcularán de manera errónea.

## 4.4. COMUNICACIÓN TCP/IP

Mediante el uso de los controladores de Comunicación ModBus es posible la adquisición y visualización de datos en la computadora para una interpretación visual de las gráficas. Con la debida programación y cálculos se obtiene las curvas características de las bombas  $Q$  ( $m^3/h$ ) vs  $H$  (m) y  $Q$  ( $m^3/h$ ) vs NPSH (m).

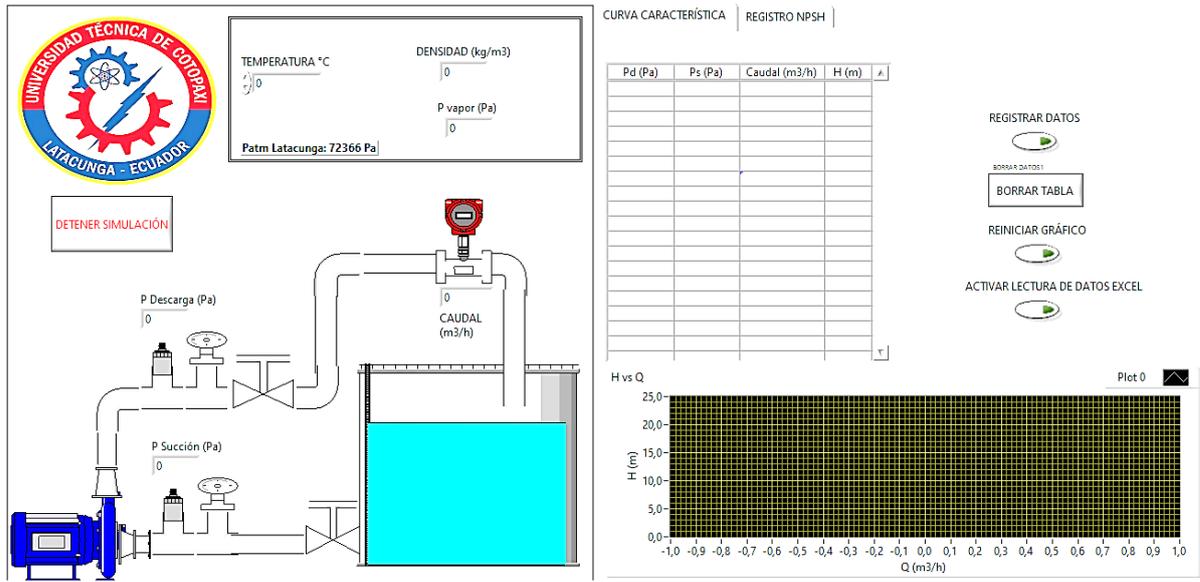


Figura 4.13: Panel para la visualización de datos.

#### 4.5. CONTROL DEL SISTEMA DE BOMBEO

Para el sistema de control de la bomba se instalará un sistema manual y con el variador de frecuencia se podrá variar el número de revoluciones.

El sistema consta de los siguientes componentes:

- Un disyuntor termomagnético, trifásico para el tipo de bomba que se va a utilizar.
- Un contactor para regular la interrupción de la corriente eléctrica.
- Un variador de frecuencia que regula la velocidad del motor de la bomba.
- Relé térmico para proteger la bomba sobre las sobrecargas prolongadas.
- Botones de comando para marcha, paro y emergencia.

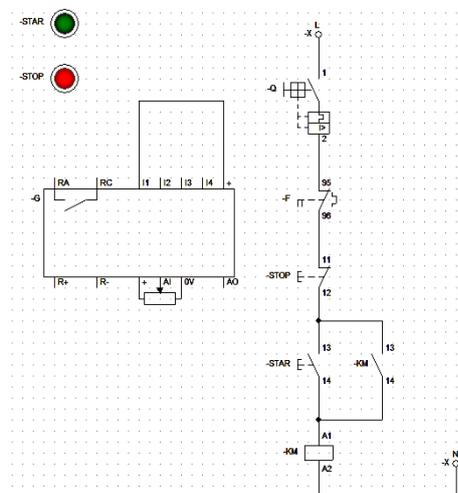


Figura 4.14: Circuito de control de la bomba.



**Figura 4.15:** Circuito de fuerza de la bomba.

#### 4.6. COMPROBACIÓN DE LAS MEDICIONES DE LOS SENSORES

Para la comprobación de medición de los sensores de presión se incorporó al sistema un manómetro y vacuómetro mecánicos, permitiendo obtener la veracidad en los datos adquiridos.

Medición del manómetro mecánico: 1, 5 bar

Medición del sensor de presión: 1, 4 bar

Medición del vacuómetro mecánico: -0,2 bar

Medición del sensor de presión de vacío: -0,185 bar

Mediante la ecuación 3.36. determinamos el error de medición entre el medidor mecánico y el sensor.

$$ERROR_{relativo} = \frac{1,5 - 1,4}{1,5} \cdot 100\% = 6,6667\%$$

$$ERROR_{relativo} = \frac{-0,2 - (-0,185)}{-0,2} \cdot 100\% = 7,5\%$$

Los cálculos nos indican que el error medición del sensor de presión es del 6,6667% y del sensor de vacío es 7,5% esto nos permite verificar que los sensores están midiendo correctamente por lo que se puede realizar la adquisición de datos para el respectivo análisis.

#### 4.7. RESULTADOS DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DE LA BOMBA A DISTINTAS FRECUENCIAS

Con la adquisición de los datos de los sensores es posible obtener los parámetros para el cálculo de la altura o carga de la bomba mediante la ecuación 3.7 determinamos la diferencia de presión en el sistema y con la ecuación 3.8 se obtiene H (m) que representa la altura de bombeo (eje y) con respecto al caudal (eje x) para la gráfica de la curva característica de la bomba a diferente frecuencia.

##### 60 Hz

La tabla 4.1 indica la adquisición de datos tomada en 60 Hz en donde el caudal máximo que registra es de 15,45 m<sup>3</sup>/h y la altura máxima es de 14,65 m.

**Tabla 4.1:** Adquisición de datos en 60 Hz.

Q (m <sup>3</sup> /h)	Pd (Pa)	Ps (Pa)	H(m)
0	143500	0	14,654308
3,9	122500	0	12,509775
5,25	115800	0	11,825567
5,55	114300	0	11,672386
7,05	105300	0	10,753301
8,4	96300	300	9,864852
11,1	81300	3300	8,639404
12,45	75300	4000	8,098165
13,5	68500	5000	7,505865
14,25	62500	8000	7,199503
14,4	56500	8300	6,617416
15	52800	10300	6,443811
15,15	52000	11000	6,433599
15,3	50500	11800	6,362114
15,45	49800	12300	6,34169

##### 50 Hz

La tabla 4.2 indica la adquisición de datos tomada en 50 Hz en donde el caudal máximo que registra es de 13,8 m<sup>3</sup>/h y una altura máxima de 11,52 m.

**Tabla 4.2:** Adquisición de datos en 50 Hz.

<b>Q (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Pd (Pa)</b>	<b>Ps (Pa)</b>	<b>H(m)</b>
0	112800	0	11,519206
1,2	98500	0	10,058881
4,8	82000	0	8,373891
9,3	63300	800	6,545932
11,55	55000	2500	5,871935
12,75	49800	3500	5,443029
12,9	43800	6000	5,085607
13,2	45300	5300	5,167303
13,5	45300	6800	5,320484
13,65	43000	5800	4,983486
13,8	39300	7500	4,779245

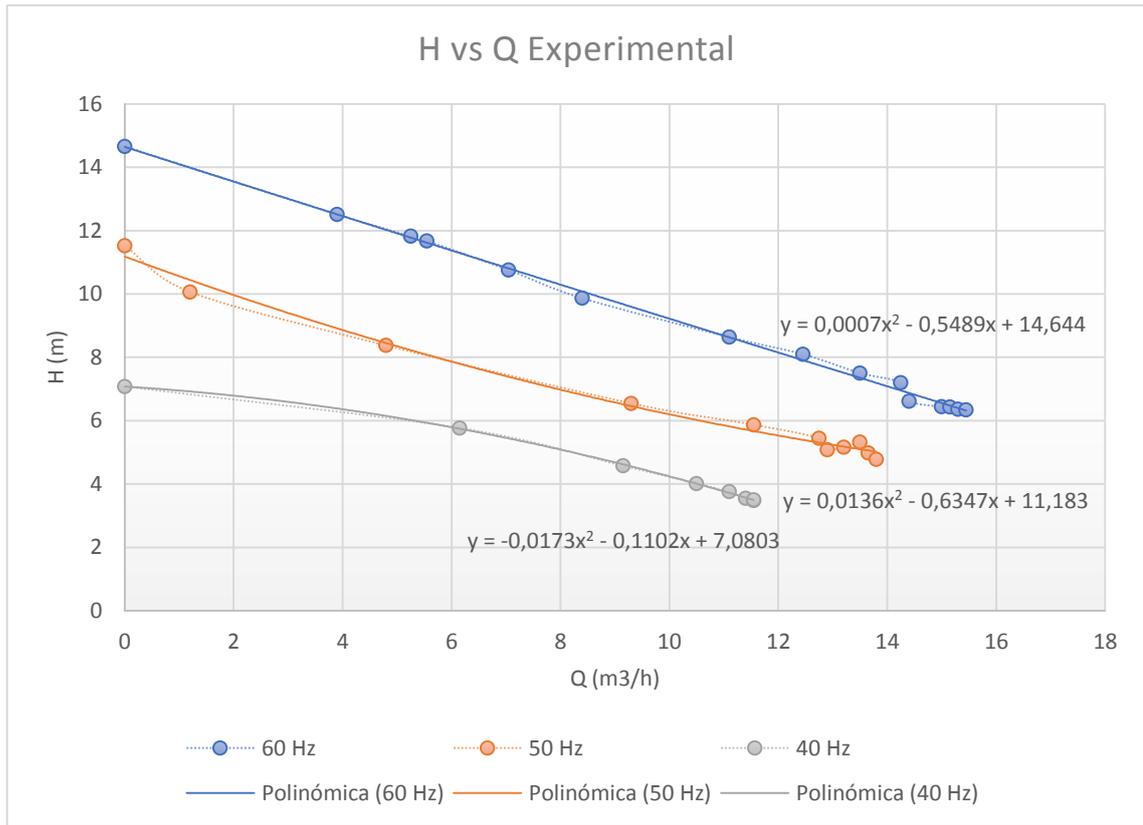
#### **40 Hz**

La tabla 4.3 indica la adquisición de datos tomada en 40 Hz en donde el caudal máximo que registra es de 11,55 m<sup>3</sup>/h y una altura máxima de 7 m.

**Tabla 4.3:** Adquisición de datos en 40 Hz.

<b>Q (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>Pd (Pa)</b>	<b>Ps (Pa)</b>	<b>H(m)</b>
0	69300	0	7,076959
6,15	56500	0	5,769815
9,15	44500	300	4,575004
10,5	37800	1500	4,01334
11,1	34800	2000	3,758039
11,4	31800	3000	3,553797
11,55	31800	2300	3,482313
11,55	31000	3300	3,502737

Con los datos obtenidos es posible graficar las curvas características experimentales en la hoja de cálculo, para el análisis del comportamiento de cada una, también obtenemos la ecuación para cada curva, mediante las ecuaciones se puede realizar la comparación teórica con la experimental.



**Figura 4.16:** Curva Característica experimental a distinta frecuencia.

Las gráficas de las curvas características muestran la diferencia de altura y caudal que se presenta para cada valor de la frecuencia ajustada en el variador.

La figura 4.16 muestra las gráficas agrupadas de las curvas características de la bomba a diferente frecuencia y la tabla 4.4. muestra las ecuaciones para el cálculo teórico.

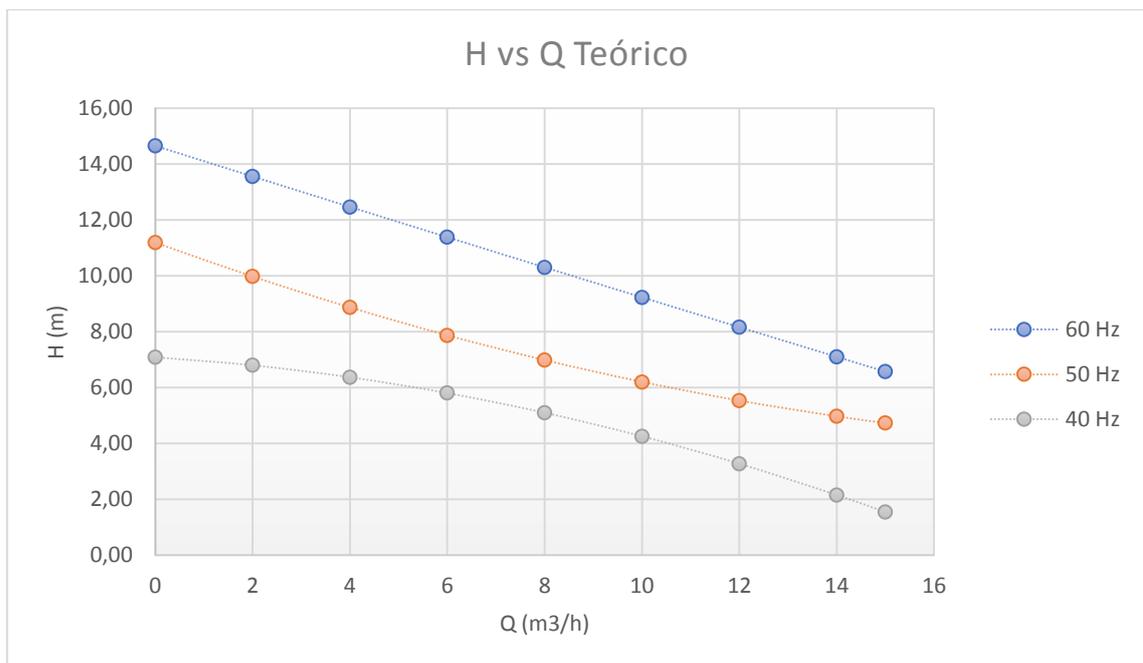
**Tabla 4.4:** Ecuaciones para determinar H (y) a cualquier Q (x).

Frecuencia	Ecuación
60 Hz	$y = -0,0138x^2 - 0,2918x + 11,952$
50 Hz	$y = -0,0127x^2 - 0,2345x + 9,7646$
40 Hz	$y = -0,0094x^2 - 0,2299x + 6,866$

Mediante las ecuaciones obtenidas se puede determinar el valor de la altura H (m) a cualquier valor de caudal Q (m³/h) por lo que la tabla 4.5 muestra los valores teóricos obtenidos en puntos específicos del caudal.

**Tabla 4.5:** Cálculos teóricos a diferentes frecuencias.

	<b>60 Hz</b>	<b>50 Hz</b>	<b>40 Hz</b>
<b>Q (m<sup>3</sup>/h)</b>	<b>H (m)</b>	<b>H (m)</b>	<b>H (m)</b>
0	14,64	11,18	7,08
2	13,55	9,97	6,79
4	12,46	8,86	6,36
6	11,38	7,86	5,80
8	10,30	6,98	5,09
10	9,23	6,20	4,25
12	8,16	5,53	3,27
14	7,10	4,96	2,15
15	6,57	4,72	1,53



**Figura 4.17:** Curva característica teórica a distinta frecuencia.

#### **4.8. APLICACIÓN DE LAS ECUACIONES DE SEMEJANZA CON LA VARIACIÓN DE FRECUENCIA**

Con las ecuaciones 4.27 y 4.28 de las leyes de semejanza es posible analizar H (m) y Q (m<sup>3</sup>/h) a distintas revoluciones para verificar la confiabilidad de los datos obtenidos teórica y

experimentalmente. Con el tacómetro medimos el número de revoluciones para las frecuencias de 60, 50 y 40 Hz, y realizamos los respectivos cálculos.

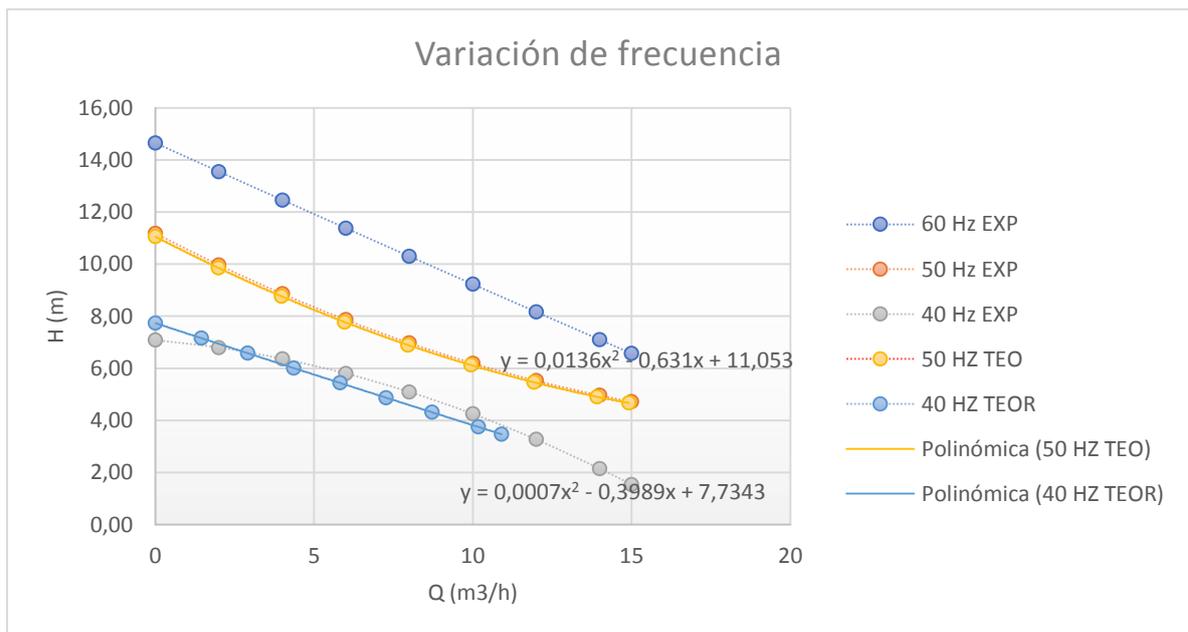
Número de revoluciones en 60 Hz: 3475 rev/min.

Número de revoluciones en 50 Hz: 3390 rev/min.

Número de revoluciones en 40 Hz: 2600 rev/min.

**Tabla 4.6:** Cálculos con las ecuaciones de semejanza.

	60 Hz	50 Hz	40 Hz	50 Hz		40 Hz		50 Hz	40 Hz	ERROR	
Q (m <sup>3</sup> /h)	H (m)	H (m)	H (m)	Q (m <sup>3</sup> /h)	H (m)	Q (m <sup>3</sup> /h)	H (m)	H ECUACIÓN		50 Hz	40 Hz
0	14,64	11,18	7,08	0,00	11,05	0,00	7,73	11,05	7,73	-1,18	8,46
2	13,55	9,97	6,79	1,99	9,85	1,45	7,16	9,85	6,94	-1,25	2,14
4	12,46	8,86	6,36	3,98	8,76	2,91	6,58	8,75	6,15	-1,32	-3,46
6	11,38	7,86	5,80	5,97	7,77	4,36	6,01	7,76	5,37	-1,39	-8,02
8	10,30	6,98	5,09	7,95	6,89	5,81	5,44	6,88	4,59	-1,46	-10,98
10	9,23	6,20	4,25	9,94	6,12	7,27	4,87	6,10	3,82	-1,52	-11,35
12	8,16	5,53	3,27	11,93	5,46	8,72	4,31	5,44	3,05	-1,57	-7,16
14	7,10	4,96	2,15	13,92	4,91	10,17	3,75	4,88	2,29	-1,60	6,13
15	6,57	4,72	1,53	14,91	4,67	10,90	3,47	4,65	1,91	-1,60	19,57



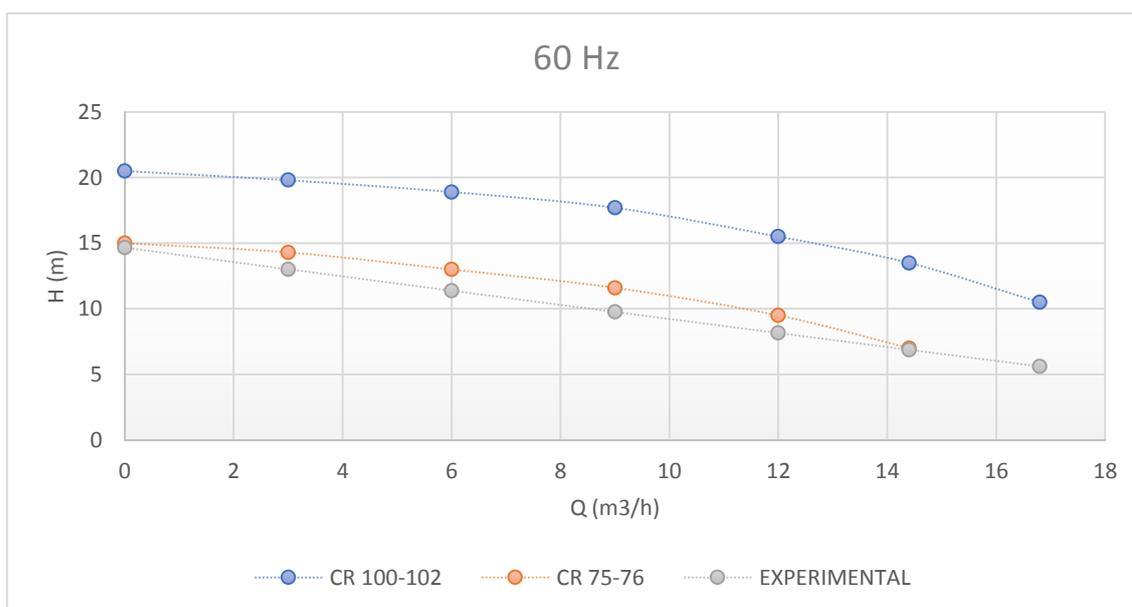
**Figura 4.18:** Curvas características con las ecuaciones de semejanza.

#### 4.9. COMPARACIÓN DE LAS CURVAS CARACTERÍSTICAS EXPERIMENTALES Y TEÓRICAS

Con los datos característicos del catálogo se obtiene las curvas características de la bomba utilizada, se realizará la comparación de los datos teóricos del catálogo con los datos teóricos calculados con las fórmulas del experimento. En este caso se comprobará con la curva a frecuencia de 60 Hz y se aplicará la ecuación 4.34. para la obtención del porcentaje de error relativo.

**Tabla 4.7:** Error relativo entre los datos del catálogo y los datos experimentales.

	CR 100-102	CR 75-76		CR 100-102	CR 75-76
Q (m3/h)	H1 (m)	H2 (m)	Hexp (m)	Error relativo %	Error relativo %
0	20,5	15	14,64	29%	2%
3	19,8	14,3	13,00	34%	9%
6	18,9	13	11,38	40%	12%
9	17,7	11,6	9,76	45%	16%
12	15,5	9,5	8,16	47%	14%
14,4	13,5	7	6,88	49%	2%
16,8	10,5		5,62	46%	



**Figura 4.19:** Curvas características del catálogo con la curva teórica experimental.

En la figura 4.19 de comparación de las curvas características podemos observar la gran variación que tiene la curva experimental realizada respecto a la curva que proporciona el fabricante. En este caso la bomba utilizada en nuestro sistema de bombeo es la CR 100, y como se puede visualizar la curva del catálogo no se compara con la curva experimental, en dado caso se podría comparar con la curva de la bomba CR 75-76, por lo que deducimos que, aunque la placa del motor de la bomba nos indique unos datos técnicos específicos, el impulsor instalado no es el apropiado para que cumpla con los requerimientos que indica la curva característica de la bomba CR 100.

#### 4.10. ANÁLISIS DE NPSH DISPONIBLE EN EL SISTEMA

El banco experimental está diseñado para analizar la curva del NPSH del sistema esta experimentación permite forzar el fenómeno de cavitación a través de la válvula reguladora en la succión en otras palabras se varía la resistencia de la tubería en la succión o se varía el  $NPSH_{DISPONIBLE}$ , y con la válvula de descarga se regula el caudal del sistema para la obtención de la curva  $NPSH_{DISPONIBLE}$  (m) vs  $Q(m^3/h)$ .

Existe dos maneras de realizar este ensayo de forma ascendente o descendente, ascendente es donde se realiza la prueba con el caudal mínimo al máximo y descendente se empieza con el caudal al máximo reduciéndolo hasta el mínimo. Las dos formas son confiables la única desventaja es que en la forma descendente se debe ordenar los datos para la obtención de las curvas.

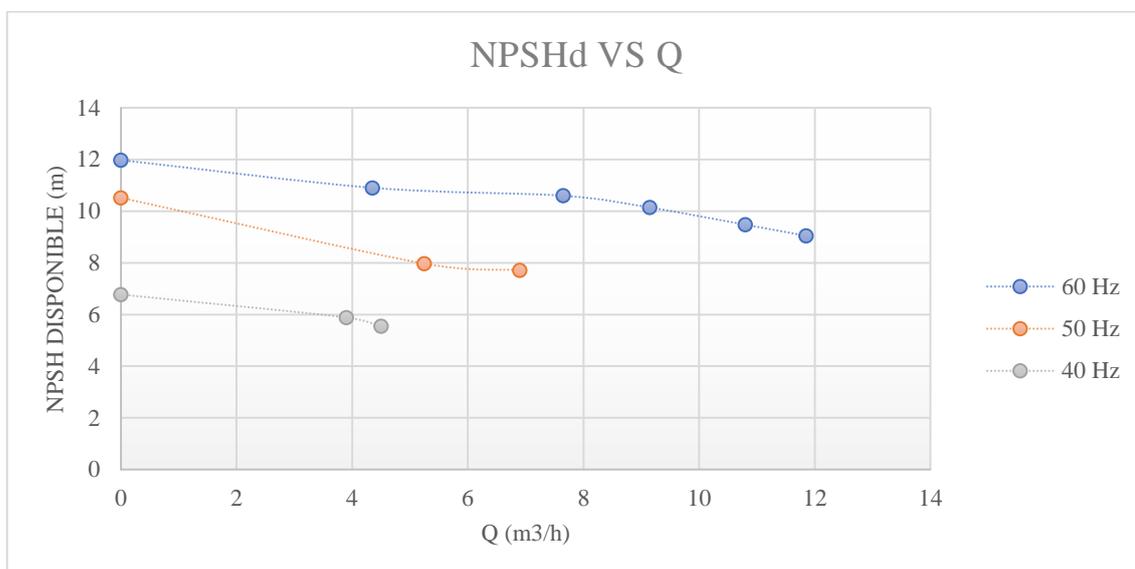
Para una cierta altura de aspiración se maniobra gradualmente la válvula hasta que aparezca la cavitación; en ese momento se miden el caudal y la presión de succión y se obtiene el NPSH correspondiente.

El experimento se ejecutó a distintas frecuencias donde se obtiene los siguientes datos:

**Tabla 4.8:** Datos del NPSH con variación de frecuencia.

60 Hz		50 Hz		40 Hz	
Q (m3/h)	H (m)	Q (m3/h)	H (m)	Q (m3/h)	H (m)
0	11,978748	0	10,518423	0	6,770597
4,35	10,906482	5,25	7,965408	3,9	5,882147
7,65	10,60012	6,9	7,710107	4,5	5,545149
9,15	10,140577	9	7,362896	6,75	4,983486
10,8	9,476793			7,35	5,034546

11,85	9,047887				
-------	----------	--	--	--	--



**Figura 4.20:** Curvas NPSH<sub>D</sub> vs Q en diferentes frecuencias.

#### 4.11. Presupuesto

En esta tabla se detalla cada uno de los materiales utilizados y costos directos de diseño y construcción del módulo. Los cuales en estos costos directos son necesarios para el implemento de los suministros que ingresan al sistema. Cabe recalcar que los factores constituyen costos aplicables en el mercado actual. Además, existen costos indirectos como insumos, tiempo y mano de obra.

**Tabla 4.9:** Costos directos.

Presupuesto de materiales			
Cantidad	Módulo	Precio unitario	Precio total
3	Sensores	\$ 230,00	\$690,00
1	Monitor, pantalla	\$ 130,00	\$130,00
2	Reductor HG 2x1"	\$ 2,50	\$5,00
1	Bushin plastigama 1"x1/2	\$ 1,50	\$1,50
1	Bushin plastigama 1/2x1/4	\$ 1,00	\$1,00
1	Válvula de compuerta	\$ 13,00	\$13,00

1	Tapón macho	\$ 0,60	\$0,60
1	Válvula esférica	\$ 1,65	\$1,65
1	Manguera transparente	\$ 1,50	\$1,50
5	Teflones	\$ 1,50	\$7,50
4	Abrazaderas	\$ 0,70	\$2,80
4	Permatéx	\$ 1,50	\$6,00
2	Te de 1"	\$ 2,50	\$5,00
4	Adaptadores	\$ 1,00	\$4,00
2	Bushin de 1" a ½	\$ 1,50	\$3,00
2	Uniones de 2"	\$ 2,60	\$5,20
2	Bhg 2"x1"	\$ 1,30	\$2,60
1	Bhg 1"x1/2	\$ 1,35	\$1,35
1	Cable gemelo #14	\$ 1,60	\$1,60
1	Pintura esmalte gris	\$ 4,50	\$4,50
1	Thiner laca	\$ 2,00	\$2,00
8	Perno 1/4 x 1	\$ 0,75	\$6,00
8	Rodelas ¼	\$ 0,75	\$6,00
1	Conector de 1" de tanque	\$ 4,60	\$4,60
1	Broca de hierro 5/32"	\$ 0,50	\$0,50
1	Lija	\$ 0,35	\$0,35
1	Brocha	\$ 2,50	\$2,50
1	Enchufe	\$ 0,50	\$0,50
10	Terminales	\$ 0,15	\$1,50
1	Logo siemens	\$ 200,00	\$200,00
1	Varios	\$ 100,00	\$100,00
<b>Total</b>			\$1.211,75

El valor total de materiales adquiridos es de \$1.211,75 dólares americanos.

La mano de obra se toma en cuenta el salario básico del país que es \$425 dólares americanos, se hace el siguiente cálculo:

#horas = 5 horas

# horas mensuales = 5 horas diarias x 20 días

# horas mensuales = 100

Costo por hora =  $\frac{425}{100} = \$4,25$  la hora

**Tabla 4.10:** Costos indirectos.

<b>Presupuesto de materiales</b>			
<b>Horas de trabajo</b>	<b>Actividad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Precio total</b>
30	Programación del software	\$ 2,50	\$ 75,00
20	Reconstrucción de la estructura	\$ 2,50	\$ 50,00
30	Programación en logo	\$ 2,50	\$ 75,00
60	Pruebas de funcionamiento	\$ 2,50	\$ 150,00
<b>Total</b>			<b>\$ 350,00</b>

Esto es un valor de \$350 dólares americanos el valor de la mano de obra realizada en este proyecto tecnológica.

**Tabla 4.11:** Costos totales.

<b>Costos Totales</b>	
<b>Tipo de costos</b>	<b>Costos Totales</b>
Costos Directos	\$1.211,75
Mano de Obra	\$350
<b>Total</b>	<b>\$1.561,75</b>

## **5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1. CONCLUSIONES**

- Con el proyecto de investigación implementado en el laboratorio de CIYA se logró el análisis del comportamiento de las curvas características de la bomba centrífuga CRT 100/00 de manera experimental.
- El módulo permite analizar las curvas características de la bomba centrífuga a diferentes revoluciones del motor de la bomba mediante el variador de frecuencia, de ello se obtiene las curvas de Altura de bombeo – Caudal (H vs Q) y Altura Neta Positiva de Succión – Caudal (NPSH vs Q), sin embargo, puede ser reacondicionada para la realización de más prácticas como el análisis del rendimiento mediante la utilización de los medidores de voltaje y corriente localizadas en el tablero.
- Las curvas experimentales permiten comprobar que la curva característica del fabricante no coincide con la obtenida experimentalmente, por lo que, se concluye que la curva del catálogo es errónea con respecto a la placa técnica de la bomba ya que en la placa indica que el modelo es el CRT 100 y la curva experimental se asemeja más a la curva del modelo CRT 75, esto probablemente se deba a que el impulsor de la bomba no es del modelo CRT 100 sino del CRT 75.
- Con el banco experimental se pudo realizar las pruebas experimentales de la cavitación mediante el análisis de la curva del NPSH disponible del sistema, para este experimento se realizó con las propiedades del agua a 20°C sin embargo se puede realizar a distintas temperaturas para analizar el comportamiento de la curva, mediante la variación de frecuencia se puede obtener los puntos a diferentes velocidades obteniendo así el NPSH requerido ya que con la variación del caudal se obtiene estos datos.

### **5.2. RECOMENDACIONES**

- Debido a los experimentos de cavitación las tuberías sufren un desgaste significativo por lo que es recomendable la verificación de las tuberías, especialmente en la tubería transparente donde se visualizan las burbujas del fenómeno de cavitación.
- Para la realización de las prácticas se debe conocer el funcionamiento de la interfaz del software, ya que puede registrar datos erróneos.
- Debido a los equipos no actualizados para el uso del software es necesario tener paciencia en la adquisición de datos.

- Se debe realizar periódicamente cambios del fluido a utilizar, en este caso el agua, debido al almacenamiento a la intemperie puede almacenarse residuos dañando la bomba y los sensores.

## 6. REFERENCIAS

- [1] E. Ramírez, «ESTUDIO DE BOMBAS CENTRÍFUGAS Y SU FACTIBILIDAD DE APLICACIÓN EN LA FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA CON LA FINALIDAD DE OBTENER PARÁMETROS TÉCNICOS CON VARIACIÓN DE CAUDAL,» 2012.
- [2] G. R. C. S. H. Z. Jorge Luis Reyes De la Cruz, «Dialnet,» Octubre 2010. [En línea]. Available: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3700293>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [3] C. Moncayo, «Bomba hidráulica,» Marzo 2014. [En línea]. Available: <https://avdiaz.files.wordpress.com/2008/10/tipos-de-bombas.pdf>. [Último acceso: 07 2022].
- [4] W. House, «Hydraulic Pumps,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.whitehouseproductsltd.com/products/hydraulic-pumps>. [Último acceso: 2022].
- [5] Y. Cengel y J. Cimbala, «Bombas centrífugas- Mecánica de fluidos,» 2019.
- [6] M. d. F. d. Y. Cengel, propiedades de los fluidos.
- [7] M. d. f. d. Y. Cengel, Mecánica de fluidos.
- [8] G. d. España, «sistema de impulsión,» *En funcion de la trayectoria del fluido*, 2019.
- [9] M. d. F. d. S. V., Mecánica de Fluidos.
- [10] D. F. DOMÍNGUEZ VALENCIA, DISEÑO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE SUCCIÓN Y FILTRACIÓN PARA PURIFICAR EL AGUA EN LA COMUNIDAD DE TUSHI EN LA PROVINCIA DE CHIMBORAZO, UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, INGENIERÍA MECÁNICA, 2020.
- [11] S. SIERRA PÉREZ, «MODELACIÓN GEOMÉTRICA DEL IMPULSOR DE UNA BOMBA CENTRIFUGA,» UNIVERSIDAD EAFIT, Medellín, 2010.
- [12] H. Rodríguez Galbarro, Cálculo de Instalaciones de Bombeo de Agua, España: Ingemecánica.

- [13] S. Pérez Remesal y C. Renedo Estébanez, «Mecánica de Fluidos y Máquinas Hidráulicas- Bombas,» Universidad de Cantabria.
- [14] «Predictiva 21,» [En línea]. Available: <https://predictiva21.com/3-3-potencia-eficiencia-bombas-centrifugas/#:~:text=c.%2D%20Las%20p%C3%A9rdidas%20mec%C3%A1nicas,cojinetes%2C%20sellos%20mec%C3%A1nicos%2C%20etc..> [Último acceso: 11 Agosto 2022].
- [15] S. Pumps, *Catálogo das bombas modelo CAP.*
- [16] P. Víctor, «Propiedades de líquidos,» 2014. [En línea]. Available: <https://www.ugr.es/~pittau/FISBIO/t4.pdf>. [Último acceso: 2022].
- [17] R. Cabrera, «Densidad y peso específico,» Buenos Aires, 2019.
- [18] G. Adriana, «Volumen específico,» Lifeder, 2021.
- [19] J. D. Jaramillo Díaz y H. A. Cárdenas Bañol, «Número de reynolds,» CORPORACIÓN UNIVERSITARIA MINUTO DE DIO, 2015.
- [20] C. A. Jiménez Carballo, «MECÁNICA DE FLUIDOS: VISCOSIDAD Y TURBULENCIA,» Instituto Tecnológico de Costa Rica, Costa Rica, 2016.
- [21] S. Jiménez, «Hidráulica fácil,» marzo 2021. [En línea]. Available: <https://www.hidraulicafacil.com/2021/03/perdida-de-carga-por-friccion-en.html>. [Último acceso: 8 2022].
- [22] D. Caballero, «Medición de presión para cada industria,» Mediciones, servicios asociados , Bogotá, 2019.
- [23] D. Marón, «Instrumentación industrial,» 01 Diciembre 2020. [En línea]. Available: [http://www.sapiensman.com/tecnoficio/electricidad/instrumentacion\\_industrial12.php#google\\_vignette](http://www.sapiensman.com/tecnoficio/electricidad/instrumentacion_industrial12.php#google_vignette). [Último acceso: 08 2022].
- [24] P. Robinson, «Fundamentos de Medidas de Presión,» Engineer Ambitiously, Ecuador , 2022.
- [25] R. Galvan, «Medidores de presión electromecánicos,» Instrumentación: Equipos y principios, 2013.
- [26] S. A. Castaño Giraldo, «Medidores de flujo,» 23 Enero 2020. [En línea]. Available: <https://www.badgermeter.com/es-us/blog-informacion-privilegiada/medidores-de-flujo-que-son-y-como-funcionan/>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [27] D. Nuevo, «Medidores de caudal,» TECPA, 2016.
- [28] S. A. Castaño Giraldo, «Medidores de flujo,» 2017. [En línea]. Available: <https://controlautomaticoeducacion.com/instrumentacion/medidores-de-flujo/>. [Último acceso: 7 8 2022].

- [29] J. Velasquez, «SIEMENS PLC LOGO,» AREATECNOLOGIA, 2020.
- [30] Jazmine, «Válvulasonline.com,» Junio 2021. [En línea]. Available: <https://valvulasonline.com/2021/06/valvula-de-bola/>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [31] L. M. Alberto, «Monografias.com S.A.,» [En línea]. Available: <https://www.monografias.com/trabajos/valvestrangul/valvestrangul>. [Último acceso: Julio 2022].
- [32] A. Devita, «Linkedin,» 13 Septiembre 2021. [En línea]. Available: <https://es.linkedin.com/pulse/el-uso-de-variadores-velocidad-en-bombas-centrifugas-agustin-devita>. [Último acceso: Agosto 2022].
- [33] «Cavitación de una bomba centrífuga,» *The Gorman-Rump Company*, vol. 1, p. 1.
- [34] N. Connor, «Thermal Engineering,» 29 Septiembre 2019. [En línea]. Available: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-cavitacion-en-las-bombas-centrifugas-definicion/>. [Último acceso: Julio 2022].
- [35] D. San Juan, «Formación de burbujas de vapor en un impulsor,» 17 Diciembre 2018. [En línea]. Available: <https://0grados.com/cavitacion-de-bomba-centrifuga/a0cg0004968/>. [Último acceso: Agosto 2020].
- [36] «ThermalEngineering.org,» Mayo 2018. [En línea]. Available: <https://thermal-engineering.org/wp-content/uploads/2019/05/Net-Positive-Suction-Head-chart.png>. [Último acceso: Agosto 2022].

# **ANEXOS**

ANEXO 1  
Informe de antiplagio

## Document Information

Analyzed document	Tesis Lema.B - Masaquisa. C.docx (D143456543)
Submitted	2022-09-01 00:00:00
Submitted by	Cristian Gallardo
Submitter email	cristian.gallardo@utc.edu.ec
Similarity	3%
Analysis address	cristian.gallardo.utc@analysis.orkund.com

## Sources included in the report

<b>SA</b>	<b>submission.pdf</b> Document submission.pdf (D54424094)	 1
<b>SA</b>	<b>1529114275_102__Practica-2.1-Jesus-Torres.pdf</b> Document 1529114275_102__Practica-2.1-Jesus-Torres.pdf (D40427450)	 2
<b>SA</b>	<b>ANA GEOCONDA GUATO PILLAPA ojo.pdf</b> Document ANA GEOCONDA GUATO PILLAPA ojo.pdf (D17799505)	 6
<b>SA</b>	<b>1529168262_438__Laboratorio_de_Mecánica_de_Fluidos_II_JOSE_CANSING.pdf</b> Document 1529168262_438__Laboratorio_de_Mecánica_de_Fluidos_II_JOSE_CANSING.pdf (D40428209)	 1
<b>SA</b>	<b>INGENIERÍA CONCEPTUAL, BÁSICA Y DE DETALLE DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA BOMBAS CENTRIFUGAS BAJO LA NORMA BS EN ISO 99062012 PARA EL LABORATORIO DE FLUIDOS.pdf</b> Document INGENIERÍA CONCEPTUAL, BÁSICA Y DE DETALLE DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA BOMBAS CENTRIFUGAS BAJO LA NORMA BS EN ISO 99062012 PARA EL LABORATORIO DE FLUIDOS.pdf (D21215504)	 1
<b>SA</b>	<b>PROYECTO_TITULACION_2.docx</b> Document PROYECTO_TITULACION_2.docx (D22665177)	 1

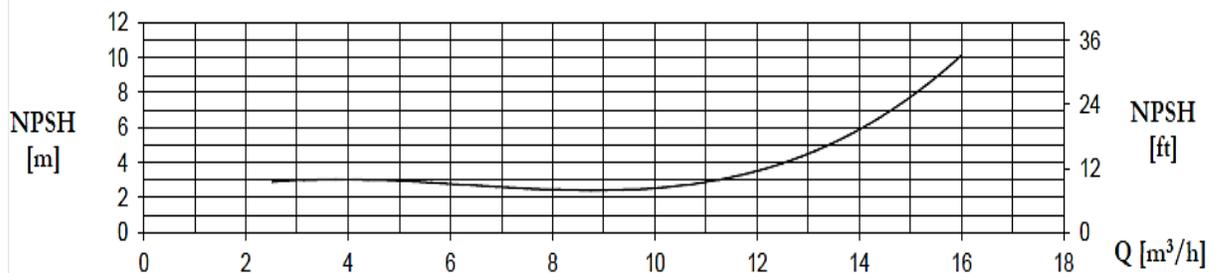
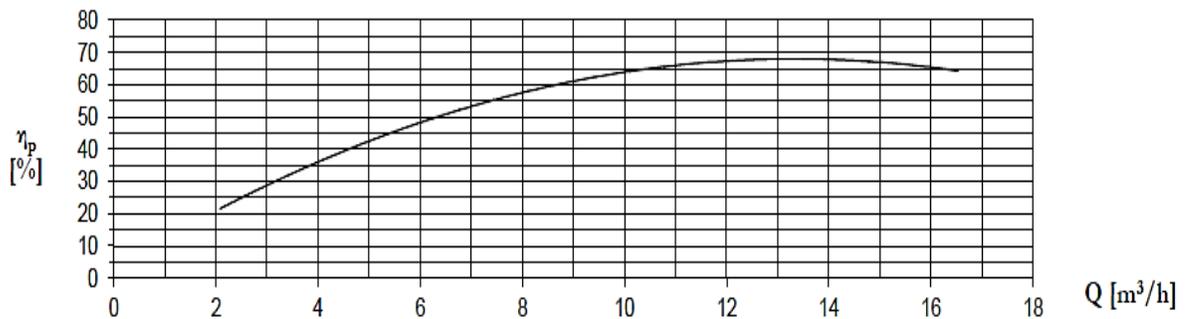
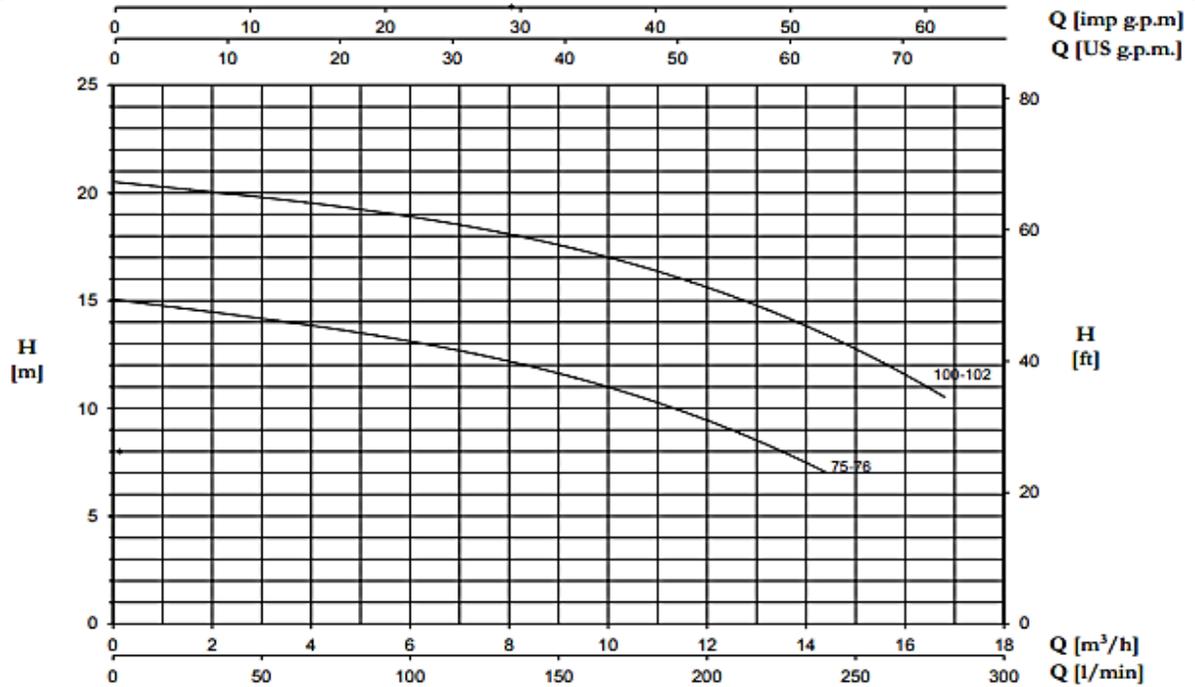
## ANEXO 2

### Informe de ficha técnica

#### CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE / CONSTRUCTION FEATURES CARACTERÍSTICAS CONSTRUCTIVAS / CARACTÉRISTIQUES D'EXÉCUTION

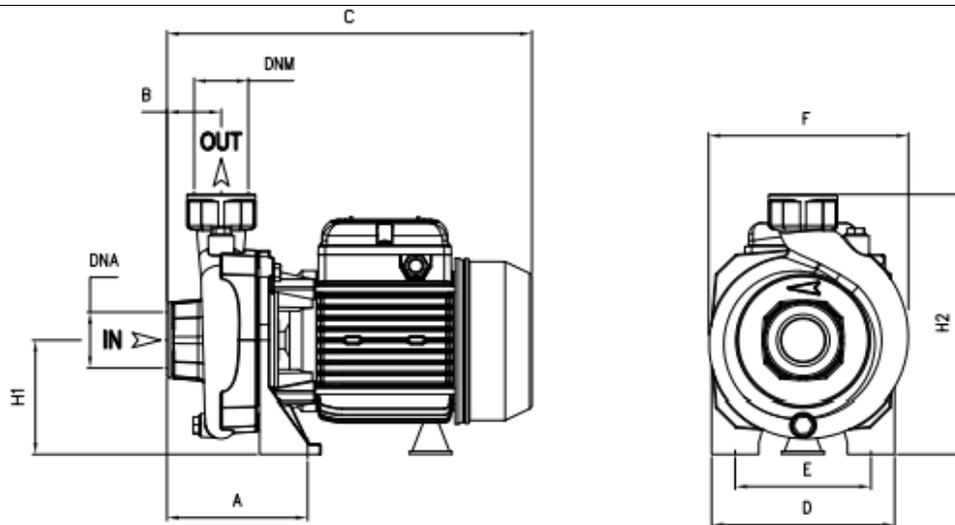
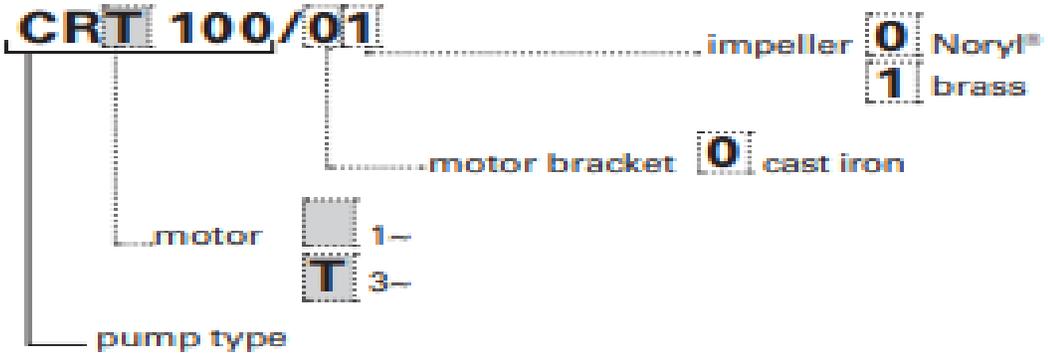
<b>Corpo pompa</b>	ghisa
<b>Pump body</b>	cast iron
<b>Cuerpo bomba</b>	fundición
<b>Corps de pompe</b>	fonte
<b>Supporto motore</b>	ghisa
<b>Motor bracket</b>	cast iron
<b>Soporte motor</b>	fundición
<b>Support moteur</b>	fonte
<b>Girante</b>	Noryl® o ottone
<b>Impeller</b>	Noryl® or brass
<b>Rodete</b>	Noryl® o latón
<b>Turbine</b>	Noryl® ou laiton
<b>Tenuta meccanica</b>	ceramica-grafite
<b>Mechanical seal</b>	ceramic-graphite
<b>Sello mecánico</b>	cerámica-grafito
<b>Garniture mécanique</b>	céramique-graphite
<b>Albero motore</b>	acciaio AISI 416
<b>Motor shaft</b>	stainless steel AISI 416
<b>Eje motor</b>	acero AISI 416
<b>Arbre moteur</b>	acier AISI 416
<b>Temperatura del liquido</b>	girante Noryl®: 0 - 50 °C girante ottone: 0 - 90 °C
<b>Liquid temperature</b>	Noryl® impeller: 0 - 50 °C brass impeller: 0 - 90 °C
<b>Temperatura del liquido</b>	rodete de Noryl®: 0 - 50 °C rodete latón: 0 - 90 °C
<b>Température du liquide</b>	turbine en Noryl®: 0 - 50 °C turbine laiton: 0 - 90 °C
<b>Pressione di esercizio</b>	
<b>Operating pressure</b>	max 6 bar
<b>Presión de trabajo</b>	
<b>Pression de fonctionnement</b>	
<b>MOTORE / MOTOR / MOTOR / MOTEUR</b>	
<b>Motore 2 poli a induzione</b>	3~ 220/380V - 60Hz
<b>2 pole induction motor</b>	1~ 220V - 60Hz (con termoprotettore)
<b>Motor de 2 polos a inducción</b>	(with thermal protection)
<b>Moteur à induction à 2 pôles</b>	(con protección térmica)
	(avec protection thermique)
<b>Classe di isolamento</b>	
<b>Insulation class</b>	F
<b>Clase de aislamiento</b>	
<b>Classe d'isolation</b>	
<b>Grado di protezione</b>	
<b>Protection degree</b>	IP44
<b>Grado de protección</b>	
<b>Protection</b>	

TYPE		P2		P1 (kW)		AMPERE		Q (m³/h - l/min)						
1~	3~	(HP)	(kW)	1~	3~	1~	3~	0	3	6	9	12	14,4	16,8
						1x230V 50 Hz	3x400V 50 Hz	0	50	100	150	200	240	280
						H (m)								
CR 75	CRT 75	0,8	0,59	0,73	0,83	3,4	1,5	15,0	14,3	13,0	11,6	9,5	7,0	-
CR 76	CRT 76	0,8	0,59	0,73	0,83	3,4	1,5	15,0	14,3	13,0	11,6	9,5	7,0	-
CR 100	CRT 100	1	0,74	1,14	1,20	5,3	2,4	20,5	19,8	18,9	17,7	15,5	13,5	10,5
CR 102	CRT 102	1	0,74	1,14	1,20	5,3	2,4	20,5	19,8	18,9	17,7	15,5	13,5	10,5



1~ 110V - 60Hz	
TYPE	I (A)
CR 75/76	6,8
CR 100/102	10,6

### Pump model code



TYPE	DIMENSIONS (mm)													
	A	B	C	D	E	F	H1	H2	DNA	DNM	I	L	M	
CR 75	120	45	308	155	115	170	97	222	1"1/2 G	1"1/4 G	325	200	265	13
CR 100	120	45	308	155	115	170	97	222	1"1/2 G	1"1/4 G	325	200	265	13
CR 76	120	45	308	155	115	170	97	222	1"1/2 G	1"1/2 G	325	200	265	14
CR 102	120	45	308	155	115	170	97	222	1"1/2 G	1"1/2 G	325	200	265	14

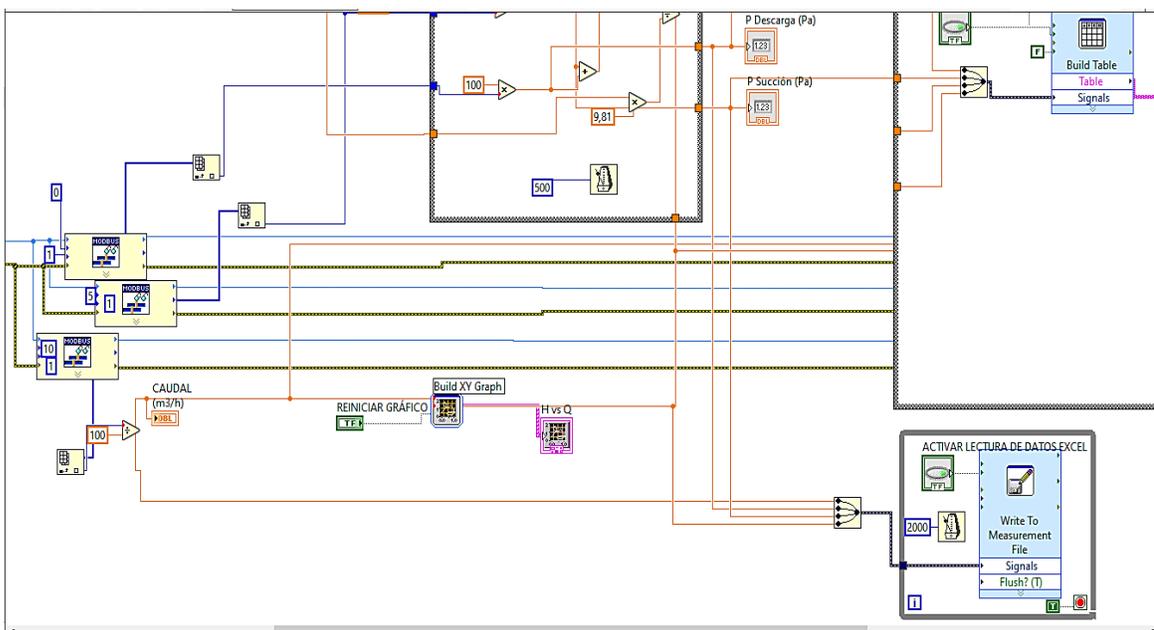
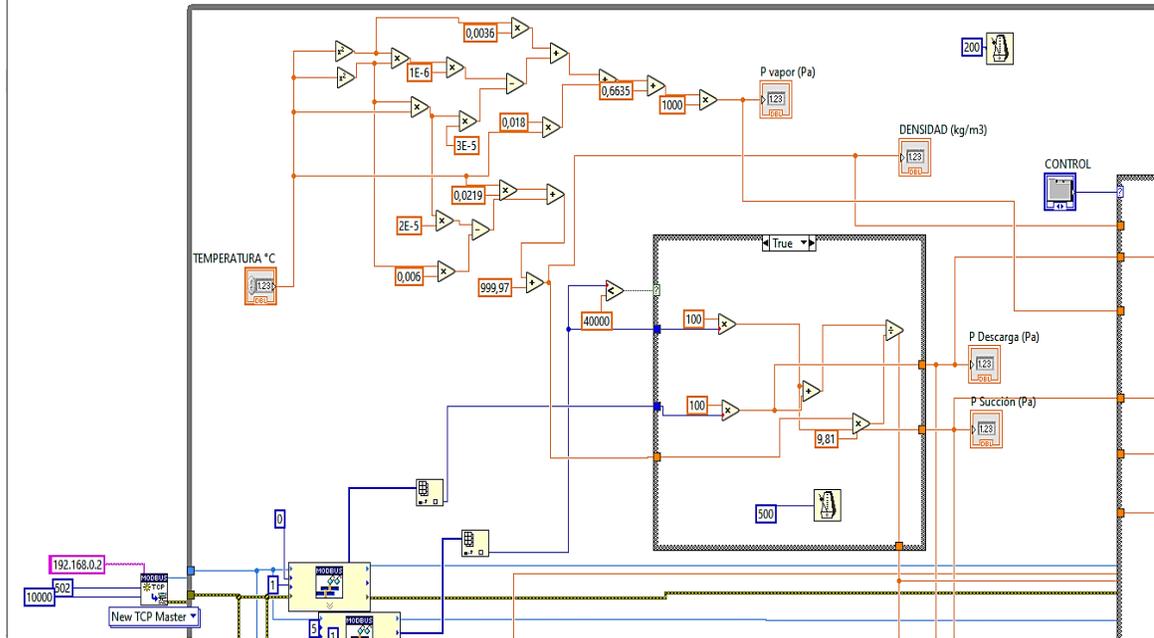
TYPE				
	TRUCK		CONTAINER	
	PALLET (cm)	N° pumps	PALLET (cm)	N° pumps
CR	85X110X145	65	85X110X195	91

**ANEXO 3**

**Fotografías de instalación e implementación del banco experimental**

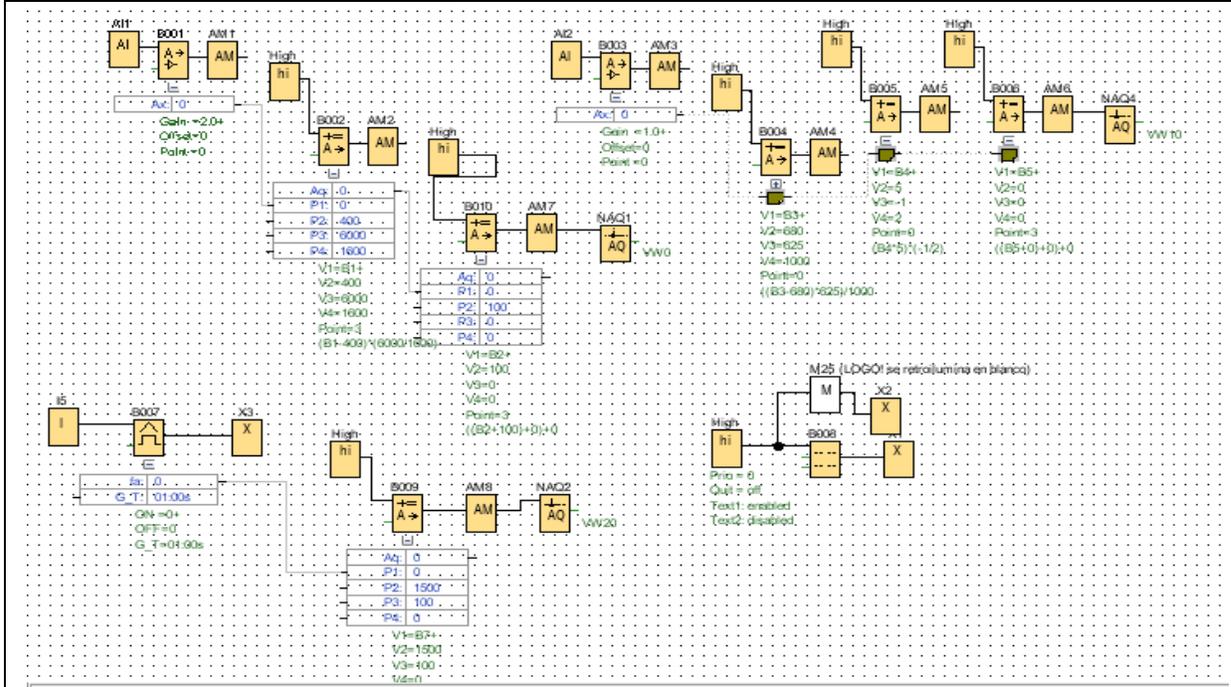


**ANEXO 4**  
**Programación en LabVIEW**





**ANEXO 5**  
**Programación en LOGO SIEMENS**



**B001 [Amplificador analógico]**

**Parámetros** | Comentario

Nombre de bloque:

Sensor: 4 ... 20 mA

**Configuración analógica**

<b>Rango de medida</b>	<b>Parámetro</b>
Mínimo: 400	Gain: 2,00
Máximo: 2000	Offset: 0

**Posiciones decimales**

Decimales en el texto de aviso: 0 +12345

Otros

Protección activa

Aceptar Cancelar Ayuda

**B002 [Instrucción aritmética]**

**Parámetros** | Comentario

Nombre de bloque:

**Instrucción**

V1: B001 [Amplificador anal...]  
Operador 1: - Prioridad 1: H

V2: 400  
Operador 2: x Prioridad 2: L

V3: 6000  
Operador 3: + Prioridad 3: M

V4: 1600

**Posiciones decimales**

Decimales en el texto de aviso: 3 +12.345

**Salida**

Si En="0", la salida es:

Aceptar Cancelar Ayuda

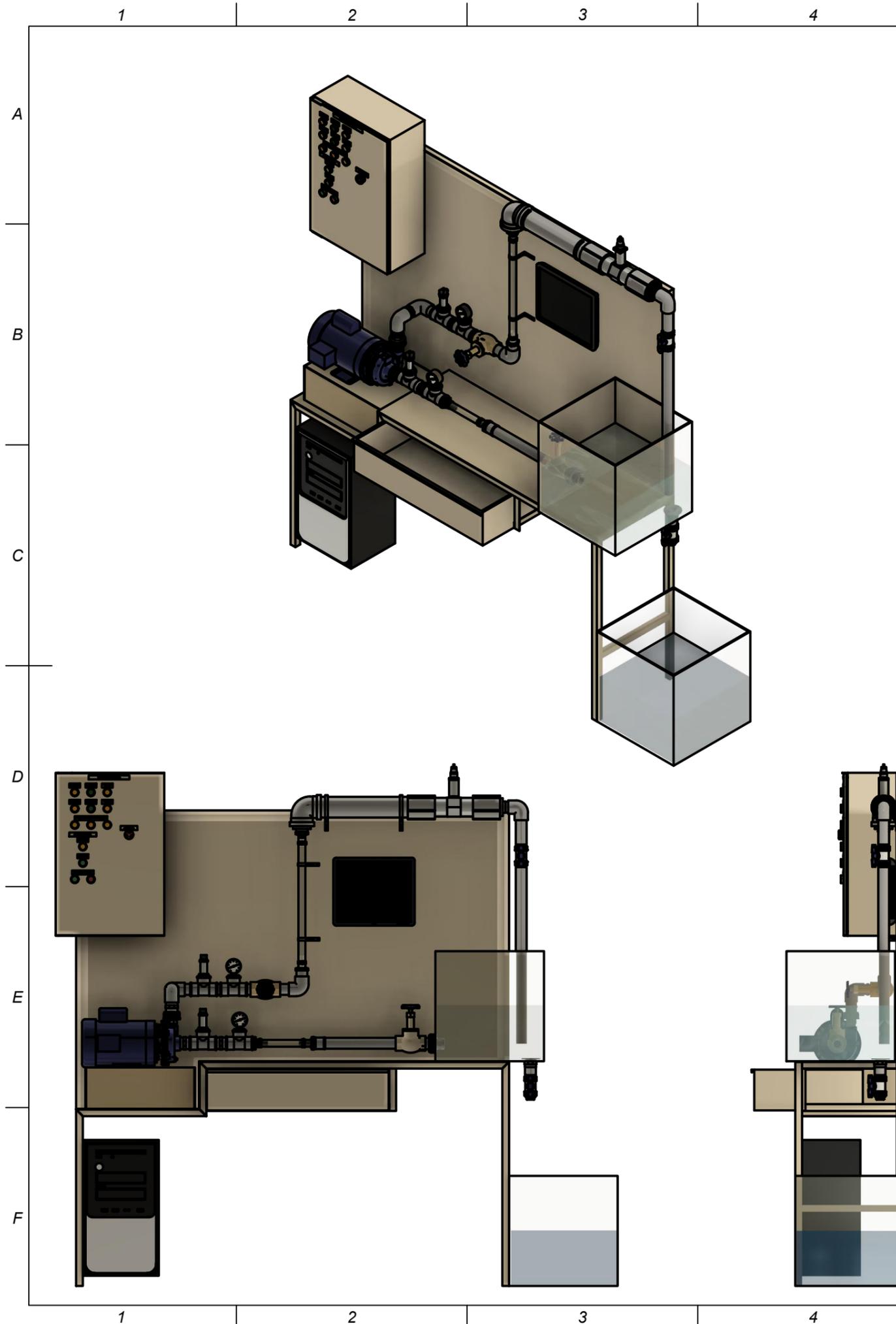


**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA**  
**Y APLICADAS**  
**CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**



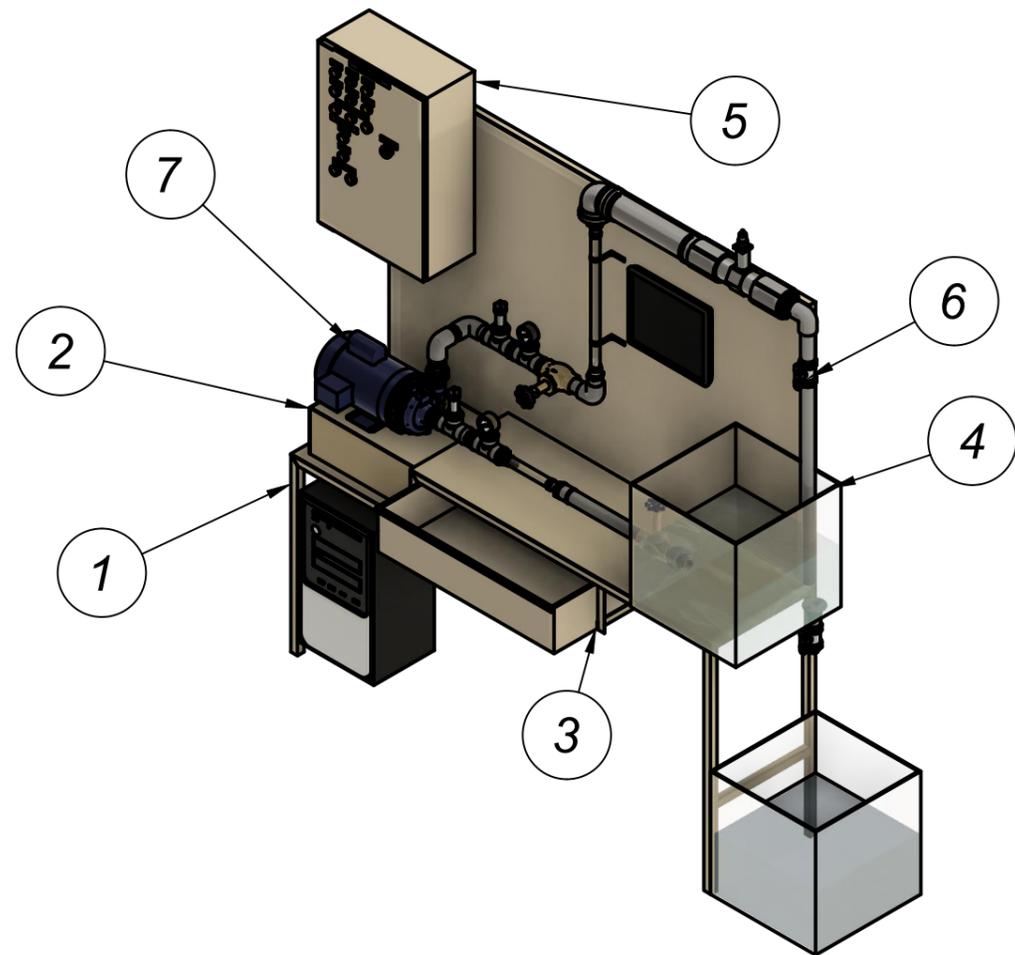
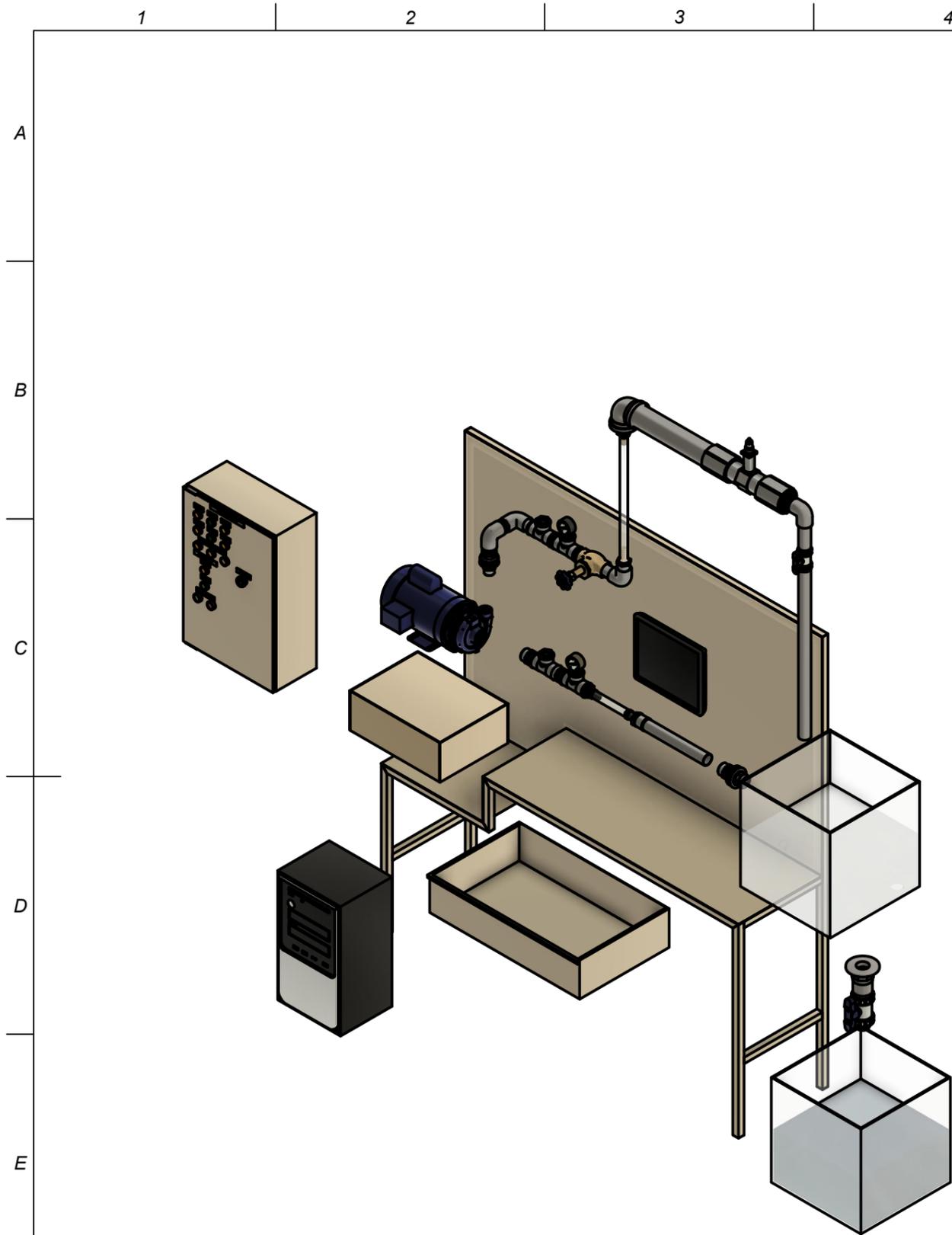
**Ingeniería**  
**Electromecánica**

**ANEXO 6**  
**PLANOS DEL BANCO EXPERIMENTAL DE BOMBEO**



21	Pantalla	1
20	CPU	1
19	Manómetro	2
18	Válvula de Bola y válvula de compuerta	2,1
17	Válvula de vola PVC	1
16	Tubo PP Transparente 1in x 1 m	1m
15	Tubo PP Roscable 2 in x 0.5 m	0.5 m
14	Codo PP R/R 2 in x 90°	2
12	Neplo Flex 1 in	4
11	Tubo PP Roscable 1in x 1 m	1m
10	Bomba de agua 2HP	1
9	Reductor Buje R MH PP 1 3/4 x 1 in	2
8	Unión Universal R/R PP 1in	2
7	Neplo R/R PP 1in	2
6	Tee R/R PP 1 in	4
5	Codo PP R/R 1 in x 90°	4
4	Bomba de agua 2HP	1
3	Tubo estructural cuadrado 25x25x2 mm	10.9m
2	Perfil estructural ángulo "L" 25x25x2 mm	1.9 m
1	Plancha de acero ASTM A36 1600x2000x2 mm	1

N° Pieza	Descripción	Cantidad		
 <b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI</b> 				
Div.	Fecha	Nombres	Escala:	UTC - TF - 001
Rev.	01-08-2022	Lema B. Masaquiza C.		
Apro.		PHD. Laurencio H		
Materiales:		Tolerancia:	N° de plano	Denominación:
		± 0.005mm	001	LISTADO DE MATERIALES



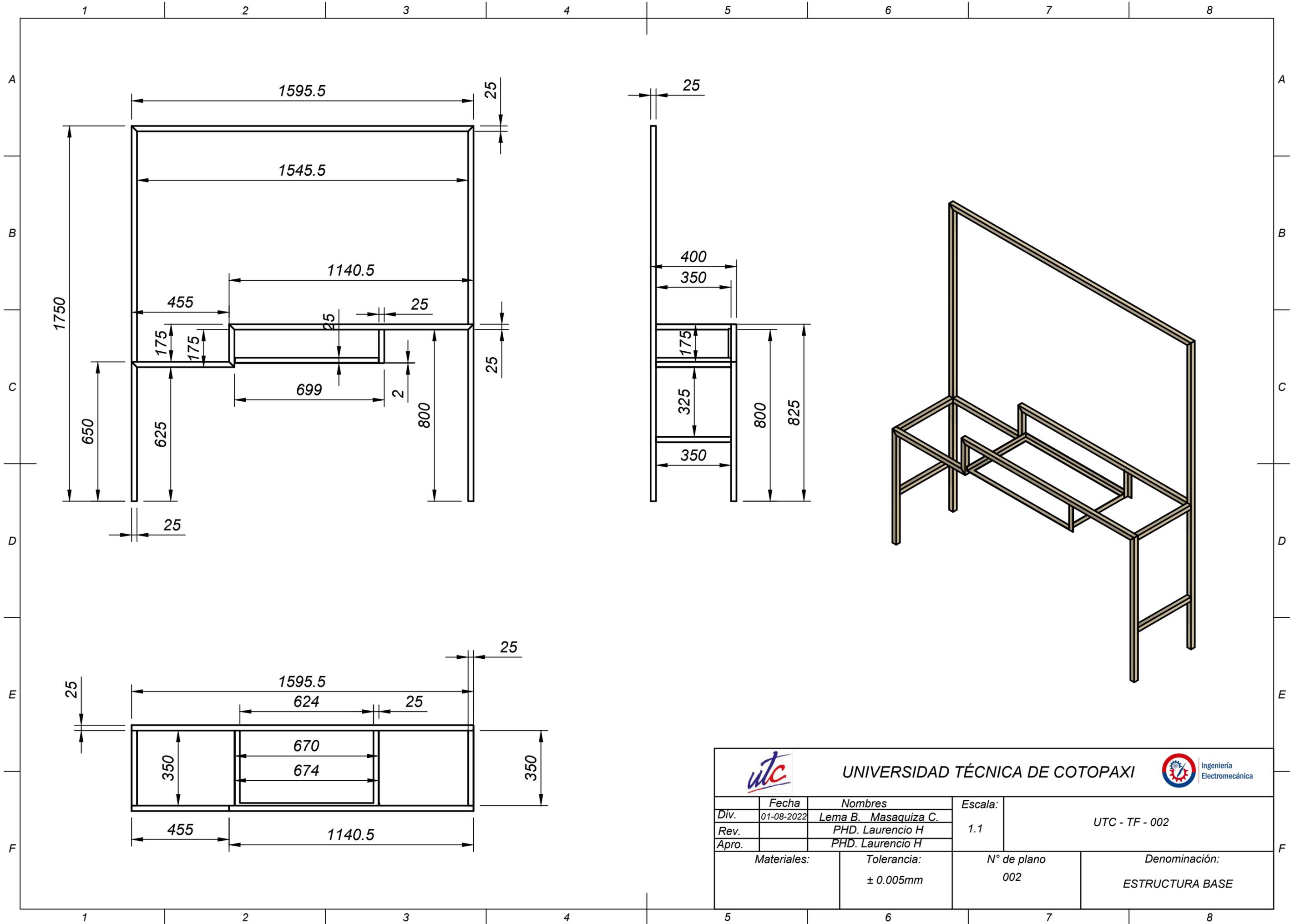
7	Bomba de agua	1	008
6	Lámina	1	007
5	Caja de conexiones	1	006
4	Resipiente de líquido	1	005
3	Cajón	1	004
2	Estructura base de bomba de agua	1	003
1	Estructura base	1	002
N° sistema	Descripción	Cantidad	N° Plano



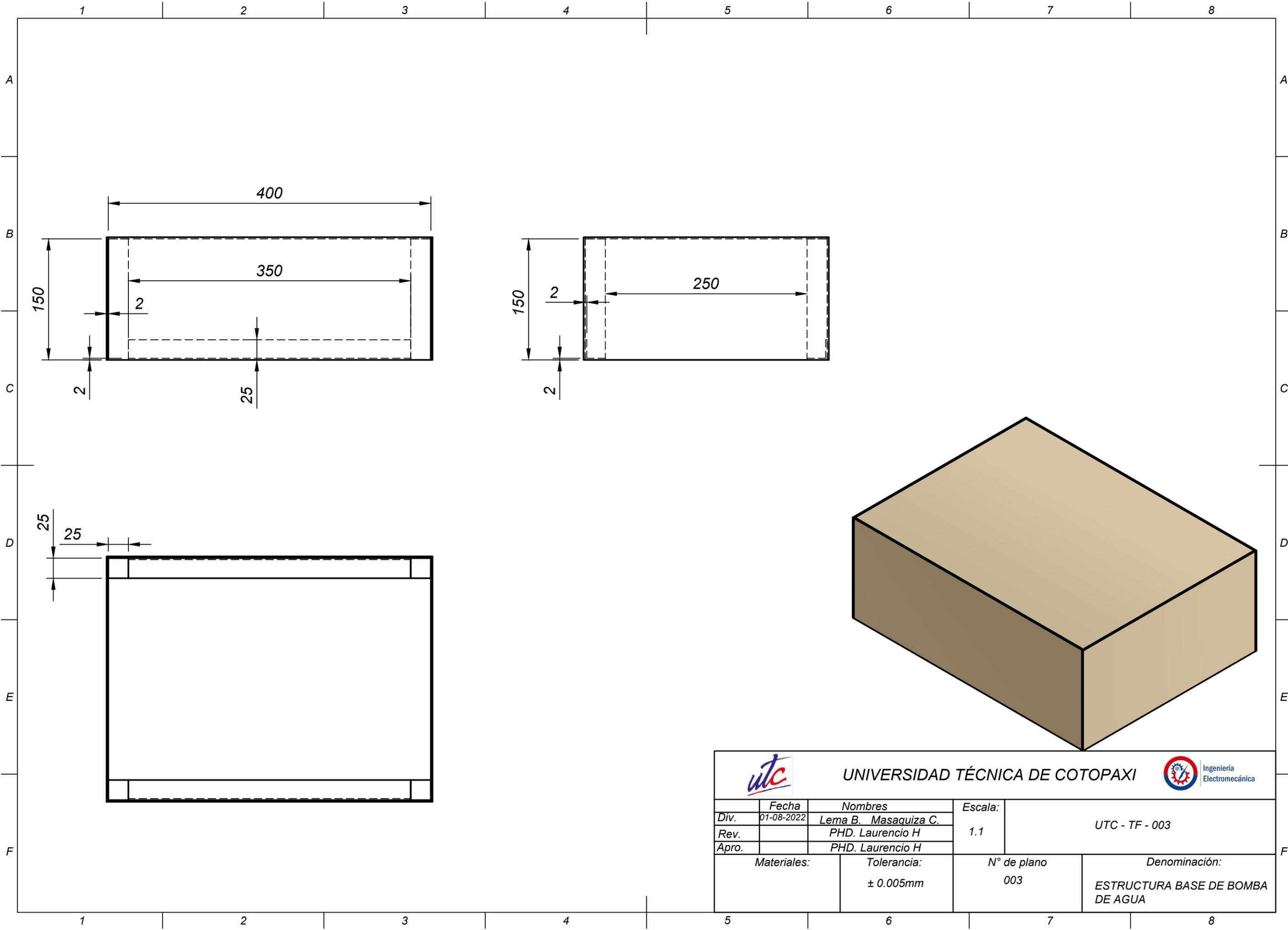
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI



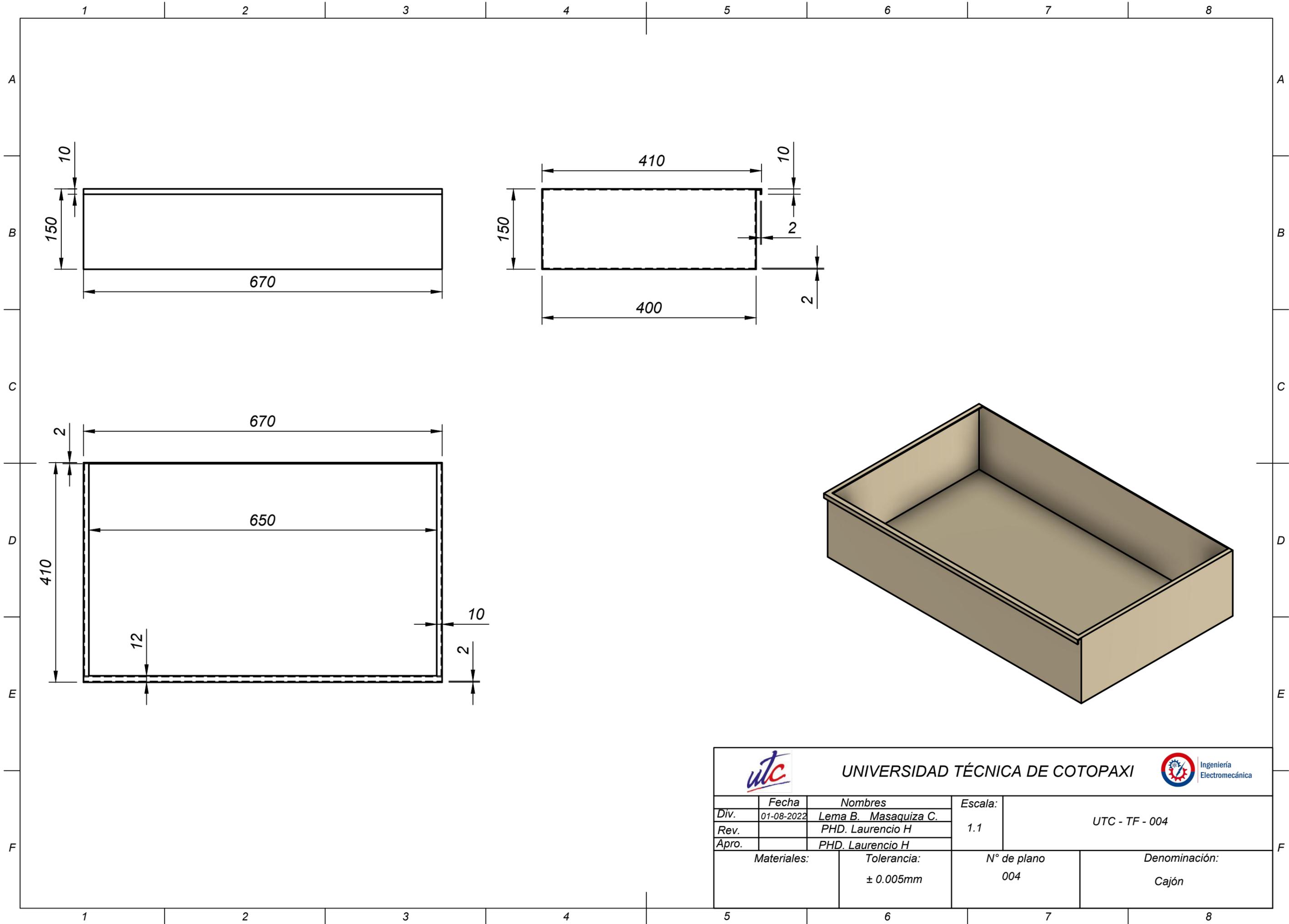
Div.	Fecha	Nombres	Escala:	UTC - TF - 001-1
Rev.	01-08-2022	Lema B. Masaquiza C.	1.1	
Apro.		PHD. Laurencio H		
Materiales:		Tolerancia:	N° de plano	Denominación:
		± 0.005mm	001-1	PARTES DE TESIS DE FLUIDOS



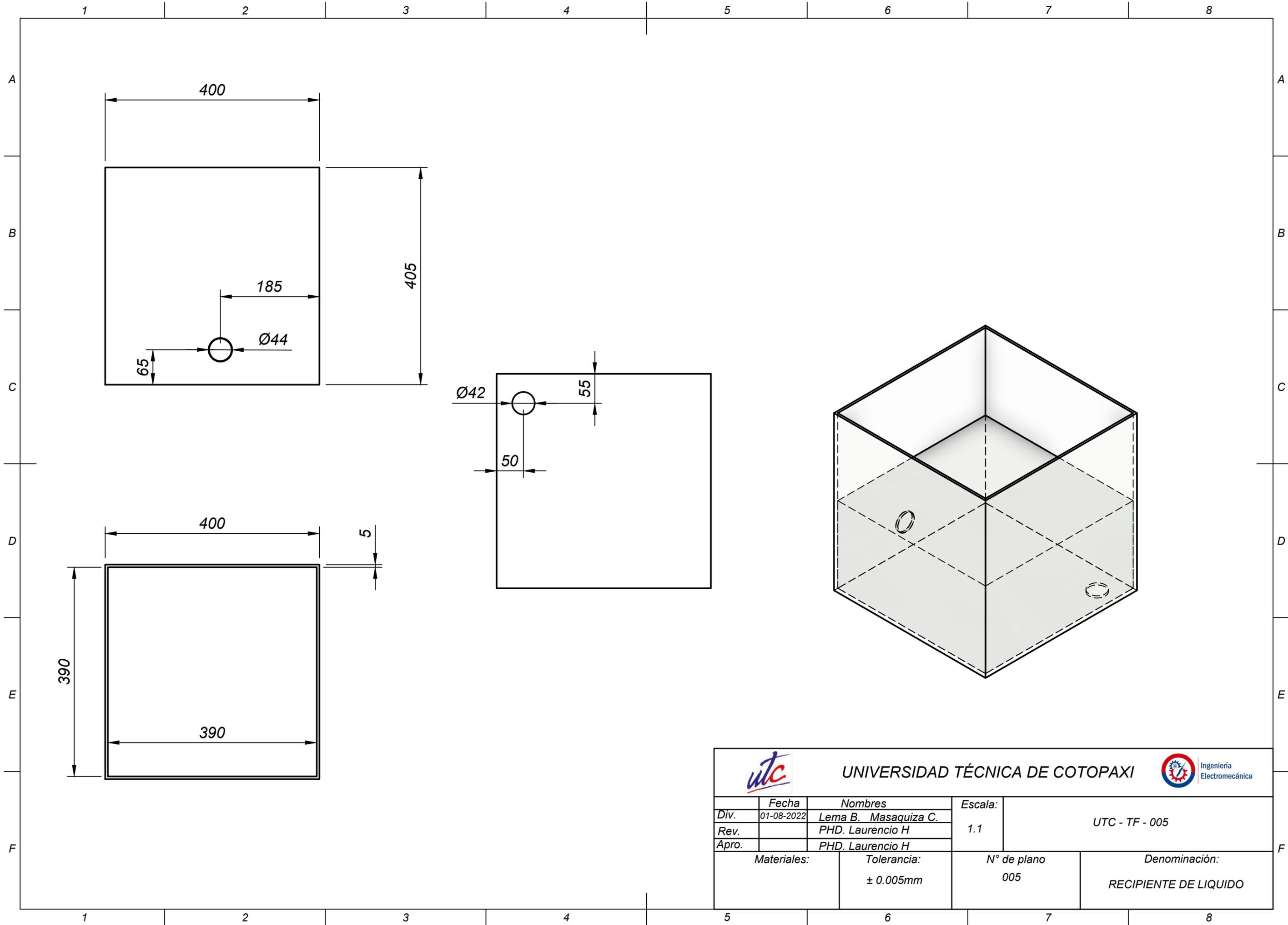
		<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI</b>			
Div.	Fecha	Nombres		Escala:	UTC - TF - 002
Rev.	01-08-2022	Lema B. Masaquiza C.		1.1	
Apro.		PHD. Laurencio H			
Materiales:		Tolerancia:		N° de plano	Denominación:
		± 0.005mm		002	ESTRUCTURA BASE



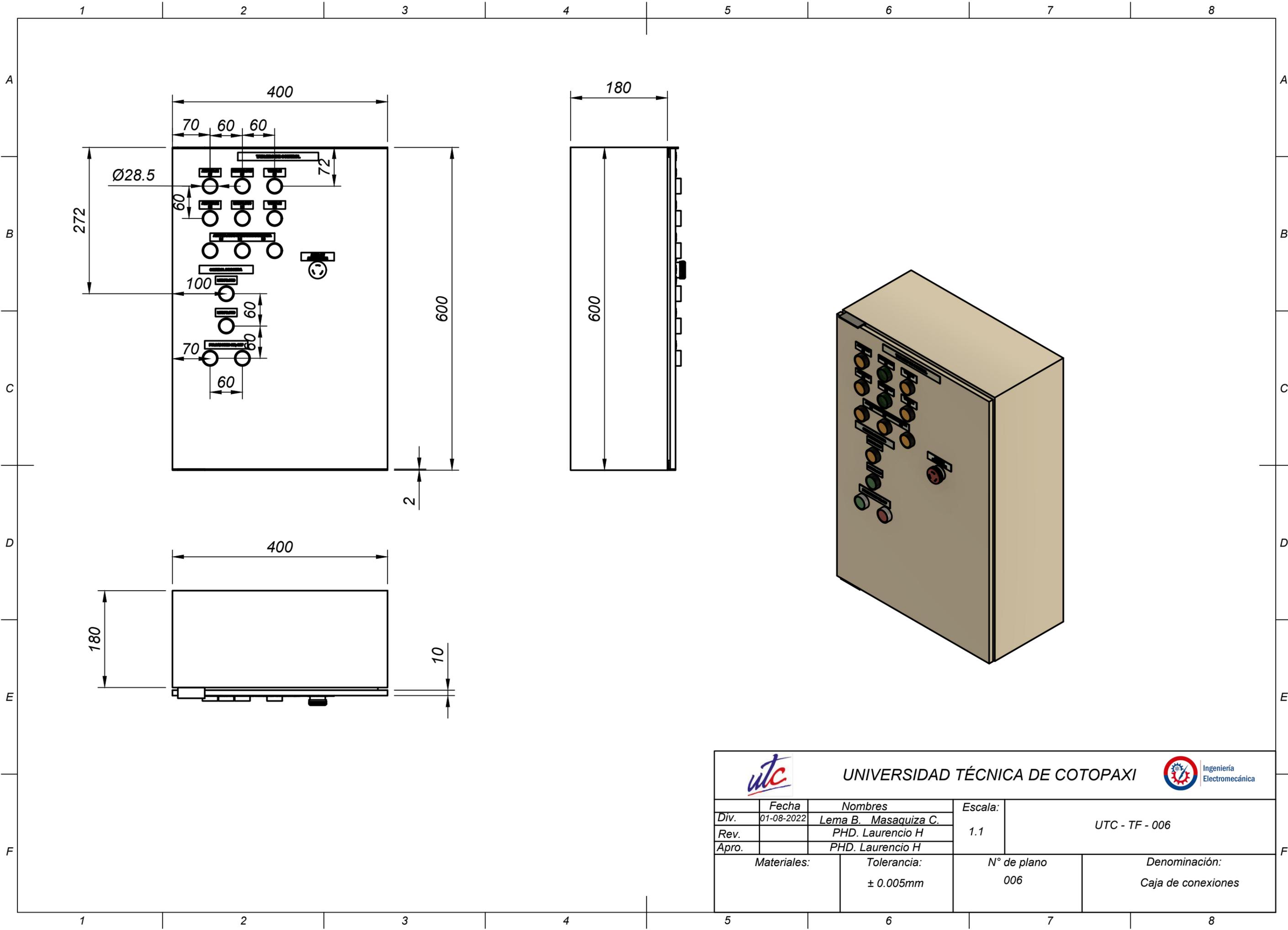
		<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI</b>			
Div.	Fecha	Nombres	Escala:	UTC - TF - 003	
Rev.	01-08-2022	Lema B. Masaquiza C.	1.1		
Apro.		PHD. Laurencio H			
Materiales:		Tolerancia:	N° de plano	Denominación:	
		± 0.005mm	003	ESTRUCTURA BASE DE BOMBA DE AGUA	



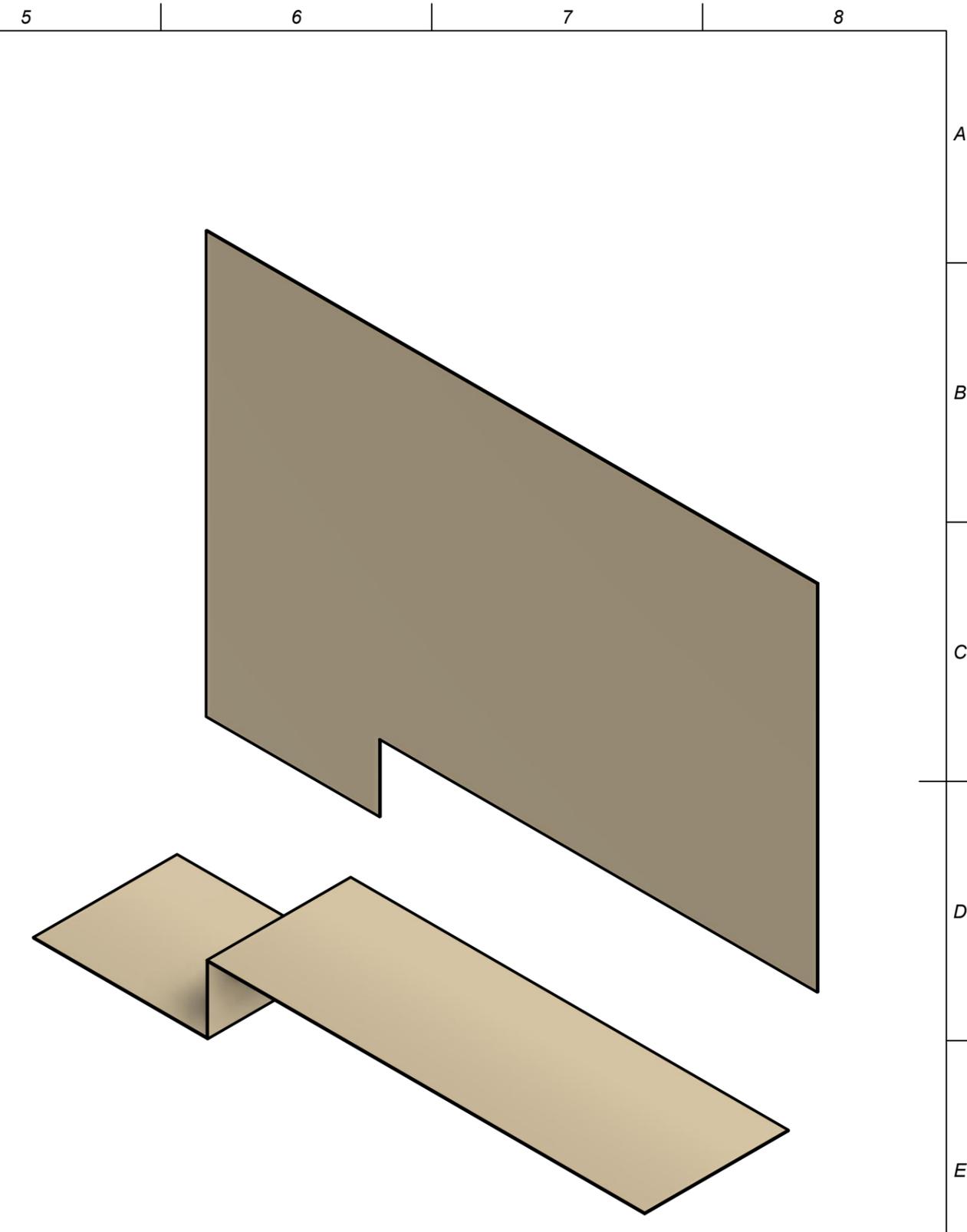
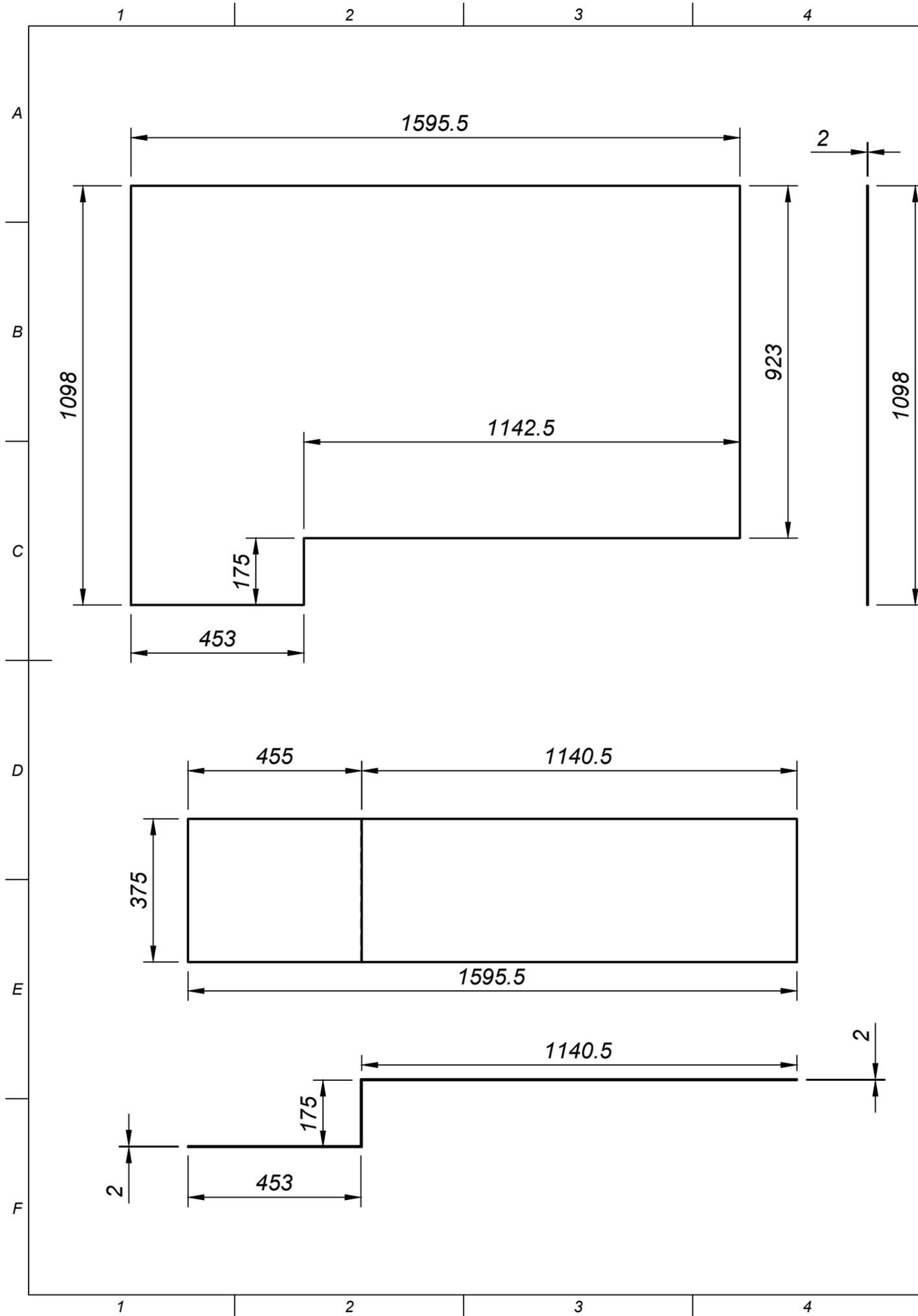
		<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI</b>			
Div.	01-08-2022	Lema B. Masaquiza C.		Escala:	UTC - TF - 004
Rev.		PHD. Laurencio H			
Apro.		PHD. Laurencio H			
Materiales:		Tolerancia:		N° de plano	Denominación:
		± 0.005mm		004	Cajón



		<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI</b>			
<i>Div.</i>	<i>Fecha</i>	<i>Nombres</i>		<i>Escala:</i>	UTC - TF - 005
	01-08-2022	Lema B. Masaquiza C.			
<i>Rev.</i>		PHD. Laurencio H			
<i>Apro.</i>		PHD. Laurencio H		1.1	N° de plano 005
<i>Materiales:</i>		<i>Tolerancia:</i>			
		$\pm 0.005mm$		RECIPIENTE DE LIQUIDO	



		<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI</b>			
Div.	Fecha	Nombres	Escala:	UTC - TF - 006	
Rev.	01-08-2022	Lema B. Masaquiza C.	1.1		
Apro.		PHD. Laurencio H			
Materiales:		Tolerancia:	N° de plano	Denominación:	
		$\pm 0.005\text{mm}$	006	Caja de conexiones	



		UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI			
Div.	Fecha	Nombres		Escala:	UTC - TF - 007
Rev.	01-08-2022	Lema B. Masaquiza C.		1.1	
Apro.		PHD. Laurencio H			
Materiales:		Tolerancia:		N° de plano	Denominación:
		± 0.005mm		007	Lámina

1 2 3 4 5 6 7 8

A

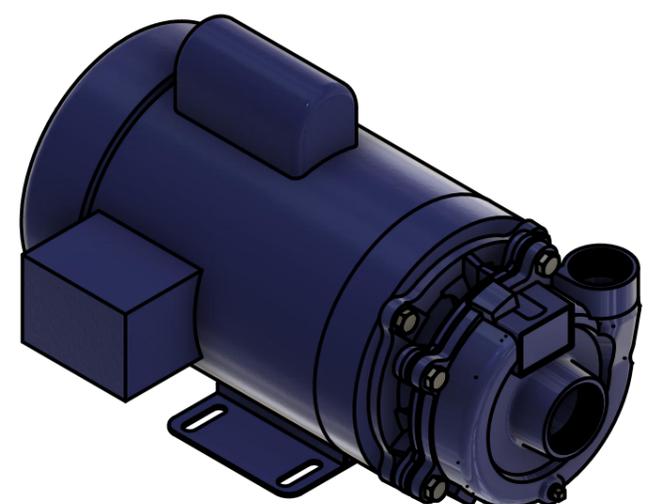
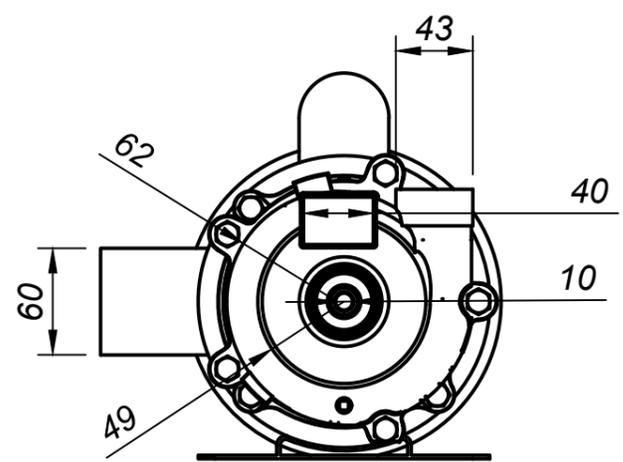
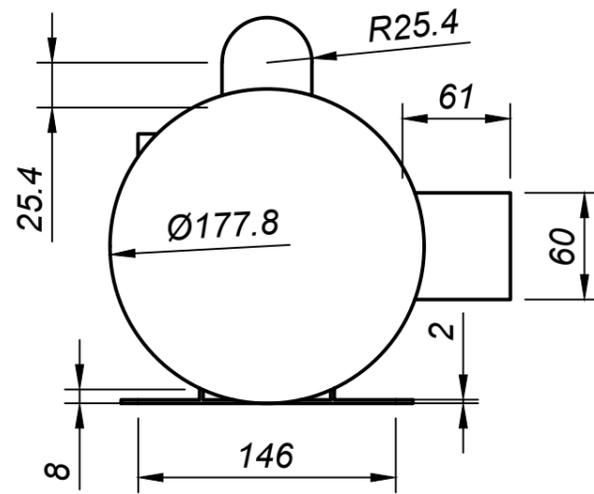
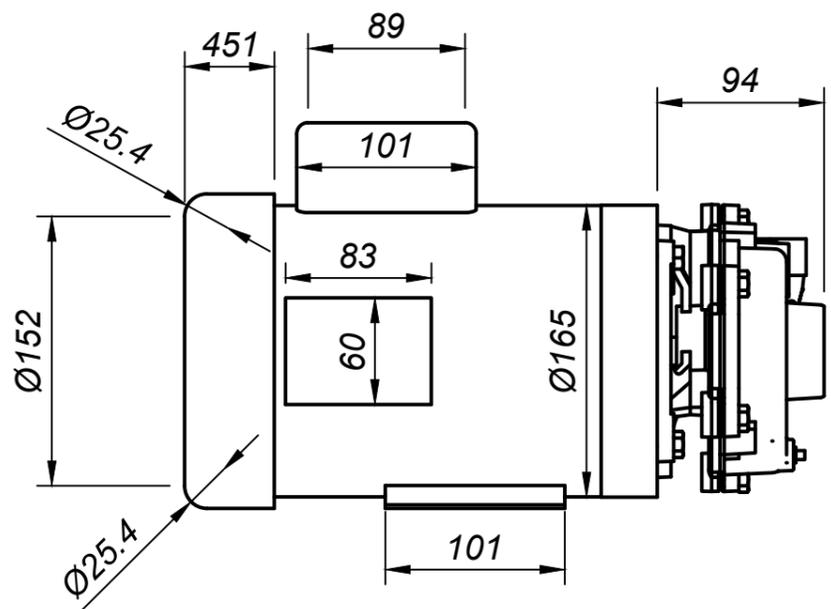
B

C

D

E

F



		<b>UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI</b>			
Div.	Fecha	Nombres	Escala:	UTC - TF - 008	
Rev.	01-08-2022	Lema B. Masaquiza C.	1.1		
Apro.		PHD. Laurencio H			
Materiales:		Tolerancia:	N° de plano	Denominación:	
		± 0.005mm	008	BOMBA DE AGUA	

1 2 3 4 5 6 7 8

A

B

C

D

E

F



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI  
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
Y APLICADAS  
CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA**



**Ingeniería  
Electromecánica**

**ANEXO 7  
MANUAL DE OPERACIÓN DEL BANCO  
EXPERIMENTAL**

## MANUAL DE OPERACIÓN DE LA BOMBA

### SACAR LA CURVA CARATERISTICA DE LA BOMBA

**Paso N°1.-** Siempre que sea posible, cebar las bombas antes de comenzar cualquier operación de esa manera se evitará el daño de las bombas.

**Paso N°2.-** Conectar el módulo a 220V a trifásica.



**Paso N°3.-** Tener la válvula 2 cerrada antes de comenzar con las prácticas



**Paso N°4.-** Accionar los interruptores termomagnéticos progresivamente, que están ubicados en la parte superior del Tablero de control.

Interruptor termomagnético (B1). - Alimentación de la fuente del LOGO, pulsadores y lámparas y PC (110V).

Interruptor termomagnético (B2). - Alimentación del variador de frecuencia.

Interruptor termomagnético (B3). - Alimentación de la bomba.

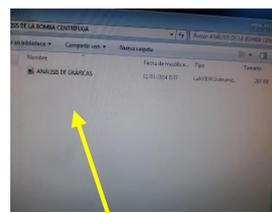


**Paso N°5.-** Encender el equipo de visualización y adquisición de datos (computadora).



**Parte 1:** Curva de la bomba H vs Q

**Paso N°6.-** En la PC abrir la carpeta **ANÁLISIS DE LA BOMBA CENTRÍFUGA**, abrir el archivo **ANÁLISIS DE GRÁFICAS** (tipo LabView Instrument), y ejecutar el programa.



**Paso N°7.-** Verificar la temperatura del agua en el termómetro y escribirla con la coma los decimales en el programa.



Dar click para registrar datos.

Verificar que reinicie el gráfico cuando este simulando.

**Paso N°9.-** En el VDF controlar con la perilla del potenciómetro ubicar la frecuencia de funcionamiento de la bomba y pulsar el botón RUN calculando a una frecuencia de 60Hz, luego 50Hz y finalmente con 40Hz.



**Paso N°10.-** Accionar la bomba con el botón de arranque del tablero e ir girando la válvula de descarga (V2), para que el fluido atraviese el sistema. Abrir progresivamente la válvula mientras se va recopilando los datos y visualizando en el software Labview la curva característica de la bomba, ir tomando los datos de los indicadores cada  $\frac{1}{2}$  vuelta y registrar en la tabla 1.



**Paso N°11.-** Variar la frecuencia en 50Hz y 40 Hz y realizar el paso N9, con el tacómetro medir las revoluciones del motor de la bomba.



## PASOS PARA EL ANÁLISIS DEL NPSH DISPONIBLE

**Paso N°1.-** Ubicarse en la pestaña de Labview en **REGISTRO NPSH**.

**Paso N°2.-** Abrir la válvula de descarga (V2) totalmente y la válvula de succión (V1) totalmente al máximo.

**Paso N°3.-** Encender la bomba con el VDF en 60 Hz.

**Paso N°4.-** Cerrar la válvula(V1) de succión hasta el punto en donde empiece el fenómeno de cavitación, generalmente la bomba empieza a vibrar y se escucha un ruido



característico del equipo, también se visualizará en la tubería transparente la formación de burbujas.

**Paso N°5.-** Abrir la válvula de descarga (V2) hasta el punto en donde se deja de observar la formación de burbujas en la tubería. Presionar el botón **REGISTRO DE DATOS** en ese momento.

**Paso N°6.-** Repetir el paso 4 y 5 hasta el punto en donde ya no haya el fenómeno de cavitación, realizar esto 4 veces hasta cerrar por completo la válvula V2 y anotar en la tabla.

**Paso N°9.-** Repetir el paso N4, N5, N6 a 50Hz y 40 Hz, anotar en la tabla 3 y tabla 4, realizar el paso con el tacómetro medir las revoluciones del motor de la bomba.

#### **Pasos para apagar el equipo:**

**Paso N°10.-** Parar la simulación en LabVIEW.

**Paso N°11.-** Poner STOP el variador de frecuencia.

**Paso N°12.-** Pulsar el botón pare de la bomba.

**Paso N°13.-** Cerrar las pestañas en el monitor y apagar el equipo.

**Paso N°14.-** Dejar abierto completamente las dos válvulas de succión y descarga.

**Paso N°14.-** Cerrar los breques B1, B2 y B3.

**Paso N°15.-** Cerrar la tapa del módulo y desconectar el sistema 220v trifásico.