

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción**

Diseño de un sistema demostrativo Bomba-Turbina de un kilovatio de potencia en  
la ESPOL.

INGE-2583

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Mecánico**

Presentado por:

Sebastián Arias Muñoz

Diego Mateo Vallejo Arauz

Guayaquil - Ecuador

Año: 2024

## **Dedicatoria**

---

**Dedico este proyecto a mi familia, mis padres quienes me han acompañado toda la vida enseñándome a seguir adelante y a luchar por mis sueños, y a mis abuelos que los llevo en el corazón para toda la eternidad.**

**Dedico nuestro proyecto a cada persona que fue parte de este camino, especialmente a mis padres, mi hermano y mis abuelos que se preocuparon día a día de mí y que se orgullecen de todos mis logros. A mi pequeña sobrina, que me impulsa a ser mejor cada día para poderle dar todo lo que se merece. A mis amigos, que sin ellos no hubiese disfrutado este proceso educativo lejos de mi ciudad.**

## Agradecimientos

---

Agradezco a Dios por haberme permitido formarme en esta prestigiosa universidad, por bendecirme con una familia que me apoya en cada momento importante de mi vida y por todas las personas que me alentaron a dar siempre lo mejor de mí para alcanzar mis metas. Este es solo el comienzo de un maravilloso camino, y agradezco profundamente a este hermoso país por su acogida. Me comprometo a devolverle el favor, sirviéndolo con todo mi ser.

Agradezco a Dios por brindarme salud, capacidad y fuerza de voluntad para cumplir mis metas, a mi madre por ser el pilar de mi vida, a mi padre por su constante apoyo, a mi hermano por ser un ejemplo a seguir, a mi familia en general por estar siempre en el camino y a todas esas personas que confiaron en mí y brindaron su amistad en estos años de estudios. Gracias por acompañarme a iniciar una nueva etapa en la vida.

## Declaración Expresa

---

Nosotros, Sebastian Arias Muñoz y Diego Mateo Vallejo Arauz acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mí/nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me/nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi/nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 22 de mayo de 2024.



Sebastian Arias Muñoz



Diego Mateo Vallejo

Arauz

## **Evaluadores**

---

**Ph.D. Miguel Ángel Quilambaqui Jara**

Profesor de Materia Integradora

---

**Ph.D. Juan Manuel Peralta Jaramillo**

Tutor de Proyecto Integrador

## **RESUMEN**

El actual proyecto consiste en diseñar un sistema demostrativo bomba-turbina para la generación hidroeléctrica a escala micro asociado a laboratorios remotos dentro del proyecto ERASMUS 2024 para garantizar la calidad de aprendizaje de los estudiantes de ingeniería mecánica y carreras afines, logrando el desarrollo de habilidades y competencias técnicas para su futuro laboral. Como objetivos, se abordan el diseño del sistema, el dimensionamiento de la bomba y tuberías. La validación de resultados, mediante simulaciones y el diseño de un diagrama unifilar eléctrico conceptual. La metodología de la investigación que se utilizó fue mixta, cualitativa y cuantitativa, debido al desarrollo del diseño experimental donde se tuvieron aspectos como: modelos matemáticos, simulaciones bajo condiciones operativas, análisis de necesidades del cliente, impacto social y selección de alternativas. Los principales resultados que se obtuvieron fueron las distancias y dimensiones de las tuberías para la efectividad del sistema junto con la selección de la bomba. Finalmente, se desarrolló un diseño óptimo cumpliendo con las exigencias del cliente en el que se aseguró un flujo continuo y un tiempo de operación de 5 a 10 minutos, además se dimensionó correctamente la bomba y tuberías necesarias para el sistema analizando las curvas de desempeño tanto para cabezal y NPSH; asimismo, se realizó la simulación en SolidWorks ratificando la validez de los resultados en comparación con los resultados teóricos y por último, se diseñó el diagrama unifilar eléctrico, especificando de manera conceptual los componentes necesarios para llevar a cabo la operatividad del sistema.

**Palabras Clave:** Mecánica de fluidos, turbo maquinarias, tuberías, presión, velocidad.

## **ABSTRACT**

*The current project consists of designing a pump-turbine demonstrative system for micro-scale hydroelectric generation associated with remote laboratories within the ERASMUS 2024 project to guarantee the quality of education for mechanical engineering students and related careers, achieving the development of technical skills and competencies for their future work. The objectives are addressed by system design, pump and pipe dimensioning, validation of results through simulations and the design of a conceptual single-line electrical diagram. The research methodology used was mixed, qualitative and quantitative, due to the development of the experimental design where aspects such as mathematical models, simulations under operating conditions, analysis of customer needs, social impact and selection of alternatives were considered. The main results obtained were the distances and dimensions of the pipes for the effectiveness of the system together with the selection of the pump. Finally, an optimal design was developed, which met the client's requirements, ensuring a continuous flow and an operating time of 5 to 10 minutes. In addition, the pump and pipes necessary for the system were correctly sized by analyzing the head and NPSH performance curves. Likewise, the simulation was carried out in SolidWorks, confirming the validity of the results in comparison with the theoretical results. Finally, the single-line electrical diagram was conceptually designed, specifying the components necessary to carry out the operation of the system.*

**Keywords:** *Fluid mechanics, turbomachinery, piping, pressure, velocity.*

## ÍNDICE GENERAL

RESUMEN .....	I
ABSTRACT .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS .....	V
SIMBOLOGÍA .....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VII
ÍNDICE DE TABLAS .....	IX
ÍNDICE DE PLANOS .....	X
Capítulo 1 .....	1
1.1 Introducción .....	2
1.2 Descripción del problema .....	3
1.3 Justificación del problema .....	3
1.4 Objetivos .....	4
1.4.1 Objetivo general .....	4
1.4.2 Objetivos específicos .....	4
1.5 Marco teórico .....	4
1.5.1 La educación superior en Ecuador .....	4
1.5.2 Proyecto Erasmus .....	6
1.5.3 Sistemas demostrativos .....	7
1.5.4 Propiedades de los fluidos .....	9
1.5.5 Ecuación de la Energía y Bernoulli .....	12
1.5.6 Flujo en tuberías .....	13
1.5.7 Turbomaquinaria .....	14
1.5.8 Generación hidroeléctrica a escala micro .....	15
Capítulo 2 .....	16

<b>2. Metodología</b> .....	17
<b>2.1 Metodología de la investigación</b> .....	17
<b>2.2 Diseño conceptual</b> .....	17
<b>2.2.1 Lista de Requerimientos</b> .....	18
<b>2.2.2 Metodología del diseño</b> .....	19
<b>2.3 Alternativas de diseño</b> .....	20
<b>2.3.1 Matriz de decisión</b> .....	20
<b>2.3.2 Alternativa 1</b> .....	24
<b>2.3.3 Alternativa 2</b> .....	26
<b>2.3.4 Alternativa 3</b> .....	28
<b>2.4 Selección de la mejor alternativa</b> .....	30
<b>2.5 Diseño detallado</b> .....	31
<b>2.5.1 Cálculos</b> .....	32
<b>2.5.2 Diseño de diagrama unifilar eléctrico del sistema</b> .....	39
<b>2.6 Especificaciones técnicas</b> .....	41
<b>Capítulo 3</b> .....	46
<b>3. Resultados y análisis</b> .....	47
<b>3.1 Resultados teóricos</b> .....	47
<b>3.2 Resultados de la simulación del sistema</b> .....	51
<b>3.3 Costos del sistema</b> .....	59
<b>Capítulo 4</b> .....	61
<b>4. Conclusiones y recomendaciones</b> .....	62
<b>4.1 Conclusiones</b> .....	62
<b>4.2 Recomendaciones</b> .....	62
<b>Referencias</b> .....	64
<b>APÉNDICE A: PLANOS DEL SISTEMA</b> .....	67

## ABREVIATURAS

CDTS	Centro de Desarrollo Tecnológico Sostenible
ERASMUS	Plan de Acción de la Región Europea para la Movilidad de los Estudiantes Universitarios
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
IES	Instituto de Educación Superior
LOES	Ley Orgánica de Educación Superior
NPSH	Cabezal Neto de Succión Positiva
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OLADE	Organización Latinoamericana de Energía
PLC	Controlador Lógico Programable
PVC	Policloruro de Vinilo
SENESCYT	Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación
TDH	Altura Dinámica Total
UE	Unión Europea

## SIMBOLOGÍA

$W_e$	Potencia eléctrica	$m$	Masa
$W_t$	Potencia de la turbina	m	Metro
$\dot{m}_e$	Flujo másico de entrada	$m^2$	Metro cuadrado
$\dot{m}_s$	Flujo másico de salida	$m^3$	Metro cúbico
$\frac{dm_{vc}}{dt}$	Razón de cambio de masa con respecto al tiempo de un volumen de control	mm	Milímetro
		N	Newton
		P	Presión
$\frac{du}{dy}$	Gradiente de velocidad	Pa	Pascal
$u_p$	Velocidad promedio	Q	Flujo volumétrico o caudal
$\eta_g$	Eficiencia del generador eléctrico	Re	Número de Reynolds
		S	Gravedad específica
°C	Grado Centígrado	s	Segundo
$A_t$	Área transversal	u	Velocidad
Bar	Bar	V	Volumen
D	Diámetro hidráulico	V	Voltio
g	Gravedad	W	Vatio
h	Altura	$W_m$	Potencia del eje
$h_f$	Cabezal de pérdidas por fricción	$W_p$	Potencia de bomba
$h_L$	Cabezal de pérdidas por fricción y accesorios	z	Altura
$h_m$	Cabezal de pérdidas por accesorios	f	Factor de fricción de Darcey-Weisbach
HP	Caballo de potencia	$\gamma$	Peso específico
$h_p$	Cabezal de bomba	$\mu$	Viscosidad dinámica
$h_t$	Cabezal de turbina	$\nu$	Viscosidad cinemática
K	Coefficiente de pérdida del accesorio	$\rho$	Densidad
		$\tau$	Esfuerzo cortante
		$\epsilon$	Rugosidad
Kg	Kilogramo	$N_{Sp}$	Velocidad específica
KW	Kilovatio		
KWh	Kilovatio hora		

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Diagrama de flujo</i> .....	20
Figura 2 <i>Diseño conceptual de la alternativa 1</i> .....	24
Figura 3 <i>Diseño conceptual de la alternativa 1 – tanque elevado</i> .....	25
Figura 4 <i>Diseño conceptual de la alternativa 1 – tanque del depósito</i> .....	26
Figura 5 <i>Diseño conceptual de la alternativa 2</i> .....	26
Figura 6 <i>Diseño conceptual de la alternativa 2 – tanque elevado</i> .....	27
Figura 7 <i>Diseño conceptual de la alternativa 2 – tanque del depósito</i> .....	28
Figura 8 <i>Diseño conceptual de la alternativa 3</i> .....	28
Figura 9 <i>Diseño conceptual de la alternativa 3 – tanque elevado</i> .....	29
Figura 10 <i>Diseño conceptual de la alternativa 3 – tanque del depósito</i> .....	30
Figura 11 <i>Gráfica de principales tipos de bombas dinámicas</i> .....	36
Figura 12 <i>Diagrama eléctrico del sistema demostrativo bomba-turbina</i> .....	41
Figura 13 <i>Especificaciones técnicas según el fabricante del hidro generador</i> .....	42
Figura 14 <i>Curva de desempeño de la bomba</i> .....	42
Figura 15 <i>Datos de desempeño de la bomba</i> .....	43
Figura 16 <i>Tabla de valores de cabezal disponible de la bomba HFm 6A</i> .....	48
Figura 17 <i>Curva de desempeño de la bomba escogida</i> .....	49
Figura 18 <i>Gráfica de cabezal requerido y disponible de la bomba HFm 6A</i> .....	50
Figura 19 <i>Gráfica de NPSH requerido de la bomba HFm 6A</i> .....	50
Figura 20 <i>Mallado global del sistema</i> .....	51
Figura 21 <i>Mallado local del sistema</i> .....	52
Figura 22 <i>Tabla de información de la simulación</i> .....	52
Figura 23 <i>Resultados de la simulación</i> .....	53
Figura 24 <i>Curvas de la simulación al final del tiempo configurado</i> .....	53

Figura 25 <i>Representación de la velocidad del fluido en el sistema</i> .....	56
Figura 26 <i>Representación de la velocidad del fluido en el sistema</i> .....	56
Figura 27 <i>Representación de la presión del fluido ejercida en el sistema</i> .....	57
Figura 28 <i>Representación de la presión del fluido sobre el sistema</i> .....	58

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Lista de requerimientos</i> .....	18
Tabla 2 <i>Matriz de decisión</i> .....	21
Tabla 3 <i>Evaluación técnica del proyecto</i> .....	31
Tabla 4 <i>Datos del proyecto</i> .....	32
Tabla 5 <i>Accesorios en la línea de succión de la turbina</i> .....	35
Tabla 6 <i>Accesorios en la línea de bombeo</i> .....	37
Tabla 7 <i>Accesorios del sistema mecánico - lista de materiales</i> .....	44
Tabla 8 <i>Accesorios del sistema eléctrico</i> .....	45
Tabla 9 <i>Resultados teóricos en la línea de turbina</i> .....	47
Tabla 10 <i>Resultados teóricos en la línea de bombeo</i> .....	48
Tabla 11 <i>Resultados teóricos en la línea de bombeo</i> .....	49
Tabla 12 <i>Tabla de velocidad y presión promedio</i> .....	51
Tabla 13 <i>Resultados de simulación en SolidWorks</i> .....	54
Tabla 14 <i>Errores porcentuales de datos teóricos vs resultados simulados</i> .....	54
Tabla 15 <i>Cotización de los materiales para la construcción del sistema</i> .....	59

## ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1 <i>Lista de materiales</i> .....	67
Plano 2 <i>Vista lateral</i> .....	68
Plano 3 <i>Vista lateral</i> .....	69
Plano 4 <i>Vista isométrica</i> .....	70

# Capítulo 1

## 1.1 Introducción

El actual proyecto contempla el desarrollo de un sistema demostrativo bomba-turbina de un kilovatio de potencia en el campus Gustavo Galindo de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), el mismo que es un banco de pruebas de toma de datos con el fin de realizar la curva característica de la turbina para describir y predecir su comportamiento bajo diferentes condiciones de operación (Munson B. *et al*, 2013). Los componentes utilizados en el sistema son: tanques de polietileno tipo botella para almacenamiento de agua, tuberías y accesorios de PVC, una turbina Turgo, una bomba centrífuga de agua, y un generador eléctrico electromecánico.

Su importancia está fundamentada para en el uso académico para estudiantes de grado o posgrado dentro del proyecto ERASMUS del año 2024 asociado a laboratorios remotos para cumplir una de sus tres acciones claves, la cooperación entre organizaciones e instituciones (European Union, 2023).

Este sistema demostrativo bomba-turbina responde a la necesidad de adquirir experiencia directa con el sistema de generación de energía hidroeléctrica a escala micro para potenciar las competencias técnicas y preparación laboral de profesionales en desarrollo o profesionales con experticia en la carrera de ingeniería mecánica o afines.

La meta planteada es desarrollar un diseño óptimo del sistema de almacenamiento por bombeo y generación hidroeléctrica, asegurando un flujo continuo de agua para la producción de 1 kW de potencia por un tiempo estimado de 5-10 minutos. Por lo tanto, se deberá seleccionar adecuadamente cada pieza para maximizar la eficiencia y la durabilidad del sistema. Adicionalmente, se evaluará el funcionamiento del sistema bajo el criterio ingenieril del diseño mecánico mediante cálculos en base a la teoría otorgada por el área de mecánica de fluidos, donde luego se procederá a realizar simulaciones del sistema. Finalmente, se desarrollará el diseño del diagrama unifilar eléctrico para el sistema de control del módulo demostrativo como parte de la primera fase de este proyecto que es la que se abarcará en este documento.

## **1.2 Descripción del problema**

En el contexto educativo de la ESPOL, en el Campus Gustavo Galindo, se ha identificado la necesidad de implementar un sistema demostrativo de bomba-turbina de un kilovatio de potencia dentro del programa del European Region Action Scheme for the Mobility of University Students (ERASMUS) del año 2024 con el fin de alcanzar una de sus tres acciones clave que es la cooperación entre organizaciones e instituciones, con objeto de permitir a los estudiantes y profesionales de ingeniería mecánica o de carreras afines realizar prácticas en tiempo real, de manera remota y obtener un aprendizaje práctico de las materias como Mecánica de fluidos, Turbomaquinarias y Mantenimiento industrial; garantizando la calidad del aprendizaje en el enfoque de Diseño de sistemas termofluidos y Mantenimiento Industrial de la carrera de Ingeniería mecánica, logrando el desarrollo de habilidades duras necesarias para la industria.

## **1.3 Justificación del problema**

El acceso a la educación es un derecho fundamental y un pilar para el desarrollo sostenible, como lo refleja el Objetivo de Desarrollo Sostenible 4. En la ESPOL, la propuesta de implementar un sistema demostrativo bomba-turbina dentro del proyecto ERASMUS 2024 responde a la necesidad de un aprendizaje práctico y accesible. Este sistema permitirá a los estudiantes y profesionales aplicar conocimientos teóricos en un contexto real y desde cualquier lugar, gracias a su accesibilidad remota. Además, la experiencia directa con el sistema enriquecerá sus competencias técnicas y preparación laboral, vital para el progreso industrial y la sostenibilidad.

La relevancia de este proyecto se manifiesta en su potencial para abordar la interconexión entre la industria y academia, proporcionando una plataforma interactiva y de fácil acceso, donde los futuros profesionales podrán familiarizarse con procesos de industria, ya que este tipo de entornos facilitan el proceso de adaptación y mejoran el desempeño preparándolos contra eventos similares dentro de su vida laboral.

## **1.4 Objetivos**

### ***1.4.1 Objetivo general***

Diseñar un sistema demostrativo Bomba-Turbina de un kilovatio de potencia en el campus Gustavo Galindo con almacenamiento por bombeo.

### ***1.4.2 Objetivos específicos***

1. Desarrollar un diseño óptimo del sistema de almacenamiento por bombeo y generación hidroeléctrica, asegurando un flujo continuo de agua para la producción de 1 kW de potencia por un tiempo estimado de 5-10 minutos.
2. Dimensionar adecuadamente la bomba y tuberías necesarias para maximizar la eficiencia y la durabilidad del sistema.
3. Realizar simulaciones para la evaluación del funcionamiento del sistema hidroeléctrico bajo condiciones operativas.
4. Diseñar un diagrama unifilar eléctrico para el sistema de control de los laboratorios remotos, asegurando una entrega eficiente y segura de la energía generada.

## ***1.5 Marco teórico***

### ***1.5.1 La educación superior en Ecuador***

En el Ecuador, desde el año 2016 hasta el año 2022 ha habido un incremento del 30,27 % hasta el 40,88 % en matrículas académicas en instituciones de tercer nivel, lo que evidencia que cada vez es necesario que existan alternativas para el aprendizaje en los campos de la ingeniería y que de esta manera los estudiantes tengan acceso a sistemas demostrativos controlados con el fin de que puedan poner en práctica los conocimientos adquiridos en las aulas.

En las carreras como la ingeniería mecánica y mecatrónica, las cuales se encuentran beneficiadas con este proyecto integrador, en el primer semestre del año 2022 la aceptación de cupos a nivel nacional fue de 709 y 509 personas respectivamente. El número de Instituciones de

Educación Superior (IES) que ofrecen las carreras mencionadas son 11 para ingeniería mecánica, donde 9 son públicas, 1 particular autofinanciada y 1 particular cofinanciada; asimismo, las IES que ofrecen la carrera de ingeniería mecatrónica son 10, donde 5 son públicas, 3 particulares autofinanciadas y 2 particulares cofinanciadas (SENESCYT, 2024).

De acuerdo con la Ley Orgánica de Educación Superior, su artículo 93 señala como principio de calidad la búsqueda continua autorreflexiva del mejoramiento y el aseguramiento de la construcción colectiva de una cultura que beneficia al país. Esta ley es la que se encarga de regular el sistema de educación superior, incluyendo a los organismos e instituciones que la componen (LOES, 2018).

En este contexto, las universidades, escuelas politécnicas e institutos superiores tecnológicos de Ecuador, se comprometen a un verdadero compromiso por mejorar de manera continua la calidad de sus procesos y resultados, cumpliendo con la legislación vigente, para enfrentar los desafíos del país. De acuerdo con el artículo 352 de la Constitución de la República del Ecuador de 2008, el sistema de educación superior estará compuesto por instituciones debidamente acreditadas y evaluadas, un proceso esencial para garantizar una educación de calidad académica (Rivera G. *et al*, 2017).

En términos de relevancia social como mejora en la calidad de la educación, Orozco E. *et al*. (2020) señalan que las instituciones de educación superior desempeñan un papel importante en el proceso para la adquisición y desarrollo de las competencias de los estudiantes, los cuales se alinean claramente con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la Agenda 2030, los cuales comprenden:

- ODS 4: Garantizar una educación inclusiva, equitativa y de calidad, y promover oportunidades de aprendizaje durante toda la vida para todos.
- ODS 7: Energía asequible y no contaminante.
- ODS 9: Construir infraestructuras resilientes para fomentar la industrialización inclusiva y sostenible de la mano con la innovación.

Orozco E. *et al.* (2020) argumentan que, para ayudar a alcanzar los demás Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), las instituciones educativas deben implementar proyectos concretos que incluyan actividades de formación, investigación, innovación y vinculación social. Estos proyectos deben tener un enfoque multidisciplinario y estar en línea con las áreas académicas de las instituciones, integrados en su modelo educativo y reflejados en el syllabus de sus programas de pregrado y posgrado.

### ***1.5.2 Proyecto Erasmus***

Erasmus+ ha sido el programa de la Unión Europea (UE) para la educación, formación, juventud y deporte desde el periodo 2021-2027, brindando apoyo tanto a personas como a organizaciones. Considerado un éxito significativo de la UE, el modelo se basa en 35 años de programas europeos, los cuales fomenta la movilidad y la cooperación internacional. Este programa se centra en áreas claves que promueven el desarrollo personal y profesional, ofreciendo educación inclusiva y de alta calidad, apoyando el aprendizaje formal, e informal. Además, sus prioridades principales son la inclusión, la digitalización, la sostenibilidad ambiental y la participación democrática.

Este programa beneficia a personas de toda Europa, proporcionando experiencias que transforman vidas y mejoran el desarrollo profesional, social, educativo y personal. Busca ser más inclusivo, aumentando la participación de grupos de difícil acceso y fortaleciendo pequeñas organizaciones comunitarias. Erasmus+ ayuda a cerrar brechas de conocimiento y habilidades, fomentando la innovación y la competitividad empresarial. El programa también promueve la movilidad sostenible y comportamientos ecológicos. Además, facilita la cooperación transnacional, mejorando competencias clave, reduciendo el abandono escolar y reconociendo competencias adquiridas. La movilidad es esencial para el entendimiento cultural y el aprendizaje de nuevas pedagogías.

Finalmente, según el reporte anual del 2023, Erasmus+ se implementa principalmente a través de agencias nacionales y algunas organizaciones internacionales, beneficiando tanto a individuos como a la sociedad en su conjunto al mejorar la empleabilidad, la confianza, la innovación y promover una ciudadanía activa y una identidad europea fuerte (European Union, 2023).

### ***1.5.3 Sistemas demostrativos***

Según Macias C. *et al.* (2018), el sistema micro hidráulico sirve como un modelo experimental utilizado para verificar la eficiencia de sistemas de bombeo y producción energética. Además, permite evaluar el desempeño y definir las especificaciones técnicas de las turbinas hidráulicas requeridas.

Los sistemas demostrativos mejoran el proceso de aprendizaje en estudiantes y profesionales al fomentar el desarrollo del conocimiento teórico en aplicaciones industriales. Al igual que las clases prácticas en la ESPOL, que promueven el aprendizaje activo y el desarrollo de habilidades duras, estos sistemas crean entornos de interacción directa con la aplicación del conocimiento, potenciando las competencias de los profesionales en entornos industriales.

En la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), contamos con una variedad de sistemas demostrativos que nos permiten reforzar los conocimientos adquiridos en las materias de mecánica de fluidos y turbomaquinaria. Estos sistemas, utilizados como bancos de pruebas, nos ayudan a describir y predecir el comportamiento de componentes clave bajo diferentes condiciones de operación. Entre estos componentes se incluyen turbinas (Pelton y Francis), bombas centrífugas, compresores, calderas, intercambiadores de calor, motores de combustión interna y ventiladores. Sin embargo, es importante destacar que ninguno de estos sistemas es controlado remotamente.

Los sistemas demostrativos del laboratorio de Termofluidos y Refrigeración abarcan varias marcas reconocidas. Por ejemplo, los sistemas hidráulicos de bombas y turbinas de la marca Gilkes

permiten tomar datos de caudal, velocidades del fluido, revoluciones de los motores, potencia mecánica, cabezales, entre otros parámetros. Los sistemas de ventilación de la marca Armfield se utilizan para analizar valores de presión estática, presión dinámica y potencia de los ventiladores. Además, el laboratorio cuenta con una caldera de 10 Bar de la marca Thompson, conectada a un supercalentador Numay. Este sistema transmite energía a una turbina de vapor que a su vez se conecta a un generador eléctrico marca Scott.

Asimismo, se encuentran sistemas demostrativos con compresores, como el equipo de aire acondicionado didáctico Carrier y un compresor de aire de primera etapa marca Gilkes. También se dispone de sistemas de motores de combustión interna, donde se registran datos de potencia mecánica, torque y velocidad angular.

Como parte del compromiso con la mejora continua de la infraestructura académica y la implementación de alternativas de aprendizaje innovadoras, el diseño de un sistema demostrativo bomba-turbina de un kilovatio de potencia asociado a laboratorios remotos representa un avance significativo en la calidad de la educación brindada por la institución. Este sistema combina la teoría con el proceso real de generación hidroeléctrica a una escala micro, proporcionando una experiencia educativa integral y práctica.

#### ***1.5.3.1 Sistemas de control de módulos demostrativos hidráulicos***

El sistema de control en un banco de pruebas hidráulico consiste en un conjunto de subsistemas coordinados de trabajo y que se encuentran físicamente alrededor de las instalaciones de este módulo de pruebas. El objetivo de tener un sistema de control es monitorear y controlar a todos los subsistemas y además suministrar una interfaz de usuario uniforme.

El sistema de control puede estar formado en cuanto a su arquitectura física por computadores, equipos electrónicos, sensores y actuadores conectados que darán seguimiento al control directo de todos los subsistemas del banco de pruebas hidráulico (D'sousa C., 2022).

#### 1.5.4 Propiedades de los fluidos

Para describir el comportamiento de los fluidos en el tipo de sistema estudiado, es necesario tener conocimiento de algunas propiedades intensivas y extensivas que serán utilizadas para este proyecto, tales como: la densidad, gravedad específica, peso específico, viscosidad, entre otras importantes para la descripción de las características que tienen los fluidos.

Es necesario mencionar las asunciones pertinentes para la definición correcta del modelo con el que se aproximarán los resultados esperados del sistema. El medio continuo es uno de los supuestos importantes para las propiedades de los fluidos, ya que facilita los cálculos del movimiento de un fluido en el espacio al asumir que el medio es continuo en todo su volumen, es decir, este no presenta huecos a nivel molecular y todo su espacio se encuentra lleno como un todo continuo. Partiendo de este supuesto, podemos definir las propiedades que describen el comportamiento de la mayoría de los fluidos y en especial el movimiento del caso que estudiaremos.

**La densidad  $\rho$  (rho)**, hace referencia a la masa de una fracción de fluido contenida en cierto volumen, tiene unidades de  $kg/m^3$  y lo describe la siguiente ecuación:

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

Donde  $m$  es la masa en (kg) y  $V$  el volumen en ( $m^3$ ).

**El peso específico  $\gamma$  (gamma)**, que es la fuerza gravitacional por unidad de volumen de fluido, tiene unidades de  $N/m^3$  y está descrito por la ecuación:

$$\gamma = \rho g \quad (2)$$

**La gravedad específica  $S$**  es también una cantidad adimensional muy estudiada en el área de mecánica de fluidos, hace referencia a la razón entre el peso específico o la densidad de una sustancia con otra estandarizada. Como ejemplo de sustancia estándar, tenemos el agua a presión atmosférica y a  $4^\circ C$  de temperatura.

$$S = \frac{\rho}{\rho_w} = \frac{\gamma}{\gamma_w} \quad (3)$$

**La viscosidad** es otra propiedad que describe el movimiento de los fluidos, podemos hacer referencia al movimiento de un aceite sobre una superficie en comparación con el agua, nuestra intuición nos indica que el aceite tiende a moverse con mayor dificultad o menor fluidez, esta propiedad es común en los líquidos y describe la resistencia de un fluido a fluir. Existen dos tipos; viscosidad dinámica  $\mu$  (mu) sus unidades son de  $N \cdot s/m^2$  y cinemática  $\nu$  (nu) con unidades de  $m^2/s$ . Es importante mencionar que esta propiedad es dependiente de la temperatura, es decir, cambiará el comportamiento del fluido con los cambios de temperatura.

Por otro lado, para entender la teoría que subyace en esta propiedad debemos describir los conceptos de esfuerzo cortante y deformación angular provenientes de mecánica de sólidos. El esfuerzo cortante  $\tau$  (tau), no es más que la razón de la fuerza por unidad de área en una superficie, siendo esta fuerza paralela al área. La deformación angular en cambio, nos indica el cambio angular de un trozo de fluido imaginando una línea vertical a través de dos superficies paralelas durante un periodo de tiempo (Clayton T. Crowe *et al*, 2009).

A diferencia de los sólidos, en los fluidos la deformación angular tiende a mantenerse, podemos imaginar esta situación suponiendo que un pedazo del fluido lo puedo describir en trozos más pequeños que tomando en consideración el fluido entre dos placas, donde una es fija y la otra móvil y a esta última le aplicamos una fuerza P, entonces estos trozos de fluido pueden deformarse tomando la forma de un paralelogramo y manteniendo esta forma hasta la placa fija (R.C. Hibbeler, 2018).

Sin embargo, las partículas o “elementos” de fluido en la placa fija estarán en reposo, mientras que en la placa móvil debido al esfuerzo cortante los elementos de fluido tenderán a moverse con la misma velocidad de la placa y entre estas se desarrolla un gradiente de velocidad particular.

Considerando las suposiciones adecuadas para el correcto desarrollo del modelo del sistema, es necesario tomar en cuenta que existe una clasificación para los fluidos; entre ellos están los compresibles e incompresibles, en este caso trataremos con un líquido incompresible y particularmente un fluido newtoniano, por lo que para la viscosidad utilizamos la condición de no deslizamiento. Por esto, la fórmula para el esfuerzo cortante es la siguiente:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy} \quad (4)$$

Donde  $\mu$  ( $\mu$ ) representa la viscosidad dinámica, y  $\frac{du}{dy}$  el gradiente de velocidad.

Asimismo, según la ley de Newton permite expresar la viscosidad cinemática de la siguiente manera:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (5)$$

La presión es otra de las propiedades necesaria en hidrostática y según (Yunus A. Cengel & John M. Cimbala, 2010) se define como la fuerza normal ejercida por un fluido por unidad de área y se mide en pascales ( $Pa$  o  $N/m^2$ ). La presión absoluta no es más que la suma entre la presión manométrica y la presión atmosférica. La presión atmosférica varía con la ubicación en la corteza terrestre en relación con la altura con respecto al nivel del mar y los cambios de temperatura, pero en este caso de estudio utilizamos el valor teórico de 101325 pascales. En cambio, la presión manométrica la gobierna la siguiente expresión:

$$P_{man} = \rho gh \quad (6)$$

Donde  $\rho$  es la densidad,  $g$  la gravedad y  $h$  la altura.

También haremos uso de la presión de vaporización comúnmente utilizada en termodinámica, ya que nos permitirá calcular la carga de aspiración neta positiva para evitar cavitación en la bomba seleccionada.

### 1.5.5 Ecuación de la Energía y Bernoulli

Generalmente en mecánica de fluidos se conocen las leyes de conservación tanto para la masa y la energía, ya que estas dos cantidades son entidades de la misma naturaleza según los descubrimientos de Albert Einstein con su famosa fórmula  $E = mc^2$  (Yunus A. Cengel & John M. Cimbala, 2010).

En relación con el sistema estudiado previamente, reducimos el balance de energía para el caso especial donde el flujo del fluido es estacionario e incompresible, para obtener la siguiente expresión:

$$Q_{entrada} = Q_{salida} \quad (7)$$

Donde  $Q$  es el flujo volumétrico o “caudal” del fluido en  $m^3/s$ , expresado por:

$$Q = u_p \cdot A_t \quad (8)$$

Con  $u$  que es la velocidad promedio del fluido multiplicado por  $A_t$  que es el área de la sección transversal del ducto.

Basándonos en el principio de conservación de la masa para un volumen de control donde el cambio neto de la masa dentro de este volumen de control es igual a cero, nos indica que la masa entrante es igual a la saliente (Yunus A. Cengel & John M. Cimbala, 2010).

Partiendo de:

$$\frac{dm_{vc}}{dt} = \dot{m}_e - \dot{m}_s \quad (9)$$

Donde  $\dot{m}_e$  y  $\dot{m}_s$  son los flujos masicos a la entrada y a la salida respectivamente;  $\frac{dm_{vc}}{dt}$  es la razón de cambio de la masa con respecto al tiempo del volumen de control para un sistema dado. Concluimos que en el caso mencionado nos da como resultado la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \dot{m}_e - \dot{m}_s &= 0 \\ \dot{m}_e = \dot{m}_s &= \rho u_p A_t \end{aligned}$$

Organizando la expresión anterior con la ecuación 16, obtenemos la ecuación **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** en términos del flujo masico expresado a continuación.

$$\begin{aligned}\dot{m}_e &= \dot{m}_s \\ u_{pe}A_{te} &= u_{ps}A_{ts}\end{aligned}$$

A continuación, presentaremos la forma reducida de la ecuación de la energía para el sistema tratado:

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + h_p = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_t + h_L \quad (10)$$

Reduciendo la ecuación 10, en donde no se toma en cuenta los cabezales de perdidas por fricción, ni los cabezales de bomba y turbina queda expresada la ecuación de Bernoulli:

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 \quad (11)$$

### 1.5.6 Flujo en tuberías

Para describir el flujo en tuberías, hacemos uso de los fundamentos teóricos descritos en la sección anterior. Según Clayton T. Crowe *et al.* (2009) predecir las perdidas por cabezal involucra clasificar los fluidos en laminar y turbulento para luego, mediante fórmulas, hacer el cálculo de las perdidas por cabezal y perdidas menores de los accesorios. Para poder realizar estas predicciones debemos introducir una cantidad adimensional llamada número de Reynolds que se calcula mediante la siguiente expresión:

$$Re = \frac{\rho u_p D}{\mu} \quad (12)$$

Donde  $\rho$  es la densidad del fluido,  $u_p$  es la velocidad promedio,  $D$  el diámetro de la tubería, y  $\mu$  la viscosidad dinámica del fluido. Esta cantidad nos ayuda a predecir el comportamiento de los fluidos mediante un rango de valores que establecen si un fluido es laminar o turbulento en un ducto.

Según (Clayton T. Crowe *et al.*, 2009) la clasificación es:

$Re \leq 2000$	<i>flujo laminar</i>
$2000 \leq Re \leq 3000$	<i>zona de cambio</i>
$Re \geq 3000$	<i>flujo turbulento</i>

Sin embargo, este rango está propenso a variaciones con diferentes geometrías para el ducto y la rugosidad de la superficie. La mayoría de los casos que se analizan se enfocan en flujo laminar y turbulento con un flujo completamente desarrollado. Esto, con el fin de aplicar la ecuación de Darcey-Weisbach para el cálculo de cabezal de pérdidas por fricción (Frank M. White, 2011).

$$hf = f \frac{L}{D} \frac{u_p^2}{2g} \quad (13)$$

Donde  $f$  es el factor fricción de Darcey-Weisbach el cual se obtiene del diagrama de Moody o por aproximaciones como la ecuación de Colebrook-White,  $L$  la longitud total de la tubería del sistema,  $D$  el diámetro de la tubería,  $u_p$  la velocidad promedio del fluido y  $g$  la fuerza gravitacional.

### ***1.5.7 Turbomaquinaria***

En el texto *Fundamentals of Fluid Mechanics* de Munson *et al.* (2013), explica que las turbomáquinas son máquinas dinámicas de fluidos que añaden energía de flujo (en el caso de las bombas) o extraen energía de flujo (en el caso de las turbinas).

Las turbomáquinas están compuestas por una colección de aspas, cubos, canales de flujo o pasajes dispuestos alrededor de un eje de rotación para formar un rotor. Cuando un fluido en movimiento interactúa con estas estructuras, se puede forzar la rotación del rotor y producir potencia de eje. En el caso de una turbina, el fluido impulsa la rotación. Por otro lado, si se aplica un torque de eje, generalmente mediante un motor, y se utilizan las aspas, canales de flujo o pasajes, se puede forzar al fluido a moverse.

Las turbomáquinas tienen una presencia significativa en numerosas aplicaciones cotidianas, siendo fundamentales para la sociedad actual. Se caracterizan por su capacidad de

transferir una cantidad considerable de energía en comparación con su tamaño, diseño con un número limitado de componentes móviles, y su eficacia adecuada.

### ***1.5.8 Generación hidroeléctrica a escala micro***

Las aguas contenidas en lagos, embalses o reservorios a una altitud considerable, así como las corrientes fluviales, poseen energía potencial o cinética. A esta energía generada por el agua se le conoce como fuerza hidráulica. Los métodos de producción de electricidad que utilizan la fuerza hidráulica para generar energía eléctrica se denominan generación hidroeléctrica.

Las centrales hidroeléctricas utilizan turbinas y generadores que son impulsados por la fuerza del agua para producir electricidad. En este proceso de conversión de energía, la fuerza del agua se transforma inicialmente en energía mecánica, que luego se convierte en energía eléctrica. Sin embargo, es importante señalar que hay cierta pérdida de energía debido al funcionamiento de la turbina y el generador.

La capacidad de generación eléctrica, conocida como potencia de salida, se refiere a la cantidad de energía eléctrica producida. Al operar de manera continua una potencia “P” medido en (KW) durante un periodo de “t” (horas), se produce una cantidad de energía eléctrica, la cual se mide en kilovatios hora (KWh) y se conoce como energía generada (Japan International Cooperation Agency, 2011).

Por lo tanto, como lo menciona Peña L. y Fariñas E. (2020), se denomina escala micro a la capacidad de generación eléctrica entre el rango de 1 a 50 kilovatios según la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE).

## **Capítulo 2**

## **2. Metodología**

### **2.1 Metodología de la investigación**

En el presente proyecto se empleó la metodología de: la investigación o diseño experimental que conlleva un análisis mixto, es decir cualitativo y cuantitativo. Requiere un proceso que “somete a un objeto o grupo de individuos en determinadas condiciones, estímulos o tratamiento (variable independiente), con el fin de observar los efectos o reacciones que producen (variable dependiente)” (Fidias G. Arias, 2012, p.34). Además, se demostró la relación causa-efecto entre las variables con la manipulación y control de estas y con las restricciones del sistema para desarrollar un diseño experimental puro. A este diseño se lo denominó como experimental puro ya que cumple con la primicia de que se deben controlar todos los factores que intervienen en el proceso que puedan causar alguna variación (Fidias G. Arias, 2012).

### **2.2 Diseño conceptual**

Para el diseño de este sistema se utilizaron dispositivos de tipo dinámico, también conocidos como turbomáquinas, ya que involucran el movimiento del fluido a través de rotores o aspas giratorias que añaden o quitan energía al fluido, siendo estas fundamentales en distintas aplicaciones industriales como la generación de energía y el bombeo de fluidos (Clayton T. Crowe *et al*, 2009).

Este diseño se basó en la teoría descrita anteriormente, partiendo del hidro generador, el cual extrae la energía del fluido a través de la turbina y la transfiere a un generador por un eje para la obtención de la potencia eléctrica requerida. Aunque en ingeniería realizamos estudios ideales sobre la energía, es importante tener en cuenta las pérdidas que limitan la cantidad de energía obtenida en un proceso ingenieril. Por ello, tomamos en cuenta la eficiencia de los dispositivos seleccionados, eligiendo la más favorable para el correcto desempeño del sistema. Esta máquina requiere de ciertos parámetros esenciales para la correcta descripción del fenómeno en el sistema, siendo estos el cabezal, el caudal y el tiempo requerido para el funcionamiento del sistema.

Con estos parámetros se diseñaron 3 alternativas que se enfocaron en optimizar el funcionamiento del sistema y minimizar los costos de construcción.

En estos diseños, se seleccionó la bomba, tanques y los accesorios del sistema para asegurar un flujo continuo. Este proceso de selección se basó en la teoría de flujo a través de tuberías, la ecuación de energía y Bernoulli, considerando factores como los cabezales de bomba y turbina, pérdidas por fricción, pérdidas menores en accesorios y la caída de presión. También, cabe mencionar que los parámetros necesarios para la correcta selección de la bomba incluyeron el cálculo de la carga de succión neta positiva (NPSH) para evitar problemas de cavitación.

### 2.2.1 Lista de Requerimientos

La lista de requerimientos se realizó para establecer los resultados esperados para el diseño del sistema permitiendo satisfacer las necesidades planteadas como objetivos generales y específicos del proyecto. A continuación, en la Tabla 1 se puede observar la lista mencionada.

**Tabla 1**

*Lista de requerimientos*

<b>Proyecto: Diseño de un sistema demostrativo Bomba-Turbina de un kilovatio de potencia en la ESPOL.</b>			
<b>Cliente: CDTS</b>			
<b>Características</b>	<b>E: Exigencia D: Deseo</b>	<b>Requerimientos</b>	<b>Responsable</b>
<b>Función Principal</b>	E	Micro generación hidroeléctrica con producción de 1 kW de potencia eléctrica por un tiempo estimado de 5-10 minutos	Sebastián Arias, Diego Vallejo
<b>Cinemática</b>	E	Micro generación hidroeléctrica asegurando un flujo continuo de agua	Sebastián Arias, Diego Vallejo
<b>Dimensiones</b>	E	Diseñar el sistema considerando el dimensionamiento y	

		selección de los materiales estandarizados en el mercado (tuberías, accesorios, tanques y turbomáquinas)	Sebastián Arias, Diego Vallejo
<b>Fabricación</b>	E	El sistema debe construirse en los alrededores de las instalaciones del CDTS de ESPOL	Sebastián Arias, Diego Vallejo
	D	Los materiales y componentes usados en el sistema demostrativo deben estar disponibles en el mercado nacional	Sebastián Arias, Diego Vallejo
	E	El sistema debe estar diseñado para construirlo con tubos de PVC y accesorios electrónicos que permitan su control de manera remota	Sebastián Arias, Diego Vallejo
<b>Señal</b>	E	El sistema demostrativo debe estar asociado a laboratorios remotos para su operación	Sebastián Arias, Diego Vallejo
<b>Montaje</b>	D	Los componentes del sistema deben ser de fácil montaje	Sebastián Arias, Diego Vallejo
<b>Costo</b>	D	El sistema debe considerar el ahorro en materiales de construcción por lo que se debe encontrar el diseño óptimo para reducir costos	Sebastián Arias, Diego Vallejo
<b>Terreno</b>	D	La zona del montaje del sistema debe estar limpia de vegetación y ser estable	Sebastián Arias, Diego Vallejo

*Nota.* Requerimientos conversados con el cliente para la correcta definición de los resultados esperados del sistema. Fuente: Elaboración propia.

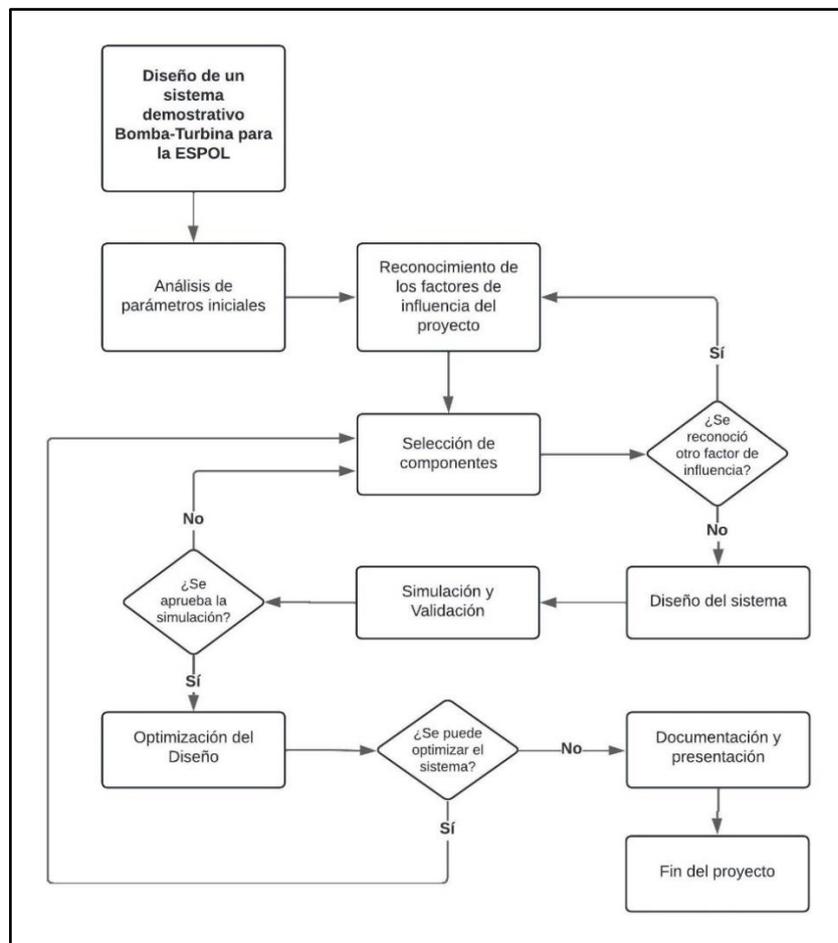
### 2.2.2 Metodología del diseño

Según Clive L. Dym, *et al.* (2014) la metodología de diseño para un modelo descriptivo simple se define mediante tres fases: generación, evaluación y comunicación las cuales se presentan en un diagrama de flujo en la Figura 1. En la etapa de generación se analizaron los parámetros iniciales y factores de influencia para desarrollar una selección de componentes para varios conceptos de diseño, luego estos conceptos fueron evaluados por medio de matrices de selección que involucran un diseño óptimo para el sistema cumpliendo los requerimientos. Por

último, en la fase de comunicación se presentaron los diseños seleccionados para tomar la decisión de la mejor alternativa.

**Figura 1**

*Diagrama de flujo del proyecto*



*Nota.* Esquema de la metodología del proyecto. Fuente: Elaboración propia.

## 2.3 Alternativas de diseño

### 2.3.1 Matriz de decisión

La selección de la opción óptima entre varias soluciones viables de un proceso de toma de decisiones es llevada a cabo por uno o más individuos donde un enfoque tradicional postula la existencia de restricciones determinadas por las limitaciones de recursos disponibles, donde el denominado conjunto factible o alcanzable lo determinan los valores de las variables de decisión

que satisfacen estas restricciones (Bernal R. y Niño D., 2018). De acuerdo con esta afirmación, se desarrolló una matriz de decisión en la cual se presentan las opciones de solución como se puede observar en la Tabla 2.

**Tabla 2**

*Matriz de decisión*

<b>Matriz de decisión del diseño de un sistema demostrativo Bomba-Turbina de un kilovatio de potencia en la ESPOL.</b>		<b>Alternativas</b>		
<b>Función Principal</b>	<b>Función Parcial</b>	<b>X</b>	<b>Y</b>	<b>Z</b>
Almacenamiento	Almacenamiento de agua para recirculación	 Tanque metálico	 Tanque plástico 	 Cisterna
		 Torre metálica 	 A nivel del piso 	 Losas del CDTs 
Bombeo de agua	Bombeo de agua para recirculación de agua entre tanques de almacenamiento	 Bomba centrífuga de alto flujo 	 Bomba centrífuga birodete	 Bomba centrífuga autocebante

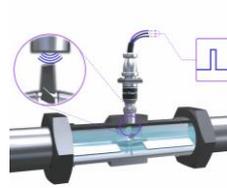
Energizar	Energizar sistema de bombeo			
		Sistema eléctrico	Generador solar	Generador a diesel
				
Piping del sistema	Conducto para transportar fluido			
		Tubería de cobre	Tubería galvanizada	Tubería de PVC
				
Permitir el paso de flujo y Regular flujo	Regular flujo antes de la turbina y bomba de agua			
		Válvula compuerta manual	Electroválvula solenoide	Regulador de flujo
				
Controladores	Controlar las válvulas que permiten el paso del fluido			
		PLC LOGO	PLC 1200	PLC Snaider
				
Generación de potencia eléctrica	Generar potencia para conectar diferentes cargas al sistema		NA	NA
		Turbina Turgo		
				

Instrumentación para medir el flujo

Transductor de caudal (flujómetro)



De ultrasonido



De turbina



Electromagnético



Instrumentación para medir presión

Transductor de presión



De alta precisión



De presión diferencial



Manómetro analógico

---

*Nota.* Dispositivos de industria nacional e internacional. Fuente: Elaboración propia.

Alternativa 1:



Alternativa 2:



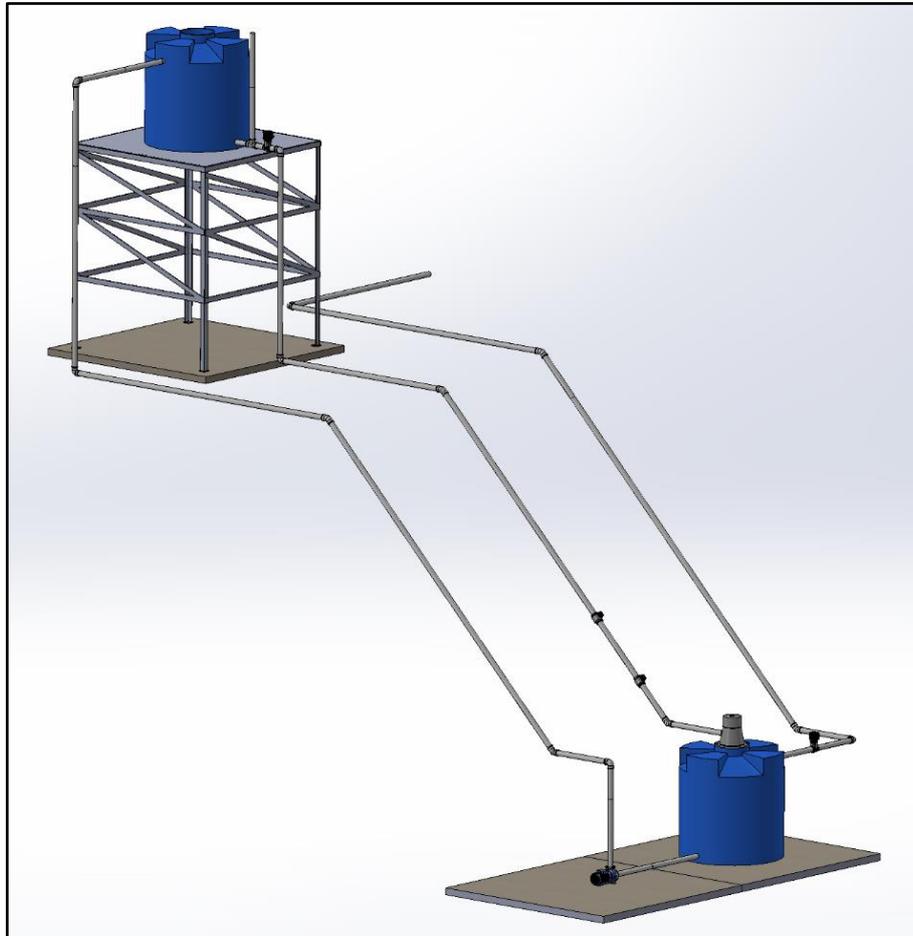
Alternativa 3:



### 2.3.2 Alternativa 1

**Figura 2**

*Diseño conceptual de la alternativa 1 en SolidWorks 2022 SP5.0*



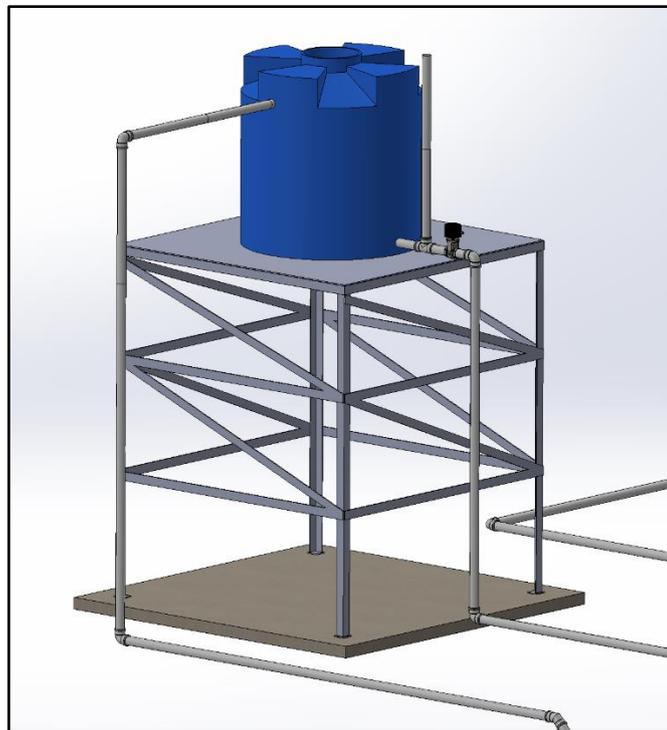
*Nota.* Fuente: Elaboración propia.

En el concepto de solución de la figura 1, el aporte de flujo para el correcto funcionamiento del sistema se utilizaron 2 reservorios de 1100 litros, adicionalmente por seguridad del sistema en casos inesperados de fugas de agua se conectó una línea a una toma de agua convencional. El aporte de energía eléctrica para la bomba, electroválvulas y transductores de presión y caudal se lo realizó con una conexión a 220 V. En la salida del tanque superior se integró un aireador para extraer aire acumulado y mejorar la fluidez, este aire generalmente queda atrapado en las tuberías produciendo vacíos y generando un flujo extremadamente turbulento debido a vórtices de aire en las cavidades de la tubería. Se incluyeron electroválvulas a la salida del tanque superior y a la

entrada de la línea de seguridad que va al tanque inferior para el correcto control del flujo. En la línea de descarga hacia el hidro generador como se puede observar en la figura 4, se utilizaron dos transductores analógicos uno de alta precisión para la lectura de presión y un flujómetro de ultrasonido que mide el caudal, evitando conexiones en las tuberías que interrumpen el flujo y generan alta turbulencia. Además, se utilizó un hidro generador con turbina tipo Turgo para la generación de energía. Por otro lado, para la línea de bombeo se escogió por catálogo una bomba Pedrollo HFm6A de alto flujo de 3 hp de potencia, el cual entregó un correcto caudal y altura para el sistema.

### **Figura 3**

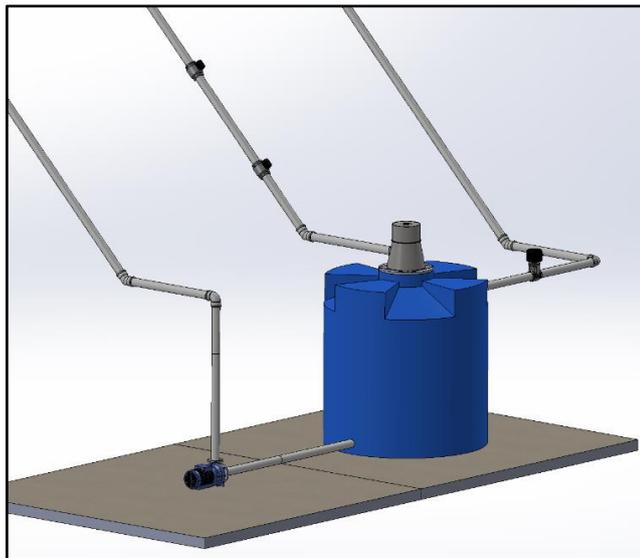
*Diseño conceptual de la alternativa 1 – tanque elevado en SolidWorks 2022 SP5.0*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia.

#### **Figura 4**

*Diseño conceptual de la alternativa 1 – tanque del depósito en SolidWorks 2022 SP5.0*

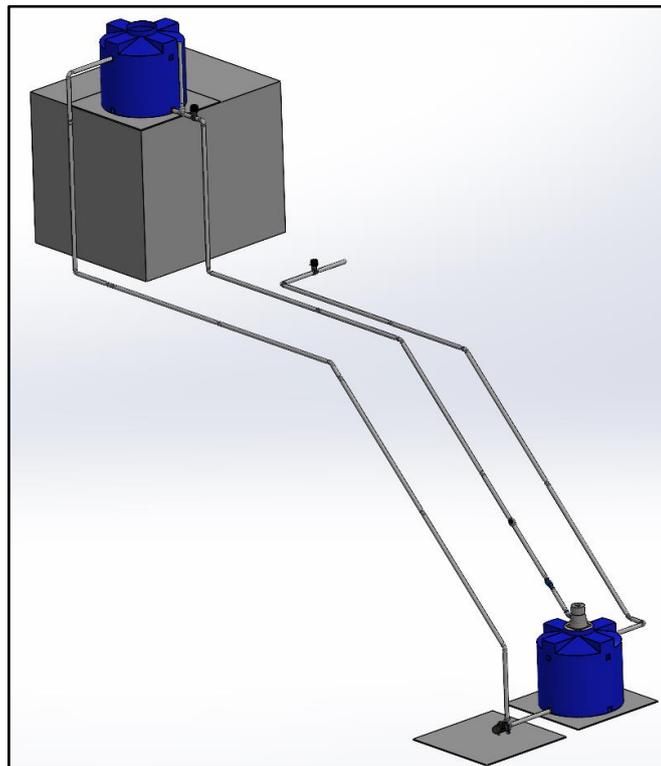


*Nota.* Fuente: Elaboración propia.

#### **2.3.3 Alternativa 2**

#### **Figura 5**

*Diseño conceptual de la alternativa 2 en SolidWorks 2022 SP5.0*

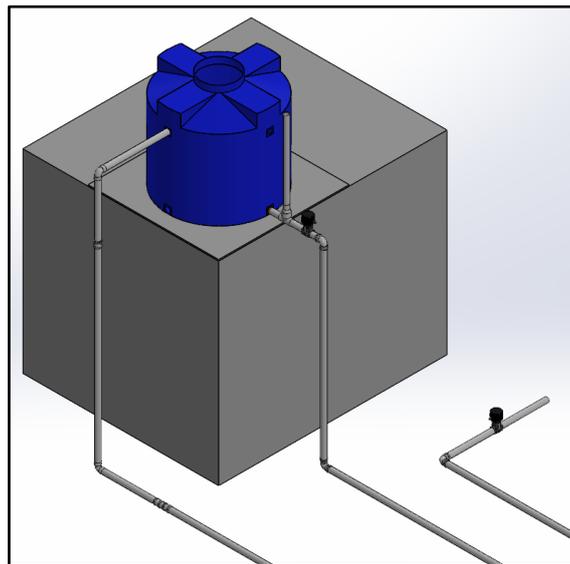


*Nota.* Fuente: Elaboración propia.

El concepto de solución de la Figura 5 pertenece a la alternativa 2 de la matriz de decisión, en la cual se cumplen los requerimientos del cabezal de turbina con ayuda de la losa de la infraestructura del CDTs para elevar el tanque de agua como se puede observar a detalle en la Figura 6. La distribución de las tuberías fue la misma que la de la alternativa 1 con la excepción de que las tuberías utilizadas fueron de acero galvanizado. Asimismo, de acuerdo con la matriz de decisión, se utilizó la instrumentación descrita para monitorear caudal y presión en la línea principal del sistema, que es la cual está conectada con la turbina Turgo y se puede observar en la Figura 7. Además, el sistema cuenta con una línea de seguridad para evitar que el tanque utilizado como depósito de agua turbinada se vacíe, fue considerada para un control mediante sensores de nivel y electroválvulas.

### **Figura 6**

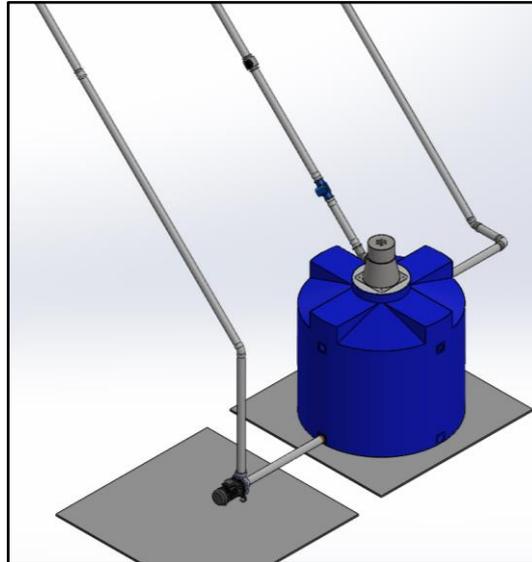
*Diseño conceptual de la alternativa 2 – tanque elevado en SolidWorks 2022 SP5.0*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia.

**Figura 7**

*Diseño conceptual de la alternativa 2 – tanque del depósito en SolidWorks 2022 SP5.0*

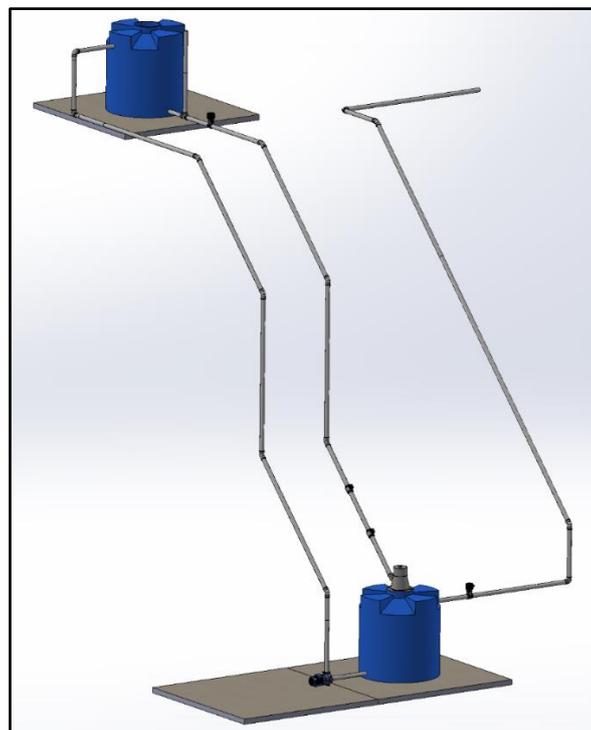


*Nota.* Fuente: Elaboración propia.

**2.3.4 Alternativa 3**

**Figura 8**

*Diseño conceptual de la alternativa 3 en SolidWorks 2022 SP5.0*

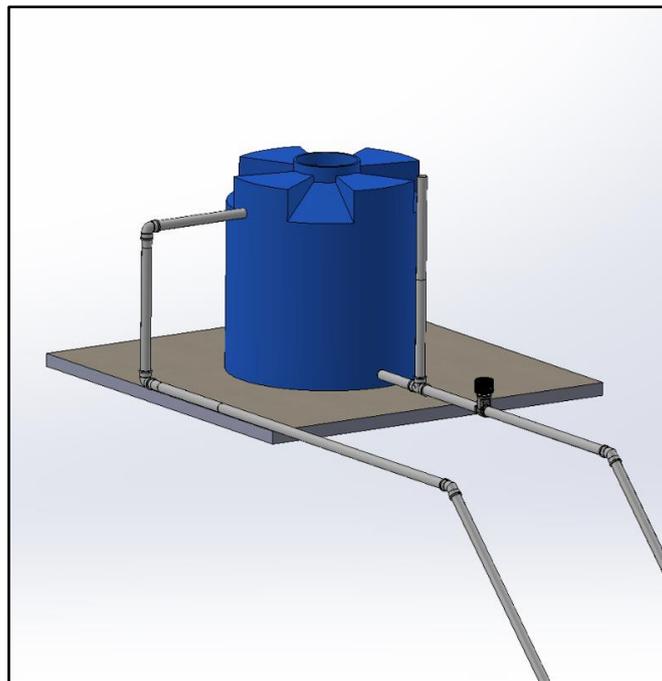


*Nota.* Fuente: Elaboración propia.

La alternativa 3 constó de dos tanques plásticos de 1100 litros, tuberías y accesorios de PVC, electroválvulas, sensores de caudal, presión y nivel al igual que la primera alternativa. Lo particular aquí fue la distribución de la tubería y la disminución del uso de accesorios con mayor pérdida de energía como son los codos de 90°. Esta alternativa de solución se caracterizó por posicionar el tanque de agua que dirige el agua hacia la turbina a nivel del suelo de la infraestructura del CDTS de ESPOL.

**Figura 9**

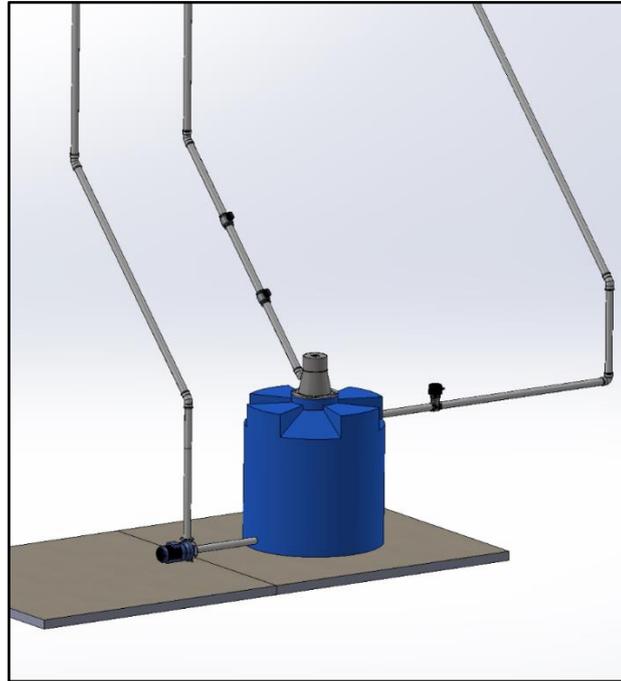
*Diseño conceptual de la alternativa 3 – tanque elevado en SolidWorks 2022 SP5.0*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia.

## Figura 10

*Diseño conceptual de la alternativa 3 – tanque del depósito en SolidWorks 2022 SP5.0*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia.

### 2.4 Selección de la mejor alternativa

Para la selección de la mejor alternativa se empleó el método VDI 2225, el cual facilita la toma de decisiones al identificar la opción más adecuada en función de criterios específicos. Este método evalúa las alternativas de diseño propuestas de acuerdo con una lista de requerimientos previamente elaborada, asegurando que la selección se base en un análisis riguroso y sistemático (Gómez D., 2018). Según el método VDI 2225 se utilizó la siguiente ecuación:

$$Xi = \frac{W_1C_1 + W_2C_2 + \dots + W_jC_j}{(W_1 + W_2 + \dots + W_j)C_{max}} \quad (14)$$

Donde:

$Xi$ : es el valor técnico del proyecto

$C_j$ : es la calificación de las alternativas (0 – 4)

$W_j$ : es el peso ponderado (1 – 10)

**Tabla 3***Evaluación técnica del proyecto*

<b>Evaluación técnica del proyecto</b>								
Proyecto: Diseño de un sistema demostrativo Bomba-Turbina de un kilovatio de potencia en la ESPOL.								
<b>C (Calificación):</b> 0 = No satisface 1 = Casi aceptable 2 = Suficiente 3 = Bien 4 = Muy bien								
<b>W (peso ponderado):</b> del 1 al 10 en función de la importancia; donde 10 es de mucha importancia y 1 muy poca importancia								
<b>Criterios de evaluación para diseños</b>								
		<b>Alternativa 1</b>			<b>Alternativa 2</b>		<b>Alternativa 3</b>	
<b>N°</b>	<b>Criterio de Evaluación</b>	<b>W</b>	<b>C</b>	<b>C*W</b>	<b>C</b>	<b>C*W</b>	<b>C</b>	<b>C*W</b>
<b>1</b>	Función principal	10	4	40	4	40	2	20
<b>2</b>	Cinemática	10	3	30	3	30	3	30
<b>3</b>	Dimensiones	8	4	32	4	32	4	32
<b>4</b>	Fabricación	8	4	32	2	16	4	32
<b>5</b>	Señal	10	4	40	4	40	4	40
<b>6</b>	Montaje	7	3	21	2	14	3	21
<b>7</b>	Costo	10	4	40	3	30	4	40
<b>8</b>	Terreno	9	4	36	4	36	4	36
<b>Puntaje Total</b>		72		271		238		251
<b>Valor Técnico</b>		<b>Xi</b>		0.94		0.83		0.87

*Nota.* Fuente: Elaboración propia.

Para tomar una decisión que satisfaga todos los requerimientos se escogió el valor técnico del proyecto más cercano a 1; tal como se presenta en la Tabla 3, debido a que representa a la alternativa con mejor balance técnico y económico. En este método se deben tomar en cuenta las alternativas con un valor técnico mayor a 0.6, si el valor es menor al mencionado la alternativa se descarta inmediatamente (Castro D. y Guerrero C., 2021).

## 2.5 Diseño detallado

En primer lugar, se recibió el hidro generador con sus especificaciones técnicas obtenidas por el fabricante, se identificó que contiene una microturbina de flujo radial tipo Turgo ideal para

obtener recursos energéticos con cabezales medios y altos. Luego, en base al requerimiento de obtención de potencia eléctrica y tiempo de generación se calculó la potencia hidráulica requerida por el sistema y el volumen de agua necesario. Para mantener un flujo continuo, se optó por mantener la bomba encendida al mismo tiempo que la descarga por la línea de turbinado logrando así el objetivo planteado.

Con los datos podemos hacer el cálculo del cabezal de turbina necesario para obtener la energía y altura requerida por el sistema. Consecuentemente, este cálculo incluye las pérdidas por cabezales de presión y velocidad. Pero, debido a la simplificación del sistema solo se calcularon las pérdidas menores por accesorios y fricción a través del sistema para la obtención de la altura requerida, es decir donde se ubicarán ambos reservorios y las conexiones de las tuberías que pasan por la turbina y la bomba.

### 2.5.1 Cálculos

Como datos del problema se establecieron los siguientes parámetros en la siguiente tabla:

**Tabla 4**

*Datos del proyecto*

<b>Parámetros</b>	<b>Valor</b>
<b>Densidad H2O @ 30°C [kg/m3]</b>	995,71
<b>Viscosidad dinámica @ 30°C [N s/m2]</b>	7,95E-04
<b>Gravedad [m/s2]</b>	9,81
<b>Eficiencia global hidro generador</b>	80%
<b>Rugosidad (€) PVC [mm]</b>	0,003
<b>Longitud total de tubería a la succión de la turbina [m]</b>	27

**Longitud total  
de tubería en la  
línea de la  
bomba**                      27  
**[m]**

*Nota.* Los datos son supuestos para el Campus Gustavo Galindo de la ESPOL en las instalaciones del CDTS. Fuente: Elaboración propia.

Partiendo del requerimiento de potencia eléctrica de 1000 [W] se procedió a calcular la potencia hidráulica requerida en la turbina utilizando una eficiencia global del 80% del hidro generador según las especificaciones técnicas del fabricante.

$$\dot{W}_t = \frac{\dot{W}_e}{\eta_g}$$

Lo que nos dio una potencia hidráulica en la turbina de 1250 W el cual tomamos como dato requerido:

$$\dot{W}_t = \frac{1000}{0.80} = 1250 [W]$$

Posteriormente, se calculó el cabezal requerido en la turbina con la potencia obtenida:

$$H_t = \frac{\dot{W}_t}{\rho g Q}$$

$$H_t = \frac{1250}{(995.71)(9.81)(0.01)} = 12.80 [m]$$

Luego, para encontrar la altura necesaria para obtener el cabezal requerido se procedió a realizar el análisis del sistema mediante la ecuación de la energía (10).

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + h_p = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_t + h_L$$

Simplificando la ecuación al reconocer que, la presión a la cual están sometidos los reservorios es la presión atmosférica 101325 [Pa] por lo que el valor de las presiones se cancela. La velocidad en la entrada es insignificante por lo que se utiliza  $V_1 = 0$  y  $h_p = 0$ . Luego, se obtiene:

$$\Delta Z = H_t + h_L + \frac{V_2^2}{2g}$$

Se procedió a calcular las pérdidas totales por fricción ( $h_f$ ) y accesorios ( $h_m$ ).

$$h_L = h_f + h_m$$

Donde,  $h_f$  es igual al cabezal de velocidad  $V^2/2g$  por el factor de fricción  $f$  multiplicado por la longitud total  $L$  sobre el diámetro  $D$  de la tubería desde el reservorio en la parte superior, hasta el nivel de agua del reservorio inferior.

$$h_L = \frac{V^2}{2g} \left( f \frac{L}{D} + K_T \right)$$

Para calcular el factor de fricción se utilizó la ecuación de Swamee y Jain (13) el cual predice el factor de fricción con un error menor al 3% del obtenido por el diagrama de Moody.

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log_{10} \left( \frac{\epsilon}{3.7D} + \frac{5.74}{Re^{0.9}} \right) \right]^2} \quad (15)$$

Al cual le tuvimos que calcular el número de Reynolds,

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

$$Re = \frac{(995.71)(2.26)(0.075)}{(7.95 \times 10^{-4})} = 1.51 \times 10^5$$

Esto junto con el valor del factor de rugosidad dividido entre el diámetro de la tubería nos dio el valor requerido en la ecuación para el factor de fricción.

$$\frac{\epsilon}{D} = 2.84 \times 10^{-5}$$

Lo que resultó en un factor de fricción igual a 0.0166376:

$$f = \frac{0.25}{\left[ \log_{10} \left( \frac{4 \times 10^{-5}}{3.7} + \frac{5.74}{(2.25 \times 10^5)^{0.9}} \right) \right]^2} = 0.0166376$$

$$h_f = \frac{V^2}{2g} f \frac{L}{D}$$

Considerando los accesorios para la línea de succión del hidro generador en la siguiente tabla:

Utilizando los datos de longitud equivalente según el fabricante hacemos uso de la siguiente ecuación para despejar el coeficiente K correspondiente al valor de pérdida menor en el accesorio:

$$K = \frac{L_e f}{D_i} \quad (16)$$

Donde,  $L_e$  es la longitud equivalente,  $f$  el factor de fricción de Darcy y  $D_i$  el diámetro interior de la tubería.

**Tabla 5**

*Accesorios en la línea de succión de la turbina*

<b>Accesorios en la línea de succión de la turbina</b>				
<b>Accesorios</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Le 110mm</b>	<b>k 110mm</b>	<b>Total</b>
Codo de 90°	2	4,3	0,6775	1,355
Codo de 45°	2	1,9	0,2994	0,5987
Válvula (electroválvula)	1	5	0,7878	0,7878
Entrada	1		0,8	0,8
Tee	1	2,6	0,4096	0,4096
<b>Total</b>				<b>3,951</b>

*Nota.* Fuente: Elaboración propia.

Y reemplazando en el valor de pérdidas por fricción y accesorios resultó lo siguiente:

$$h_f = \frac{(1.14)^2}{2(9.81)} (0.0166376) \left( \frac{27}{0.1056} \right) = 0.28 [m]$$

$$h_m = \frac{V^2}{2g} K_T$$

$$h_m = \frac{(1.14)^2}{2(9.81)} (3.951) = 0.26 [m]$$

$$h_L = 0.28 + 0.26 = 0.55 [m]$$

Que finalmente resultaron en una altura requerida para la operación del sistema de:

$$\Delta Z = 12.80 + 0.55 + 0.066 = 13.41 [m]$$

Adicional por fines demostrativos para la práctica del sistema, se calculó la presión resultante a la entrada de la turbina.

Utilizando la ecuación de Bernoulli (ecuación 11), se tiene:

$$P_2 = P_1 - \frac{\rho V_2^2}{2} + \rho g \Delta Z$$

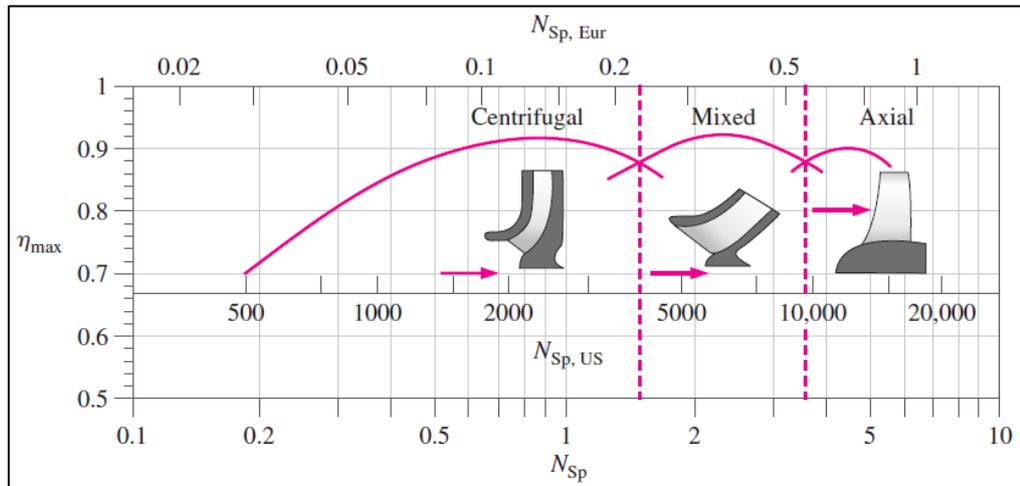
$$P_2 = 101325 - \frac{995.71(1.14)^2}{2} + 995.71(9.81)(13.34)$$

$$P_2 = 230981.89 \text{ [Pa]}$$

Para la selección de la bomba, se utilizó la figura 11 para determinar la bomba que mejor se acopla a los requerimientos especificados.

**Figura 11**

*Gráfica de principales tipos de bombas dinámicas.*



Fuente: (Cengel, 2006)

Haciendo el cálculo de la velocidad específica determinamos a partir de los parámetros que la mejor opción fue la bomba centrífuga.

$$N_{Sp, Eur} = \frac{(\dot{n}, Hz)(Q, m^3/s)^{\frac{1}{2}}}{(gH, m^2/s^2)^{\frac{3}{4}}}$$

$$N_{Sp,Eur} = \frac{(60)(0.01)^{\frac{1}{2}}}{(9.81(13.98))^{\frac{3}{4}}} = 0.15$$

Asimismo, se procedió a calcular la potencia hidráulica para la bomba centrífuga con la altura dinámica total del sistema (TDH), que es la suma de la altura estática o geométrica a vencer y las pérdidas de carga de la instalación; la densidad del agua, el valor de la gravedad y el caudal.

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 + h_p = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_t + h_L$$

$$TDH = h_p = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + h_t + h_L - \frac{P_1}{\gamma} - \frac{V_1^2}{2g} - Z_1$$

Que al agrupar nos resultó

$$TDH = h_p = (Z_2 - Z_1) + h_L + \left(\frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g}\right) + \left(\frac{P_2}{\gamma} - \frac{P_1}{\gamma}\right)$$

Por consideraciones del sistema y diseño la ecuación del TDH resultó como

$$TDH = h_p = (Z_2 - Z_1) + h_L$$

Donde  $h_L$  es,

$$h_L = \frac{V^2}{2g} \left( f \frac{L}{D} + K_T \right)$$

Donde los accesorios para la bomba se describen en la siguiente tabla:

**Tabla 6**

*Accesorios en la línea de bombeo*

<b>Accesorios para bomba</b>			
<b>Accesorio</b>	<b>Cantidad</b>	<b>K 110mm</b>	<b>Total</b>
Codo de 90°	2	0,677	1,355
Codo de 45°	2	0,299	0,599
Entrada	1	0,8	0,8
Válvula check	1	1,639	1,64
<b>Total</b>			<b>4,394</b>

*Nota.* Los valores de k se obtuvieron despejando k de la ecuación (16) correspondiente a longitud equivalente. Fuente: Elaboración propia.

Y conociendo que el caudal es velocidad del fluido por área transversal de la tubería, se pudo reescribir la ecuación de  $h_L$  de la siguiente manera

$$Q = V * A$$

$$A = \frac{\pi D^2}{4}$$

Que al sustituir se generó una ecuación de la misma equivalencia

$$h_L = \frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} \left( f \frac{L}{D} + K_T \right)$$

Al reemplazar con valores del sistema se obtuvo:

$$h_L = \frac{8 * 0.01^2}{\pi^2 * 0.1056^4 * 9.81} \left( 0.0166376 \frac{27}{0.1056} + 3.951 \right)$$

$$h_L = 0.574 \text{ m}$$

$$TDH = h_p = 13.41 + 0.574$$

$$TDH = h_p = 13.98 \text{ m}$$

Una vez obtenidos estos datos se calculó la potencia hidráulica de la bomba, teniendo:

$$W_p = \rho * g * Q * TDH$$

$$W_p = 995.71 \frac{Kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{s^2} * 0.01 \frac{m^3}{s} * 13.98 \text{ m}$$

$$W_p = 1365.86 \text{ W}$$

Una vez obtenida la potencia hidráulica se pudo calcular la potencia disponible para el motor eléctrico de la bomba

$$\eta = \frac{W_p}{W_m}$$

Conociendo que  $W_m$  es la potencia del eje, y con una eficiencia  $\eta$  del 70%, se obtiene la potencia de eje.

$$W_m = \frac{W_p}{\eta}$$

$$W_m = \frac{1365.86}{0.7}$$

$$W_m = 1951.23 \text{ W}$$

$$W_m = 2.62 \text{ HP}$$

Con este valor se escogió una bomba que cumpla con este requerimiento. Por lo tanto, se eligió la bomba Pedrollo HFm6A de 3 hp.

Adicionalmente, para el cálculo del NPSH disponible (cabezal neto de succión positiva) se utilizó el valor de la presión de vapor del agua  $P_v$  a 30°C igual a 4246 [Pa]. Al realizar un balance de energía se obtiene:

$$NPSH_{disp} = \frac{P_a - P_v}{\rho g} - h_L - \Delta z$$

Donde,

$$h_L = \frac{8Q^2}{\pi^2 D^4 g} \left( f \frac{L}{D} + K_T \right)$$

$$h_L = \frac{8 * 0.01^2}{\pi^2 * 0.1056^4 * 9.81} \left( 0.0166376 * \frac{1}{0.1056} + 0.8 \right)$$

$$h_L = 0.06363 \text{ m}$$

De acuerdo con las pérdidas de carga  $h_L$  se continuó con el cálculo del NPSH disponible terminando de obtener los parámetros para la selección de la bomba centrífuga para el sistema.

$$NPSH_{disp} = \frac{101325 - 4246}{995.71 * 9.81} - 0.06363 - 0$$

$$NPSH_{disp} = 9.875 \text{ m}$$

### ***2.5.2 Diseño de diagrama unifilar eléctrico del sistema***

Para el diseño del diagrama unifilar eléctrico se tomó como consideración el fenómeno físico del sistema, el cual corresponde a un flujo continuo. En primer lugar, se estableció el valor

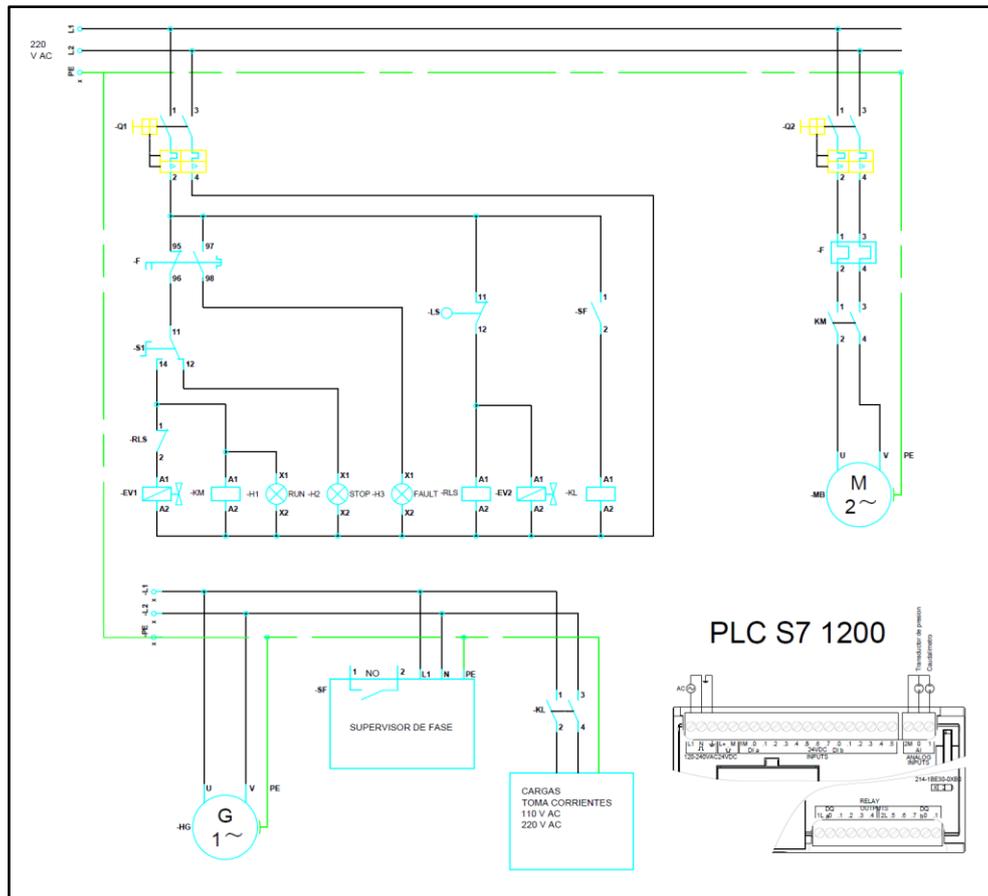
de 220V a 60Hz para la bomba, electroválvulas y los electros niveles respectivamente. Con estos valores establecidos, y como requerimiento del equipo se optó por utilizar dos breques de control uno para la bomba y el otro para el sistema de descarga que se controló por las electroválvulas. Adicional a esto, se utilizaron supervisores de fase a la salida de la turbina para evitar daños y fluctuaciones, siendo estos los que protegen las cargas de salida que se pueden conectar a cualquier sistema que se desee energizar.

El diseño, cuenta con un tablero eléctrico de encendido y apagado con una señal de alarma en caso de fugas de agua en el sistema mecánico, esta alarma cierra la válvula de descarga y abre el circuito de la bomba a través de los contactores para así evitar daños en los equipos y proteger el sistema de sobrecargas y cortocircuitos.

Por último, se utilizó un PLC S7 1200 para controlar el sistema de manera remota. Este controlador permite programar una variedad de funciones de monitoreo, su conectividad simplifica la integración con otros sistemas y dispositivos. Adicionalmente, el PLC S7-1200 dispone de avanzadas capacidades de comunicación, lo que permite la supervisión y el control del sistema en tiempo real, asegurando una respuesta rápida ante cualquier anomalía. Su interfaz de usuario intuitiva facilita la realización de ajustes y diagnósticos, garantizando así un funcionamiento óptimo y eficiente del sistema en todo momento.

**Figura 12**

*Diagrama eléctrico del sistema demostrativo bomba-turbina*



*Nota.* Fuente: Elaboración propia.

## 2.6 Especificaciones técnicas

### Turbina-generador

Fue recibido el hidro generador con turbina tipo Turgo a 220V y 60Hz con las siguientes especificaciones técnicas:

**Figura 13**

*Especificaciones técnicas según el fabricante del hidro generador*

FLTXNY		Specification					
Power	500W	600W	800W	1000W	1500W	2000W	3000W
Voltage	220 (V)						
Head	6-15m	7-15m			7-20m	10-25m	10-30m
Flow	0.007m3/s	0.008m3/s	0.009m3/s	0.01m3/s	0.02m3/s	0.03m3/s	
Speed	500-1500rpm						
Weight	23kg	25kg	28kg	35kg	38kg	55kg	58kg
Package	39×33×45cm			43×35×45cm		48×37×47cm	5×4×55cm

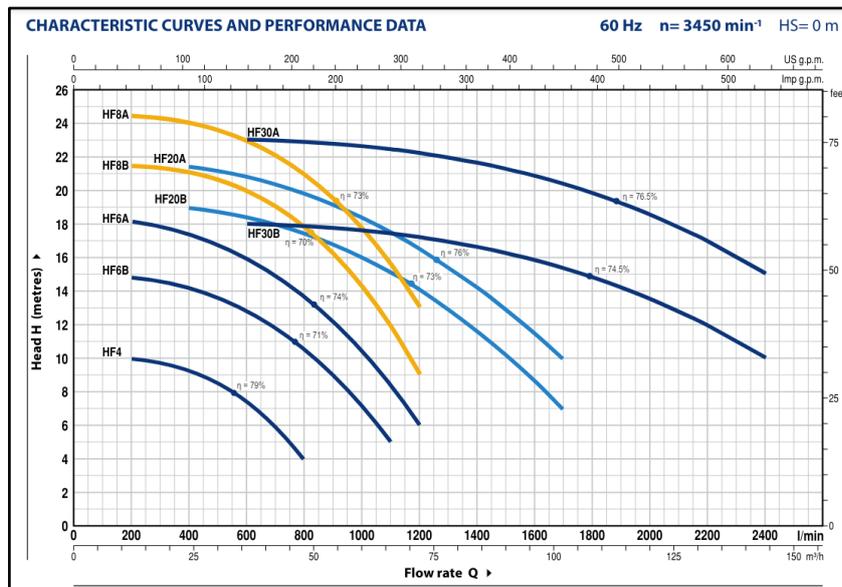
Fuente: FLTXNY (2011)

**Bomba**

Se escogió una bomba de 3 hp de potencia, marca Pedrollo modelo HFm6A.

**Figura 14**

*Curva de desempeño de la bomba*



Fuente: Pedrollo (S.f)

**Figura 15**

*Datos de desempeño de la bomba*

MODEL		POWER (P <sub>2</sub> )			Q	H																		
Single-ph.	Three-ph.	kW	HP	▲		m <sup>3</sup> /h	0	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	87	102	114	129	144	
					l/min	0	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1450	1700	1900	2150	2400		
<b>HFm 4</b>	<b>HF 4</b>	0.75	1		IE3 H metres	10	10	9.8	9.3	8.5	7.4	5.9	4											
<b>HFm 6B</b>	<b>HF 6B</b>	1.5	2			14.8	14.8	14.6	14.2	13.6	12.8	11.8	10.5	9	7.2	5								
<b>HFm 6A</b>	<b>HF 6A</b>	2.2	3			18.5	18.1	17.8	17.4	16.8	16	14.9	13.7	12.2	10.4	8.4	6							
<b>HFm 8B</b>	<b>HF 8B</b>	3	4			21.5	21.5	21.4	21.1	20.7	20	19.1	17.8	16.2	14.3	11.9	9							
-	<b>HF 8A</b>	4	5.5			24.5	24.5	24.4	24.1	23.6	23	22.1	21	19.5	17.7	15.6	13							
-	<b>HF 20B</b>	3	4			19	-	-	19	18.8	18.4	18	17.5	16.8	16.1	15.2	14.2	11	7					
-	<b>HF 20A</b>	4	5.5			21.5	-	-	21.5	21.3	20.9	20.5	19.9	19.2	18.5	17.6	16.6	13.7	10					
	<b>HF 30B</b>	5.5	7.5			18	-	-	-	-	18	17.9	17.9	17.8	17.6	17.4	17.2	16.4	15.3	14.2	12.3	10		
	<b>HF 30A</b>	7.5	10			23	-	-	-	-	23	22.9	22.9	22.8	22.6	22.4	22.2	21.4	20.4	19.2	17.3	15		

Q = Flow rate H = Total manometric head HS = Suction height Tolerance of characteristic curves in compliance with EN ISO 9906 Grade 3B.  
 ▲ Three-phase motor efficiency class (IEC 60034-30-1)

Fuente: Pedrollo (S.f)

**Tabla 7***Accesorios del sistema mecánico - lista de materiales*

<b>Artículo</b>	<b>Cantidad</b>
Codo de 110mm a 90°	4
Codo de 110mm a 45°	4
Tee de 110mm	1
Tubos PVC DE 3M*110MM	18
Tanque de 1100 litros	2
Bomba centrifuga	1
Pedrollo 3HP	
Adaptadores de tanque de 4"	2
Válvula check horizontal de 110mm	1
Collarín con derivación a 1/8"	1
Soldadura regular para PVC o cemento	1
solvente	
Limpiador polilimpia	1
Buje reductor de 110mm a 90mm	3
Neplo perdido de 4"	1

Unión Hembra de 110mm	1
Neplo perdido de 3"	2
Unión hembra de 90mm	1
Brida inyectada de 75mm	1
Reductor largo de 110mm a 75mm	1

---

*Nota.* Fuente: Elaboración propia.

### **Tabla 8**

#### *Accesorios del sistema eléctrico*

<b>Artículo</b>	<b>Cantidad</b>
Breakers	2
Contactores	3
Supervisor de fase	1
Selector	1
Electronivel	1
Válvula solenoides 4"	1
Manómetro de alta precisión	1
Controlador PLC S7 1200	1

---

*Nota.* Fuente: Elaboración propia.

## **Capítulo 3**

### 3. Resultados y análisis

El siguiente capítulo abarca la simulación del sistema diseñado en el software SolidWorks para validar los resultados y compararlos con los cálculos teóricos del fenómeno físico. Aquí, se tomará en cuenta la descarga de agua del tanque superior a la turbina, donde se evaluarán datos de presión y velocidad para verificar que se cumplen los requerimientos del fabricante para la generación de potencia eléctrica.

#### 3.1 Resultados teóricos

Para el turbinado:

**Tabla 9**

*Resultados teóricos en la línea de turbina*

<b>Potencia eléctrica requerida</b>	<b>Potencia entrada requerida</b>	<b>Ht requerido</b>	<b>Altura requerida</b>
<b>[W]</b>	<b>[W]</b>	<b>[m]</b>	<b>[m]</b>
1000	1250	12,8	13,41

*Nota.* Valores obtenidos a partir de la solicitud de potencia eléctrica del cliente. Fuente: Elaboración propia.

Para obtener la potencia eléctrica requerida se obtuvo una altura necesaria de 13.41 [m], valor que se ratificó en las instalaciones del CDTS ya que la caída es de unos 15[m] a 45° aproximadamente contribuyendo a una altura de 10.6[m], el valor faltante se lo atribuye a la torre elevada y a la altura del nivel de agua del tanque.

Para el bombeo:

**Tabla 10**

*Resultados teóricos en la línea de bombeo*

Delta Z	H requerido de bomba
13,41	13,98

*Nota.* Valores obtenidos a partir de la solicitud de potencia eléctrica del cliente. Fuente: Elaboración propia.

Según la tabla 10, el cabezal de la bomba fue de 13.98[m] valor que se utilizó para calcular la potencia hidráulica junto con la eficiencia se pudo calcular la potencia de eje requerida. Adicional a esto se hizo una búsqueda en el mercado de las bombas y se solicitaron las curvas de desempeño para evaluar los datos disponibles del fabricante con los requeridos por el sistema. A continuación se presentan datos y graficas del fabricante para el cabezal de un grupo de bombas de la cual se seleccionó la más adecuada para nuestro sistema (ver Figura 19), donde se buscó evadir problemas de cavitación en la succión.

**Figura 16**

*Tabla de valores de cabezal disponible de la bomba HFm 6A.*

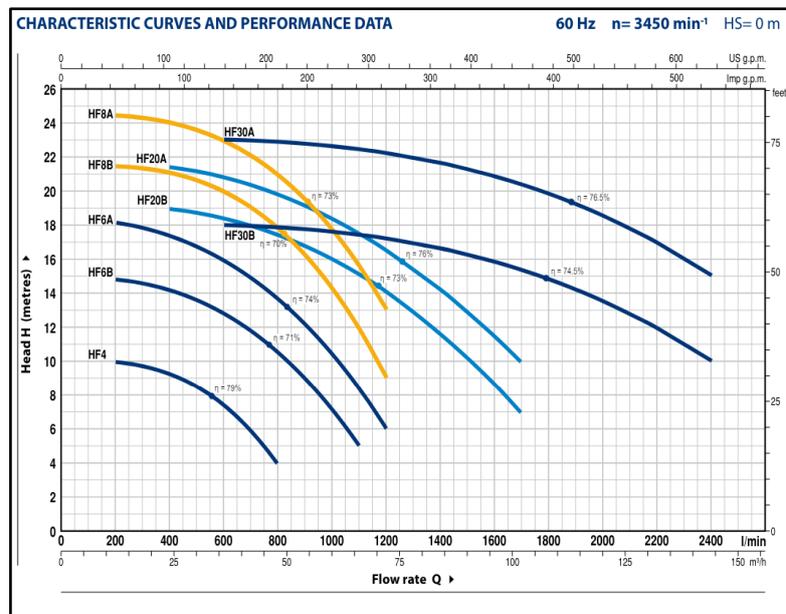
MODEL		POWER (P <sub>2</sub> )		Q	H																		
Single-ph.	Three-ph.	kW	HP		▲	m <sup>3</sup> /h	0	12	18	24	30	36	42	48	54	60	66	72	87	102	114	129	144
					l/min	0	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1450	1700	1900	2150	2400	
HFm 4	HF 4	0.75	1			10	10	9.8	9.3	8.5	7.4	5.9	4										
HFm 6B	HF 6B	1.5	2			14.8	14.8	14.6	14.2	13.6	12.8	11.8	10.5	9	7.2	5							
HFm 6A	HF 6A	2.2	3			18.5	18.1	17.8	17.4	16.8	16	14.9	13.7	12.2	10.4	8.4	6						
HFm 8B	HF 8B	3	4			21.5	21.5	21.4	21.1	20.7	20	19.1	17.8	16.2	14.3	11.9	9						
-	HF 8A	4	5.5	IE3	H	24.5	24.5	24.4	24.1	23.6	23	22.1	21	19.5	17.7	15.6	13						
-	HF 20B	3	4			19	-	-	19	18.8	18.4	18	17.5	16.8	16.1	15.2	14.2	11	7				
-	HF 20A	4	5.5			21.5	-	-	21.5	21.3	20.9	20.5	19.9	19.2	18.5	17.6	16.6	13.7	10				
	HF 30B	5.5	7.5			18	-	-	-	-	18	17.9	17.9	17.8	17.6	17.4	17.2	16.4	15.3	14.2	12.3	10	
	HF 30A	7.5	10			23	-	-	-	-	23	22.9	22.9	22.8	22.6	22.4	22.2	21.4	20.4	19.2	17.3	15	

Q = Flow rate H = Total manometric head HS = Suction height  
Tolerance of characteristic curves in compliance with EN ISO 9906 Grade 3B.  
▲ Three-phase motor efficiency class (IEC 60034-30-1)

Fuente: Pedrollo (S.f)

**Figura 17**

*Curva de desempeño de la bomba escogida*



Fuente: Pedrollo (S.f)

**Tabla 11**

*Resultados teóricos en la línea de bombeo*

<b>W<sub>b</sub> hidráulica [w]</b>	<b>Eficiencia</b>	<b>W<sub>m</sub> mecánica [w]</b>	<b>Bomba requerida [hp]</b>
1365.86	70%	1951.23	2,62

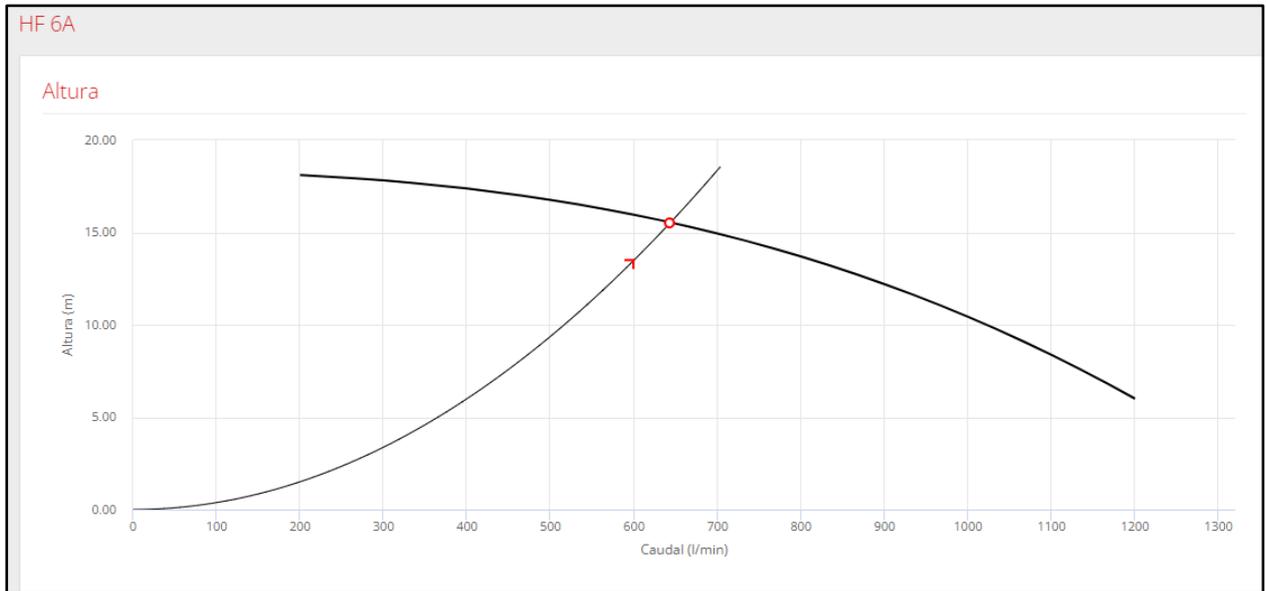
*Nota.* Valor de eficiencia obtenido del catálogo del fabricante. Fuente: Elaboración propia.

En la tabla 11, se puede observar que la bomba requerida necesitaría una potencia de 3 hp analizando la potencia mecánica requerida. Por otro lado, comparando el cabezal disponible con el requerido por el sistema luego de seleccionar la bomba Pedrollo HFm 6A el cual dispone de 16 [m] de cabezal y que nuestro sistema requiere de 13.98 [m], afirma una selección favorable ya que cumple los requerimientos del sistema. Esto se puede observar en la Figura 17. Además, en la Figura 18, podemos observar que el NPSH requerido a comparación del NPSH disponible dio un

valor de 9.875 a 600 L/min. Como este valor es mayor al requerido estamos asegurando un sistema de óptimas condiciones libre de cavitación.

### Figura 18

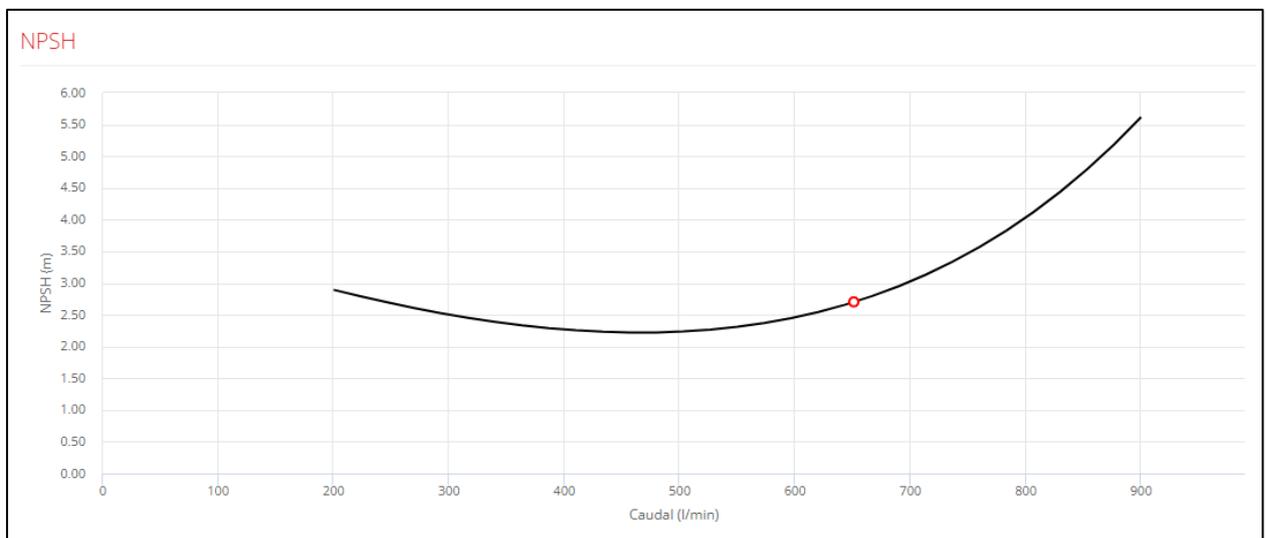
Gráfica de cabezal requerido y disponible de la bomba HFm 6A



Nota. Punto de operación de la bomba a  $Q=643.72$  L/min y  $H=15.54$ m. Fuente: (Pedrollo, S.f)

### Figura 19

Gráfica de NPSH requerido de la bomba HFm 6A



Nota. Punto de operación de la bomba a  $Q=643.72$  L/min y  $H=15.54$ m. Fuente: Pedrollo (S.f)

**Tabla 12**

*Tabla de velocidad y presión promedio.*

<b>Vprom</b>	<b>Q</b>	<b>Presión</b>
<b>[m/s]</b>	<b>[m3/s]</b>	<b>[Pa]</b>
1,14	0,01	230981.98

*Nota.* Cálculo de velocidad promedio según la especificación del caudal necesario por la turbina.

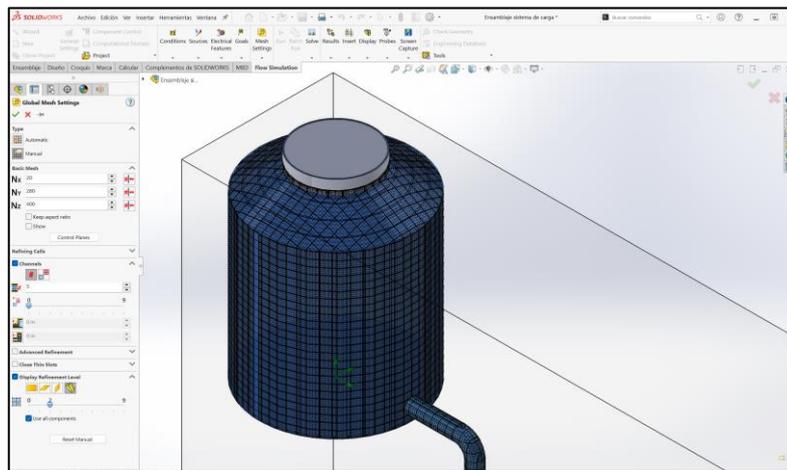
Fuente: Elaboración propia.

### 3.2 Resultados de la simulación del sistema

En la simulación del sistema, se consideró la etapa de descarga hacia la turbina debido a que es la sección de importancia sujeta al análisis del módulo demostrativo para la obtención de los resultados esperados. Como parámetros iniciales se consideró la aceleración de la gravedad y la presión atmosférica para el flujo continuo del fluido. También, se consideró agua a 30°C, y una rugosidad de 0.003[mm] para tubos de PVC. Se establecieron las condiciones de frontera, que para el caudal de entrada a la turbina Turgo fue de  $0,01 \frac{m^3}{s}$  debido a la ficha técnica de la turbina para generar el kilovatio de potencia.

**Figura 20**

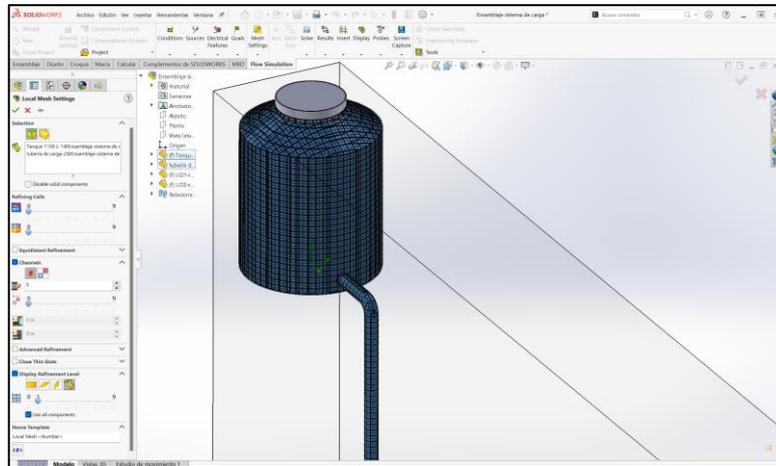
*Mallado global del sistema*



Fuente: Elaboración propia.

**Figura 21**

*Mallado local del sistema*

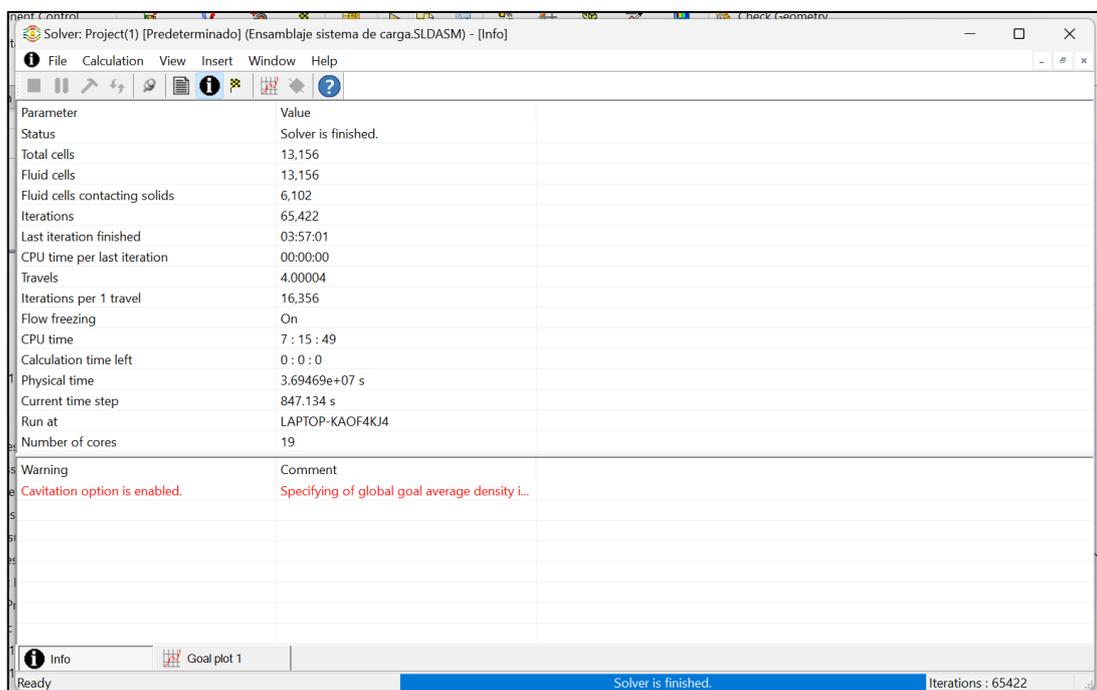


Fuente: Elaboración propia.

La simulación del sistema se realizó con el mallado local del sistema el cual se partió del mallado global donde luego se refinó para obtener resultados más acordes al modelo.

**Figura 22**

*Tabla de información de la simulación*



Parameter	Value
Status	Solver is finished.
Total cells	13,156
Fluid cells	13,156
Fluid cells contacting solids	6,102
Iterations	65,422
Last iteration finished	03:57:01
CPU time per last iteration	00:00:00
Travels	4.00004
Iterations per 1 travel	16,356
Flow freezing	On
CPU time	7 : 15 : 49
Calculation time left	0 : 0 : 0
Physical time	3.69469e+07 s
Current time step	847.134 s
Run at	LAPTOP-KAOF4KJ4
Number of cores	19

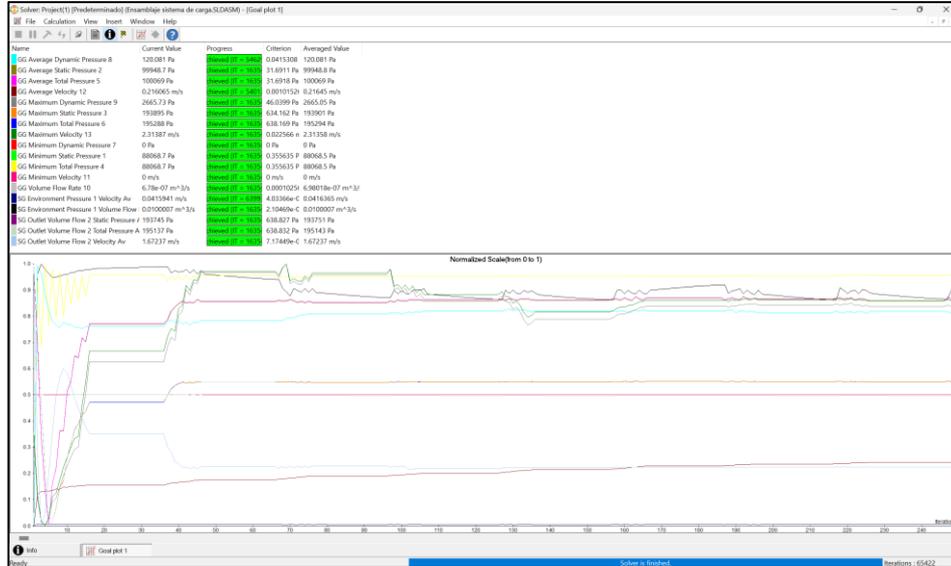
Warning	Comment
Cavitation option is enabled.	Specifying of global goal average density l...

Ready | Info | Goal plot 1 | Solver is finished. | Iterations : 65422

Fuente: Elaboración propia.

**Figura 23**

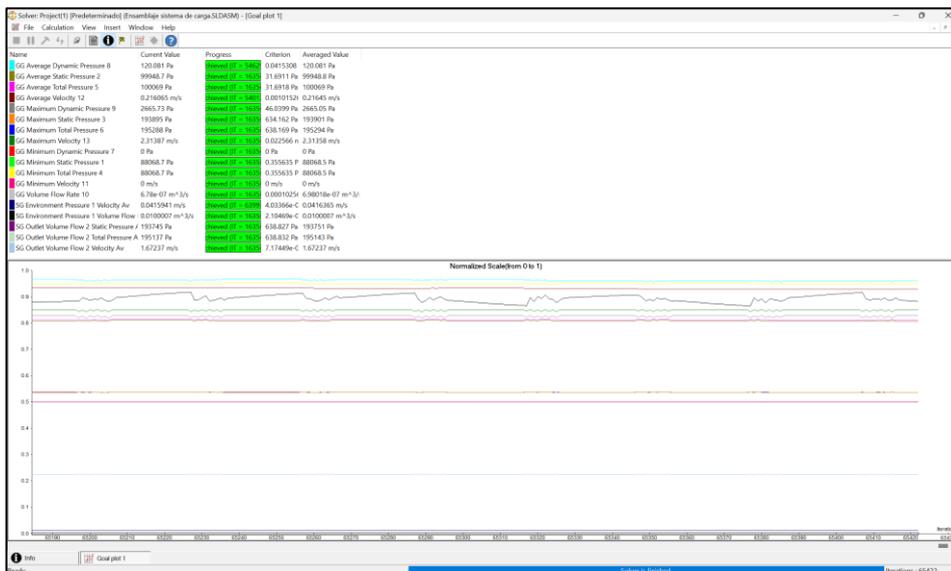
*Resultados de la simulación*



*Nota.* Resultados de velocidad y presión promedio a la entrada de la turbina. Fuente: Elaboración propia.

**Figura 24**

*Curvas de la simulación al final del tiempo configurado*



Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 23 se pueden observar los parámetros evaluados para la verificación de los resultados teóricos, en la simulación se obtuvieron valores de velocidad promedio, presión estática promedio y presión total promedio a lo largo del sistema de descarga hacia la turbina. Los resultados se generaron a partir del cálculo computacional del software SolidWorks donde se configuró el programa con un tiempo de 18000 segundos llevando al cabo 65422 iteraciones para lograr establecer una tendencia y asegurar la fiabilidad de resultados.

**Tabla 13**

*Resultados de simulación en SolidWorks*

<b>Velocidad promedio</b> <b>[m/s]</b>	<b>Presión promedio</b> <b>[Pa]</b>
1,67	195137

*Nota.* Los valores para velocidad promedio y presión promedio se los calculó a la entrada de la turbina. Fuente: Elaboración propia.

Este resultado de velocidad promedio nos arrojó datos relevantes para el sistema, ya que comparado con los resultados teóricos para la generación de potencia eléctrica me permite tener una mayor confianza en el diseño. Es importante conocer que dicho resultado fue calculado de igual manera que para el cálculo teórico a la entrada de la turbina luego de que el fluido hiciera su recorrido por la línea de descarga desde el tanque superior hasta la turbina.

Comparando los resultados de la Tabla 12 con la Tabla 13, se obtienen los siguientes errores porcentuales observados en la Tabla 14.

**Tabla 14**

*Errores porcentuales de datos teóricos vs resultados simulados*

<b>Error Velocidad promedio</b>	<b>Error Presión promedio</b>
46%	16%

*Nota.* Los valores de error de velocidad y presión fueron comparados con los resultados teóricos.

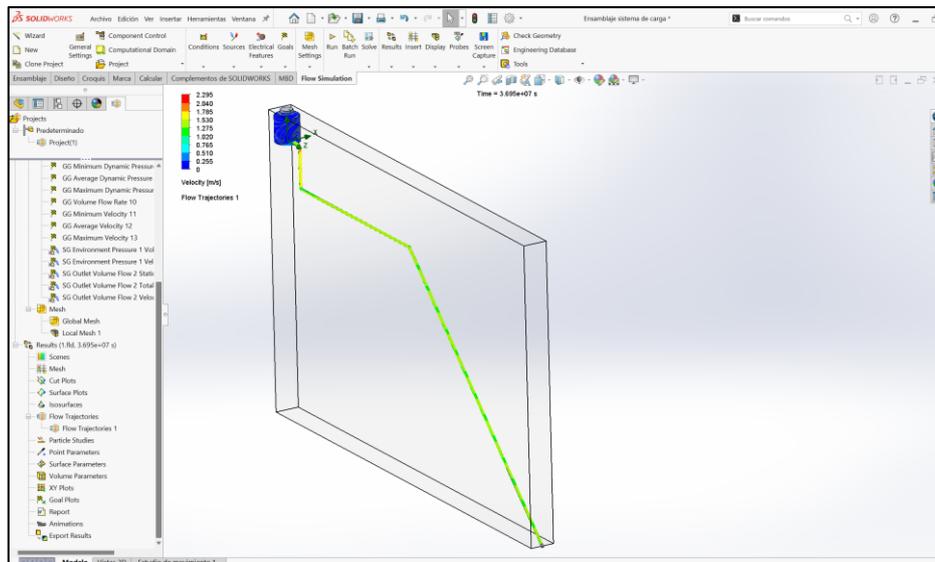
Fuente: Elaboración propia.

Al calcular los errores porcentuales, podemos observar que los resultados fueron coherentes con la teoría, la velocidad en la simulación tiende a ser mayor que el cálculo teórico por ciertas razones, primordialmente la parametrización de la simulación se la idealizó ya que no cuenta con una herramienta para medir la pérdida de cabezal por accesorios lo que disminuye la velocidad, aunque el valor encontrado en la simulación fuera el correcto, que sea mayor me produce un mejor caudal que el mínimo necesario por la turbina para que el sistema funcione y produzca la potencia que se requiere, por lo tanto es un resultado favorable. Este porcentaje de error es aceptable y también está ligado a la teoría de fluidos en donde subyace el método de cálculo para calcular el factor de fricción, los métodos numéricos que son aproximaciones, entre otros aspectos que generan esta discrepancia con la realidad. Sin embargo, es recomendable evaluar los resultados en otro software permitiendo la comparación de los resultados y así obtener una alta precisión y confiabilidad del diseño realizado.

Por otro lado, se mostraron los resultados de la simulación de forma gráfica donde se asignó un campo vectorial para representar el flujo de agua por el sistema de descarga del tanque hacia la turbina como se puede observar en la Figura 25.

**Figura 25**

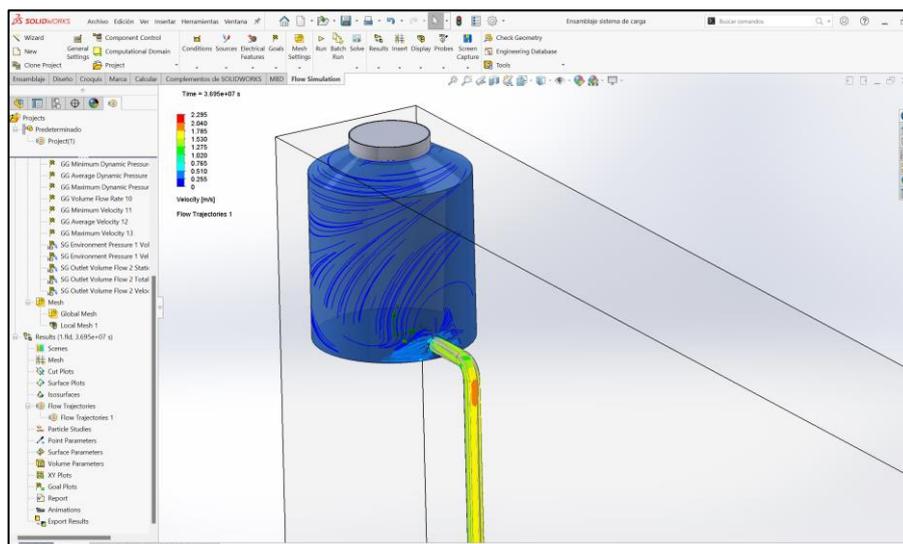
*Representación de la velocidad del fluido en el sistema*



*Nota.* La escala de colores representa la velocidad del fluido en el sistema. Fuente: Elaboración propia.

**Figura 26**

*Representación de la velocidad del fluido en el sistema*



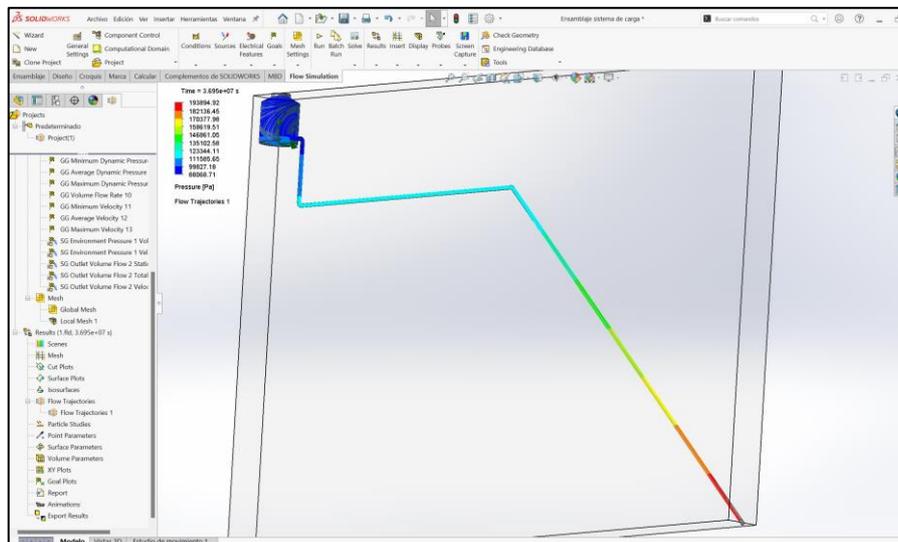
*Nota.* Flujo de velocidad en el tanque y a la entrada de la tubería. Fuente: Elaboración propia.

Los rangos de colores de la simulación del flujo continuo del fluido por el sistema se muestran en la Figura 26, donde se pueden observar los valores mínimos y máximos siendo estos

$0 \frac{m}{s}$  y  $2,295 \frac{m}{s}$  respectivamente, la velocidad mínima se la encuentra en la superficie superior del tanque y la máxima en la entrada de la turbina.

**Figura 27**

*Representación de la presión del fluido ejercida en el sistema*

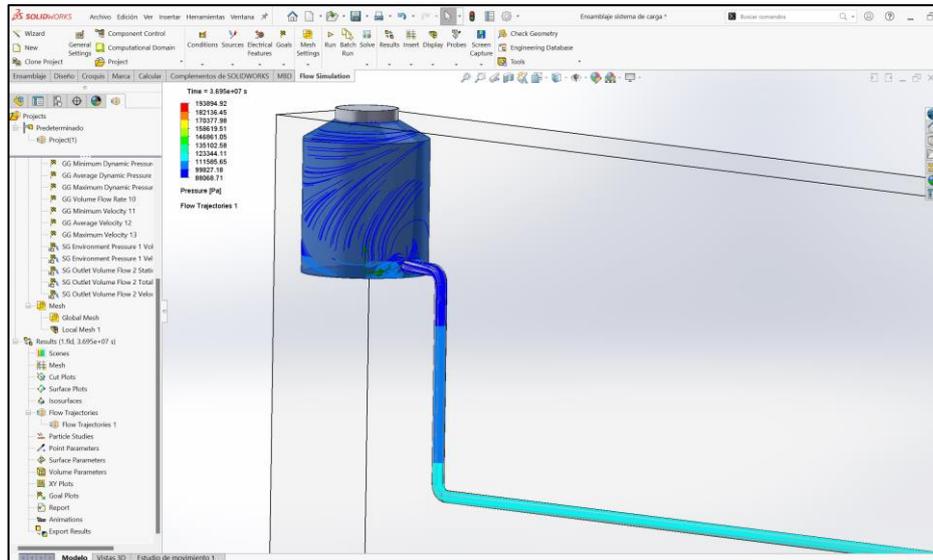


*Nota.* Escala de colores para los resultados de presión en el sistema. Fuente: Elaboración propia.

La presión fue otro parámetro importante de calcular en nuestro diseño, para esto se procedió a configurar de la misma manera que para la velocidad el diseño del sistema. Luego, se pudo demostrar gráficamente con una escala de colores y valores la presión del fluido sobre del tanque y tuberías debido al cabezal geométrico del sistema, esto se puede observar en la Figura 27.

**Figura 28**

*Representación de la presión del fluido sobre el sistema*



*Nota.* Escala de colores que representa la presión en el sistema. Fuente: Elaboración propia.

La escala utilizada para mostrar la presión ejercida sobre la superficie del sistema de descarga del tanque hacia la turbina nos indica que los colores que bajan hacia el azul intenso representan valores de presión bajos y los colores acercándose al rojo valores más altos.

En la Figura 28 se muestran valores mínimos y máximos de presión, donde 88068,71 Pa representa el valor mínimo y 193894,92 Pa el máximo. El software presenta un valor mínimo de presión menor a la presión atmosférica a pesar de estar abierto al ambiente, esto se debe a que existe un gran cambio de velocidad en la conexión del tanque y la tubería por lo que genera un pequeño vacío en el tanque el cual se estabiliza a un metro y medio de conexión de tubería. Este fenómeno no resulta representativo en el sistema como se puede observar en el cálculo de error porcentual presentado en la Tabla 14.

De manera similar se puede observar el valor máximo de presión en la escala de colores, el cual resulta ser un tercio del valor máximo de presión que soporta la tubería seleccionada para el sistema por lo que no existe ningún problema en este punto de la línea de descarga de agua hacia la turbina.

### 3.3 Costos del sistema

Se cotizó a nivel nacional con la lista de materiales especificada en el diseño detallado para la construcción del sistema. Como se puede observar en la tabla 15, el precio total del sistema es de \$1929.44 dólares, valor que puede variar según el establecimiento donde se ejecute la compra. Este valor, representa costo de materiales relativamente bajo debido a la dimensión del sistema y la optimización en materiales, asegurando la obtención de los resultados esperados con una alta precisión.

**Tabla 15**

*Cotización de los materiales para la construcción del sistema hidráulico*

<b>Artículo</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Precio unitario</b>	<b>Total</b>
Codo de 110mm a 90°	4	\$3,80	\$15,20
Codo de 110mm a 45°	4	\$4,80	\$19,20
Tee de 110mm	2	\$6,00	\$12,00
Tubos PVC DE 3M*110MM	18	\$8,98	\$161,64
Válvula solenoide 4"	1	\$160,00	\$160,00
Tanque de 1100 litros	2	\$154,00	\$308,00
Bomba centrífuga Pedrollo 3HP	1	\$586,40	\$586,40
Adaptadores de tanque de 4"	2	\$20,00	\$40,00
Válvula check horizontal de 110mm	1	\$20,00	\$20,00
Manómetro de alta precisión	1	\$79,00	\$79,00
Collarín con derivación a 1/8"	1	\$4,00	\$4,00

Soldadura regular para PVC o cemento solvente	1	\$20,00	\$20,00
Limpiador Polilimpia	1	\$35,00	\$35,00
Flujometro de ultrasonido	1	\$390,00	\$390,00
Buje reductor de 110mm a 90mm	3	\$10,00	\$30,00
Neplo perdido de 4"	1	\$7,00	\$7,00
Unión Hembra de 110mm	1	\$7,00	\$7,00
Neplo perdido de 3"	2	\$5,00	\$10,00
Union hembra de 90mm	1	\$6,00	\$6,00
Brida inyectada de 75mm	1	\$4,00	\$4,00
Reductor largo de 110mm a 75mm	1	\$15,00	\$15,00
		<b>Total</b>	<b>\$1.929,44</b>

*Nota.* Precios encontrados en diferentes tiendas a nivel nacional. Fuente: Elaboración propia.

## Capítulo 4

## **4. Conclusiones y recomendaciones**

### **4.1 Conclusiones**

- Se desarrolló un diseño óptimo cumpliendo con las exigencias del cliente en el que se aseguró un flujo continuo y un tiempo de operación de 5 a 10 minutos para la generación de un kilovatio de potencia.
- Se dimensionó correctamente la bomba y tuberías necesarias para el sistema analizando las curvas de desempeño de cabezal y NPSH, con resultados fiables evitando problemas de cavitación. Escogiendo los mejores accesorios y reduciendo al máximo las pérdidas por fricción, permitiendo al sistema obtener los resultados esperados pese a las limitantes establecidas.
- Se realizó la simulación en SolidWorks ratificando la validez de los resultados en comparación con los resultados teóricos mediante un mallado específico y refinamiento del modelo. Además, de especificar correctamente las condiciones del sistema en el procesamiento y post procesamiento. Obteniendo valores aceptables y coherentes con el análisis según lo planificado.
- Se diseñó el diagrama unifilar eléctrico, especificando de manera conceptual los componentes necesarios para llevar a cabo la operatividad del sistema, se entregó el diseño eléctrico con el fin de que en un próximo proyecto se programe el controlador y permita la conectividad remota del sistema.

### **4.2 Recomendaciones**

- Al conocer las limitaciones del software utilizado, es indispensable considerar la efectividad del mallado de los sólidos ya que podrían verse afectados los resultados por falta de refinamiento de este.

- Para tener una mejor confiabilidad de la obtención de los resultados se sugiere simplificar la geometría del sistema para importar a otro software y comparar simulaciones. De manera alternativa, se podría probar la turbina con una bomba que genere el caudal necesario para verificar que la generación sea la especificada en la ficha técnica y hacer una gráfica de los resultados.
- Se recomienda realizar simulaciones de flujo transitorio para estudiar el comportamiento del sistema bajo condiciones no estacionarias como son en el arranque o paro de la turbina o en el caso de cambios bruscos de caudal cuando se abran o cierren las válvulas del sistema.
- Como herramienta de apoyo se recomienda complementar los cálculos del factor de fricción con la ecuación implícita de Colebrook-White ya que gracias a su proceso iterativo asegura una alta precisión de los resultados, sobre todo para cuando el régimen de flujo está en zona de transición.

## Referencias

- Orellana Navarrete, Verónica, & Balseca Córdova, Lorena. (2020). Innovación Social y Educación Superior en Ecuador. Un análisis al Modelo de Evaluación Externa de Universidades y Escuelas Politécnicas 2019. *Revista Andina de Educación*, 3(2), 25-31. <https://doi.org/10.32719/26312816.2020.2.3.4>
- Rivera García, Christian Geovanny, Espinosa Manfugás, Julia M., & Valdés Bencomo, Yulima D. (2017). La investigación científica en las universidades ecuatorianas.: Prioridad del sistema educativo vigente. *Revista Cubana de Educación Superior*, 36(2), 113-125. Recuperado en 30 de mayo de 2024, de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0257-43142017000200011&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0257-43142017000200011&lng=es&tlng=es).
- Orozco Inca, Edgar Enrique, Jaya Escobar, Aida Isabel, Ramos Azcuy, Fridel Julio, & Guerra Breña, Rosa Mayelín. (2020). Retos a la gestión de la calidad en las instituciones de educación superior en Ecuador. *Educación Médica Superior*, 34(2). Epub 01 de junio de 2020. Recuperado en 30 de mayo de 2024, de [http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0864-21412020000200019&lng=es&tlng=es](http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0864-21412020000200019&lng=es&tlng=es).
- Véliz Briones, V. F. (2018). Calidad en la Educación Superior. Caso Ecuador. *Atenas*, 1(41), 165–180. Recuperado a partir de <https://atenas.umcc.cu/index.php/atenas/article/view/165>
- González Fiegehen, Luis & Espinoza, Oscar. (2008). Calidad de la educación superior: concepto y modelos 2008-08. *Calidad en la Educación*. 28. 10.31619/caledu. n28.210.
- European Union. (2023). Erasmus+ Annual Report [Review of Erasmus+ Annual Report]. 5–14. <https://doi.org/10.2766/211791>
- Macias, C, et al. (2018). "Análisis de un banco de pruebas para microgeneración hidráulica"

- [en línea], (México), pp.12-19. [Consulta: 01 junio 2024]. Disponible en:  
<https://bit.ly/2UrCG4t>
- Japan International Cooperation Agency. (2011). *Guideline and Manual for Hydropower Development Vol. 2—Small Scale Hydropower*. Pp. 1-4. Capítulo 3.
- Munson B. et al. (2013). *Fundamentals of Fluid Mechanics* (7.<sup>a</sup> ed.). Editorial Wiley.  
Pp. 667-704.
- D'sousa, C. *Sistemas Scada* [En línea]. 2002. [Consuta: 2 de junio de 2024].  
Disponible en: <http://www.monografias.com/trabajos11/sisco/sisco.shtml>
- Clayton T. Crowe et al. (2009). *Engineering Fluid Mechanics* (9.<sup>a</sup> ed.). Editorial Wiley.  
Pp. 15-21 y Pp.315-322
- R. C. Hibbeler. (2018). *Fluid Mechanics* (2.<sup>a</sup> ed.). Editorial Pearson.
- Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación. (2024). *Portal de Estadísticas e Indicadores de Educación Superior*. <https://siau.senescyt.gob.ec/portal-de-indicadores-de-educacion-superior/>
- Ley Orgánica de Educación Superior [LOES]. (2018, 2 de agosto). Asamblea Nacional. Registro Oficial Suplemento 297. <https://www.ces.gob.ec/documentos/Normativa/LOES.pdf>
- Fidias G. Arias. (2012). *El Proyecto de Investigación: Introducción a la metodología Científica*. (6.<sup>a</sup> ed.). Editorial Episteme. Pp. 27-36. Caracas, Venezuela.
- Bernal R. y Niño D. (2018). *Modelo multicriterio aplicado a la toma de decisiones representables en diagramas de Ishikawa*. [Tesis de grado, Universidad Distrital Francisco José de Caldas]. Repositorio Institucional de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/13894>.
- Gómez D. (2018). *Sistema de mecanizado portátil para armarios eléctricos, Anexo III – VDI2225*. Pp. 4-6. Universidad de Oviedo. España.

Castro D. y Guerrero C. (2021). Diseño e implementación de un banco de pruebas de micro generación hidráulica para la facultad de Mecánica. [Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Pp. 39 – 64. Riobamba – Ecuador.

Cengel, Y. A. (2006). *Fluid Mechanics Fundamentals and Applications*. McGraw-Hill.

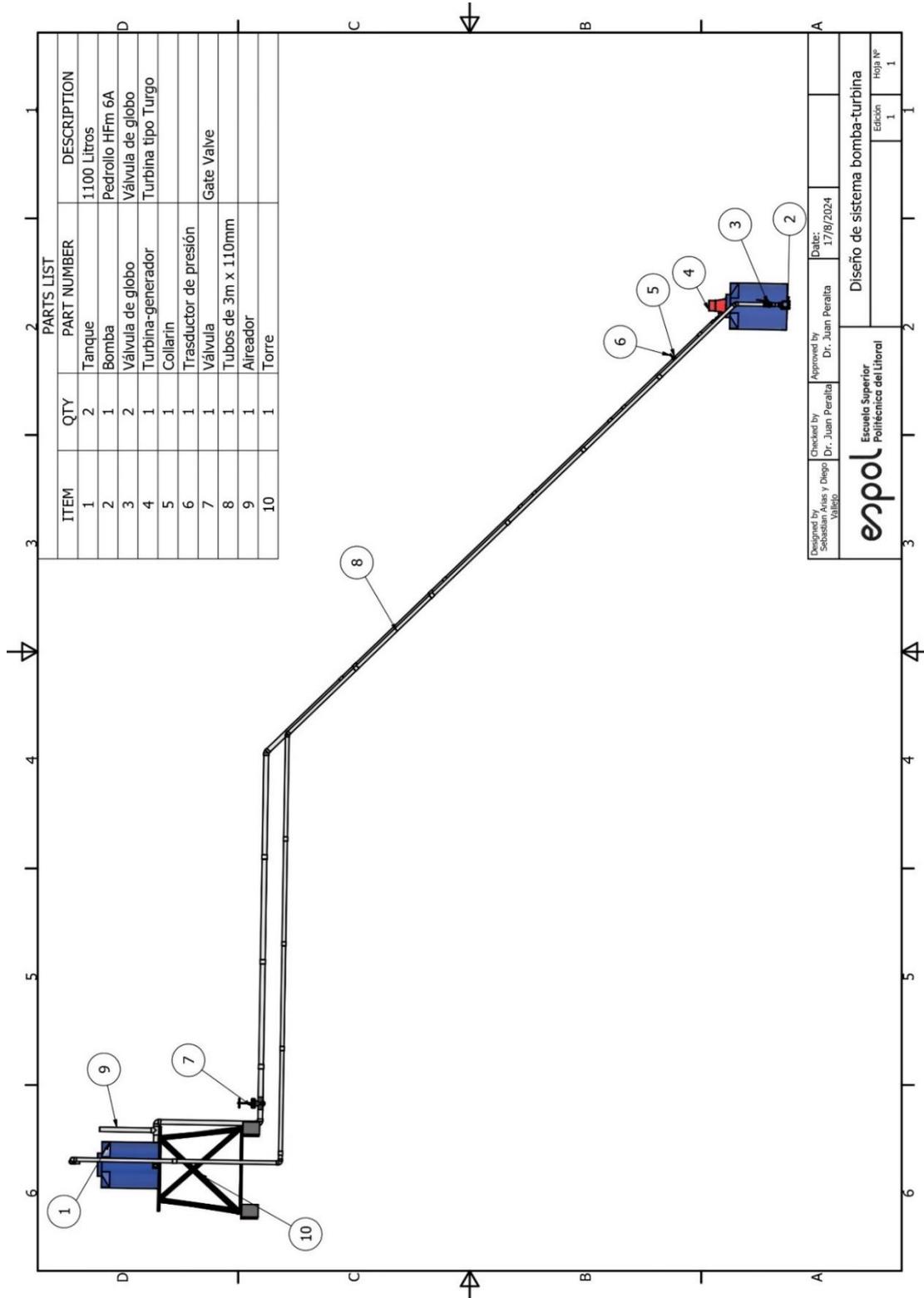
FLTXNY. (2011). *800w to 10kw hydroelectric generator mini small hydroelectric generator hydroelectric power*. Obtenido de [https://www.alibaba.com/product-detail/800w-to-10kw-hydroelectric-generator-mini\\_1600546693675.html?spm=a2700.galleryofferlist.wending\\_right.9.7e41583aODuRrM](https://www.alibaba.com/product-detail/800w-to-10kw-hydroelectric-generator-mini_1600546693675.html?spm=a2700.galleryofferlist.wending_right.9.7e41583aODuRrM)

Pedrollo. (S.f). *Pedrollo USA*. Obtenido de <https://www.pedrollo-usa.com/en/hf-alte-portate-centrifugal-pumps/304>  
propia, E. (s.f.).

# APÉNDICE A: PLANOS DEL SISTEMA

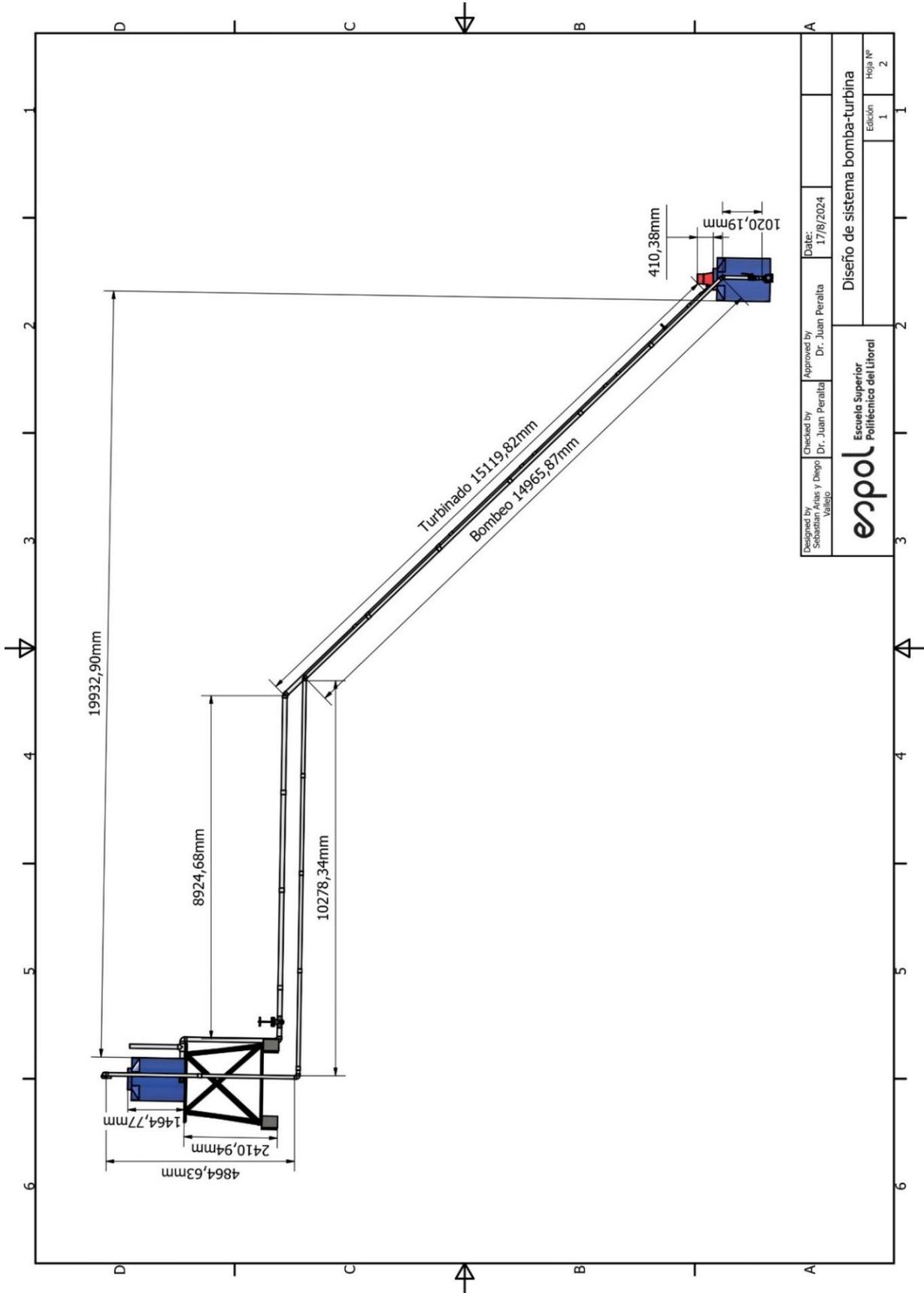
## Plano 1

### Lista de materiales

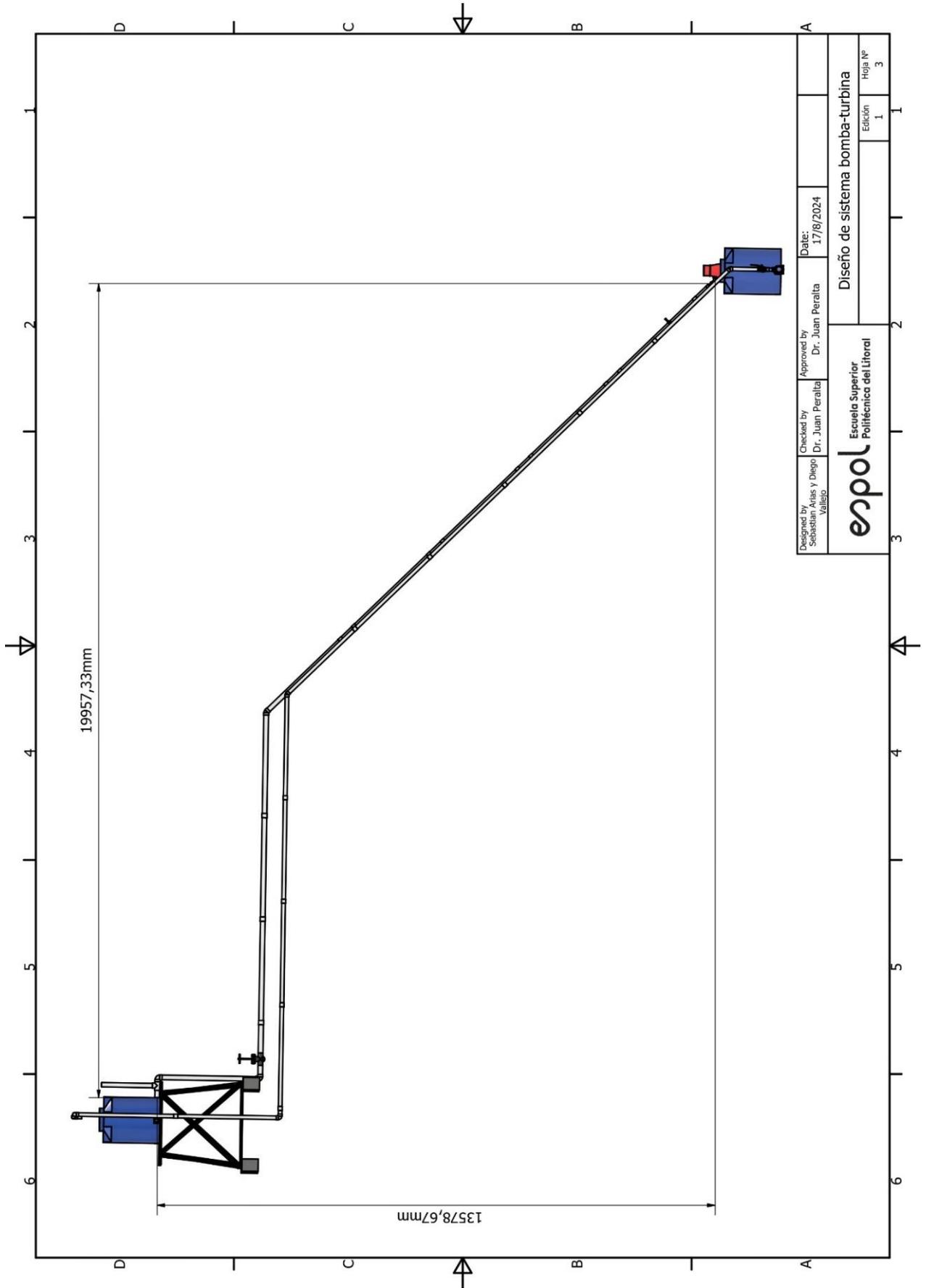


Designed by Sebastian Araya y Diego Valledo	Checked by Dr. Juan Peralta	Approved by Dr. Juan Peralta	Date: 17/8/2024
			Edición 1 1 1
Diseño de sistema bomba-turbina			

**Plano 2**  
Vista lateral



**Plano 3**  
*Vista lateral*



Designed by Sebastián Arias y Diego Vallejo	Checked by Dr. Juan Peralta	Approved by Dr. Juan Peralta	Date: 17/08/2024	
 <b>Escola Superior          Politécnica del Litoral</b>			<b>Diseño de sistema bomba-turbina</b>	
			Edición 1	Hoja Nº 3

**Plano 4**  
*Vista isométrica*

