

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**“DISEÑO DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA BOMBAS
FUNCIONANDO COMO TURBINAS”**

DISEÑO DEL SISTEMA HIDRÁULICO Y MECÁNICO

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

PEÑA LOACHAMIN JORGE ESTEBAN

jorge.pena@epn.edu.ec

DIRECTOR: Ing. HIDALGO DÍAZ VÍCTOR HUGO, D.Sc.

victor.hidalgo@epn.edu.ec

DMQ, agosto 2023

CERTIFICACIONES

Yo, **JORGE ESTEBAN PEÑA LOACHAMIN** declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

JORGE ESTEBAN PEÑA LOACHAMIN

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por **JORGE ESTEBAN PEÑA LOACHAMIN**, bajo mi supervisión.

Ing. Víctor Hidalgo Diaz, D.Sc

DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

JORGE ESTEBAN PEÑA LOACHAMÍN

VÍCTOR HUGO HIDALGO DÍAZ

DEDICATORIA

Todo el trabajo y esfuerzo empleado en este proyecto lo dedico a las personas que creyeron en mi desde el principio.

En primer lugar, a mis padres, María y Oswaldo. Quienes siempre me guiaron y apoyaron con sus consejos y oraciones.

A mi hermana Eve, quien sin saberlo ha sido una persona importante en mi desarrollo personal y académico, me enseñaste y guiaste en muchos aspectos sin saberlo; y también a mi sobrino "tocayo" Esteban que lo quiero como a un hijo.

A mi querida Meli, quien estuvo aquí desde el principio; por su amistad, cariño, compañía, paciencia y consejos que hicieron que esta etapa sea más memorable, y me inspiró a ser una mejor persona.

Por último, a mis amigos y familiares que creyeron en mí y me brindaron sus conocimientos y apoyo desde que era niño.

Jorge Peña

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mi director, Ing. Víctor Hidalgo por el apoyo, comprensión y orientación brindadas durante el desarrollo de este proyecto.

A mi compañero de tesis, Santiago por su colaboración, apoyo y amistad a lo largo de la carrera y durante el desarrollo de este proyecto.

También, un agradecimiento especial a los muchachos del "labo" que desde el primer día me ayudaron brindándome sus experiencias y conocimiento para que pueda desarrollar este proyecto y me orientaron siempre que pudieron.

Agradezco a todas las personas que me han apoyado desde el inicio y que creyeron en mí cuando yo mismo lo dudaba, han sido un pilar fundamental para no darme por vencido durante todo este tiempo.

Gracias a Dios, a mis padres y hermana por la paciencia, apoyo, esfuerzos y sacrificios que han hecho por mí, esto permitió que me pueda desenvolver de mejor manera en mis estudios, esto es por y para ustedes.

A Meli por la ayuda, consejos y sobre todo la compañía en esta dura etapa, quien me ha enseñado más cosas de las que pude enseñarle yo mismo; me motivaste a seguir aprendiendo más, me enseñaste a no rendirme ante las dificultades y que cada día puedo aprender algo nuevo.

A mi familia en general que fueron comprensivos y supieron entenderme y apoyarme de todas las maneras posibles. Y a las buenas personas que conocí en la Poli y SEDEMI, quienes me brindaron su amistad, apoyo y consejos tanto académicos como personales.

Por último, a los verdaderos amigos que siempre que pudieron me acompañaron, y siguen aquí desde la escuela, colegio y ahora en esta etapa de universidad que culmina.

Gracias infinitas a todos, fue un placer haber contado con todos ustedes en esta etapa muy importante.

Jorge Peña

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA	II
DEDICATORIA	III
AGRADECIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VII
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
RESUMEN	X
ABSTRACT	XI
1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO	1
1.1 Objetivo general	1
1.2 Objetivos específicos	1
1.3 Alcance	2
1.4 Marco teórico	2
1.4.1 Bomba funcionando como turbina	2
1.4.2 Métodos para seleccionar una bomba centrífuga para operar como turbina.	4
1.4.3 Estado del arte.....	5
1.4.4 Instrumentos de control.....	6
1.5 Benchmarking.	9
2 METODOLOGÍA.....	14
2.1 Casa de la Calidad y especificaciones técnicas	15
2.2 Análisis y Selección de Alternativas	16
2.2.1 Análisis funcional.....	16
2.2.2 Alternativas de solución	18
2.3 Cálculos y selección de equipos	23
2.3.1 Selección de PAT	23

2.3.2	Diseño de tuberías y cálculos de pérdidas	25
2.3.3	Selección de bomba	28
2.3.4	Cálculo de volumen ocupado y diseño del tanque	29
2.3.5	Selección de Sensores.....	30
2.3.6	Selección del generador.....	30
2.3.7	Cálculo del Golpe de Ariete.....	31
2.4	Modelado y análisis de Costos:.....	32
3	ANÁLISIS DE RESULTADOS	33
3.1	Casa de la Calidad y Especificaciones Técnicas.....	33
3.2	Evaluación de Alternativas de Solución.....	33
3.3	Resultados de Cálculo y Selección de Equipos.....	36
3.3.1	Condiciones iniciales de la PAT	36
3.3.2	Diseño de tuberías y cálculos de pérdidas	37
3.3.3	Selección de bomba	44
3.3.4	Cálculo de volumen ocupado y diseño del tanque	47
3.4	Modelado y análisis de Costos.....	48
4	CONCLUSIONES	49
4.1	Recomendaciones	50
4.2	Trabajo futuro.....	50
5	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51
6	ANEXOS	53
	ANEXO I. Casa de la Calidad	53
	ANEXO II. Válvula de mariposa	54
	ANEXO III. Caudalímetro electromagnético	55
	ANEXO IV. Cálculo de los Costos del Sistema	56
	ANEXO V. Cotizaciones obtenidas de los proveedores	61
	ANEXO VI. PLANOS	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Sentido de Flujo en modo bomba y modo turbina.....	3
Figura 2. Valores de coeficientes según la eficiencia de la bomba.....	4
Figura 3. Valores de coeficientes según la velocidad específica de la bomba.....	5
Figura 4. Turbina Francis.	6
Figura 5. Medidor de flujo electromagnético.....	7
Figura 6. Sensor de Revoluciones por Minuto.....	7
Figura 7. Sensor de presión diferencial.	8
Figura 8. Válvula de Mariposa con Actuador.	8
Figura 9. Banco de pruebas para PAT del Instituto Superior Técnico de Lisboa.	10
Figura 10. Banco de pruebas para PAT de la Universidad de Jiangsu, China.....	11
Figura 11. Banco de pruebas para PAT del instituto tecnológico Sardar Vallabhbhai National, India.....	12
Figura 12. Esquema del banco de pruebas del laboratorio de la Universidad del Valle, Colombia.....	13
Figura 13. Diagrama de Flujo para el diseño del Banco de Pruebas.....	14
Figura 14. Nivel cero, estructura funcional del sistema.....	16
Figura 15. Nivel 1, estructura funcional del sistema.....	16
Figura 16. Nivel 2, estructura funcional del sistema.....	17
Figura 17. Esquema de succión del banco de pruebas.....	38
Figura 18. Esquema de impulsión del banco de pruebas.	40
Figura 19. Esquema de descarga del banco de pruebas.....	42
Figura 20. Esquema hidráulico para el balance de energía.....	44
Figura 21. Curva H-Q a diferentes rpm de la bomba impulsora seleccionada.	46
Figura 22. Esquema General del Banco de Pruebas.....	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz Morfológica del Módulo 1.....	20
Tabla 2. Matriz morfológica para el módulo 2.	20
Tabla 3. Matriz morfológica del módulo 3.....	21
Tabla 4. Matriz Morfológica del Módulo 4.....	23
Tabla 5. Especificaciones Técnicas SAER NCB 65-200NA.	24
Tabla 6. Velocidades recomendables de flujo de agua [18]	26
Tabla 7. Especificaciones Técnicas del banco de pruebas para una PAT.....	33
Tabla 8. Matriz Morfológica del Módulo 1.....	34
Tabla 9. Ponderación de criterios del módulo 1.	34
Tabla 10. Evaluación del criterio seguridad del módulo 1.	35
Tabla 11. Evaluación del criterio costo del módulo 1.....	35
Tabla 12. Evaluación del criterio disponibilidad en el mercado del módulo 1.	35
Tabla 13. Evaluación del criterio movilidad del módulo 1.	36
Tabla 14. Resultados de la evaluación de criterios del módulo 1.....	36
Tabla 15. Condiciones de caudal y altura para la PAT.....	37
Tabla 16. Valores de coeficientes de pérdidas para tubería de succión.	38
Tabla 17. Tabla resumen de pérdidas menores en tubería de succión.	39
Tabla 18. Tabla resumen de pérdidas mayores para tubería de succión.	39
Tabla 19. Valores de coeficientes de pérdidas para tubería de impulsión.....	40
Tabla 20. Tabla resumen de pérdidas menores para tubería de impulsión.	41
Tabla 21. Tabla resumen de pérdidas mayores para tubería de impulsión	41
Tabla 22. Valores de coeficientes de pérdidas para tubería de descarga.	42
Tabla 23. Tabla resumen de pérdidas menores en tubería de descarga.....	43
Tabla 24. Tabla resumen de pérdidas mayores para tubería de descarga.....	43
Tabla 25. Tabla resumen de pérdidas mayores y menores del banco de pruebas.	44
Tabla 26. Valores de altura y caudal requeridos.....	45
Tabla 27. Especificaciones técnicas de la bomba impulsora.....	45
Tabla 28. Valores de NPSH disponible y requerido.	46
Tabla 29. Comprobación de presiones en el sistema.	47
Tabla 30. Costo de Implementación del Banco de Pruebas.....	48
Tabla 31. Costos de Materia Prima para el Módulo 1.....	56
Tabla 32. Costos de Fabricación para el Módulo 1.....	57
Tabla 33. Costos de Elementos Normalizados del Módulo 1.	57
Tabla 34. Costo Total del Módulo 1.....	58
Tabla 35. Costo de Elementos Normalizados del Módulo 3.	59

Tabla 36. Costo Total del Módulo 3.....	59
Tabla 37. Costo de Elementos Normalizados del Módulo 4.....	60
Tabla 38. Costo Total del Módulo 4.....	60

RESUMEN

Para el presente estudio, se propone el diseño y modelado de un banco de pruebas para bombas funcionando como turbinas, donde fue necesario proponer una metodología de cálculo a ser utilizada, que parte de la determinación de valores adecuados de altura y caudal de la bomba funcionando como turbina, considerando en el diseño que su construcción se realiza con fines didácticos a través de correlaciones experimentales para determinar valores de altura y caudal a diferentes condiciones de funcionamiento; seguido del diseño de la red de tuberías de acuerdo a la norma ASME B31.3 considerando una velocidad de fluido apropiada junto con el cálculo de pérdidas mayores y menores del sistema; entonces, se procedió a la selección de una bomba que cumpla con los requerimientos de caudal y altura de la bomba funcionando como turbina considerando pérdidas en el sistema; después, se comprobó la integridad del sistema analizando la presión de trabajo y el golpe de ariete existente en el banco de pruebas. La finalización de los cálculos y selección de los equipos permitió el modelado 3D del sistema y el desarrollo de planos para el banco de pruebas, donde se concluye que el modelo propuesto tiene unas dimensiones de 1.34m x 2.07m x 1.89m, con una bomba impulsora de 4HP con un costo de proyecto de \$9116.18 y generará una potencia de 1369 [W]

PALABRAS CLAVE: bomba funcionando como turbina, banco de pruebas, PAT, diseño.

ABSTRACT

For the present study, the design and modeling of a test bench for pumps operating as turbines is proposed. It was necessary to propose a calculation methodology to be used, which starts with determining suitable values for the head and flow rate of the pump operating as a turbine. In the design, it is considered that its construction is carried out for didactic purposes through experimental correlations to determine head and flow rate values under different operating conditions. This is followed by designing the pipe network according to the ASME B31.3 standard, considering an appropriate fluid velocity, along with calculating major and minor losses in the system.

Then, the selection of a pump that meets the flow and head requirements of the pump operating as a turbine was carried out, considering losses in the system. Subsequently, the integrity of the system was verified by analyzing the working pressure and water hammer existing in the test bench. The completion of the calculations and equipment selection allowed for the 3D modeling of the system and the development of blueprints for the test bench. It is concluded that the proposed model has dimensions of 1.34m x 2.07m x 1.89m, with a driving pump of 4HP, project cost of \$9116.18, and will generate a power output of 1369 [W].

KEYWORDS: pump as turbine, test bench, PAT, design.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

El desarrollo de un banco de pruebas dentro de la industria se utiliza para verificar y validar diferentes sistemas mecánicos, garantizándonos un adecuado funcionamiento del equipo y de sus componentes.

La importancia de probar una bomba funcionando como turbina viene de saber que este es un sistema eco amigable que proporciona energía limpia a bajo costo y es accesible para zonas rurales, por lo cual es un recurso con gran potencial a ser estudiado.

La implementación de un banco viene de acuerdo a la necesidad que existe en el laboratorio de mecánica de fluidos de evaluar el rendimiento de una bomba funcionando como turbina, esto se debe a la importancia que se tiene de probar modelos teóricos desarrollados en trabajos de integración curricular previos, por tanto, se realizó el análisis y selección de las alternativas para el diseño de este sistema, junto con el diseño de los elementos mecánicos y selección de sus elementos de control.

En este caso, se verificará el correcto funcionamiento de una bomba funcionando como turbina mediante un banco de pruebas; se realizó el diseño del banco a través del proceso de la ingeniería concurrente junto con el detallado de planos y el análisis de costos.

1.1 Objetivo general

Diseñar un banco de pruebas para bombas funcionando como turbinas para el laboratorio de mecánica de fluidos.

1.2 Objetivos específicos

1. Presentar el estado del arte sobre bancos de pruebas diseñados y construidos para bombas funcionando como turbinas.
2. Elaborar la Casa de la Calidad para determinar las especificaciones técnicas del banco de pruebas.
3. Desarrollar una metodología de cálculo y planos del diseño hidráulico y mecánico del banco de pruebas.
4. Elaborar el modelo 3D de la solución óptima de acuerdo al espacio disponible en el laboratorio.

5. Análisis y selección de instrumentos de control adecuados para el banco de pruebas.
6. Realizar un análisis de costos para la implementación del banco de pruebas.

1.3 Alcance

El presente proyecto tiene como finalidad el análisis y diseño de un banco de pruebas para bombas funcionando como turbinas para el laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Escuela Politécnica Nacional con la finalidad de ampliar la información obtenida del desarrollo de trabajos de investigación anteriores relacionados con las bombas funcionando como turbinas, así como el planteamiento de trabajos futuros para mejorar la comprensión sobre estos equipos tanto para los estudiantes de la Facultad de Ingeniería Mecánica como personal profesional en la industria. Es por ello, que se realizará la selección de alternativas adecuadas para el sistema, el diseño de sus elementos mecánicos y sus elementos de control, y se entregarán planos, metodología de cálculo y análisis de costos para la implementación del equipo.

1.4 Marco teórico

1.4.1 Bomba funcionando como turbina

Denominadas también como “Pump as turbine” (PAT), por sus siglas en inglés, son bombas que operan en sentido inverso. Las máquinas rotacionales de fluidos son completamente reversibles y una bomba puede funcionar de manera efectiva como una turbina. Sin embargo, las prestaciones en ambos modos no son idénticas, aunque la teoría de los fluidos ideales predijera lo mismo. Sin excepción, el caudal y altura óptimos en el modo turbina es mayor que en el modo bombeo. La razón principal de esta diferencia está relacionada con las pérdidas hidráulicas de la máquina [1].

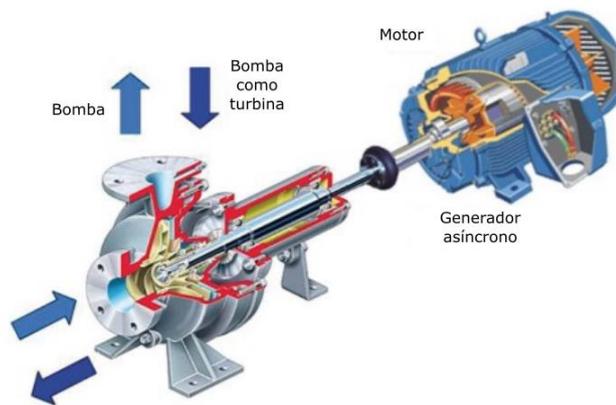


Figura 1. Sentido de Flujo en modo bomba y modo turbina.

(Fuente: [2])

Según Ortiz, las fortalezas de implementar máquinas reversibles para la generación de energía eléctrica en pequeña escala son: su producción nacional, seriada y masiva, la gama de equipos presentes se ajusta a diferentes condiciones de altura, caudal y potencia; el costo por unidad de potencia es sensiblemente menor que el de una solución convencional y su mantenimiento es más sencillo [2]. Aunque, existe gran falta de información de los fabricantes sobre la PAT, son necesarios estudios previos para lograr una selección adecuada de bombas funcionando como turbinas.

Ventajas del uso de PATs

Costos: pueden ser inferiores al 50% de una turbina comparable (especialmente para unidades pequeñas por debajo de 50 kW). Atributo por el cual es un tema importante para proyectos con presupuestos limitados y posibilidades de préstamo [1].

Construcción: la ausencia de un dispositivo de control de flujo, generalmente percibida como un inconveniente, es al mismo tiempo una ventaja ya que la construcción de la bomba resulta ser simple y robusta [1].

Disponibilidad: gracias a su amplia aplicación (riego, industria, suministro de agua), las bombas estándar se encuentran fácilmente disponibles y los fabricantes junto con sus representantes están presentes en todo el mundo [1].

Piezas de repuesto y mantenimiento: las piezas de repuesto se obtienen con mayor facilidad y no requieren equipos ni habilidades especiales para el mantenimiento.

Desventajas del uso de PATs

Sin dispositivo de control hidráulico: requiere incorporar una válvula de control en la línea de tubería para iniciar y detener la PAT. Si la válvula se utiliza para adaptarse a las variaciones estacionales del caudal, las pérdidas hidráulicas de la instalación aumentarán considerablemente [1].

Eficiencia máxima: las eficiencias de PATs son inferiores a las turbinas sofisticadas de rango de rendimiento medio a alto que alcanzan más del 90 %. Las PATs alcanzan eficiencias comparables a las turbinas Pelton o de flujo cruzado [1].

Menor eficiencia a carga parcial: una turbina convencional tiene un control hidráulico eficaz para ajustar la máquina al caudal disponible o al rendimiento requerido. Si los PATs funcionan con un flujo diferente al de diseño, es decir, por debajo de su punto de mejor eficiencia (bep), se producirá una caída relativamente rápida de la eficiencia.

1.4.2 Métodos para seleccionar una bomba centrífuga para operar como turbina.

Diversos autores han propuesto diferentes métodos para pronosticar el funcionamiento de las PATs, en el punto de mayor eficiencia a partir de datos hidrodinámicos, como: altura, caudal y velocidad específica [2]; para determinar las condiciones de caudal, altura y eficiencia se obtienen valores de coeficientes que multiplican a los valores respectivos en modo bomba.

La primera forma implica un método a partir de las características hidráulicas en modo Bomba y algunos de los coeficientes para caudal, altura y eficiencia en función de la eficiencia de la bomba, recopilados por [2] se muestran en la Figura 2:

Referencia	K_Q	K_h	K_η
Stephanoff [1]	$\frac{1}{\sqrt{\eta_B}}$	$\frac{1}{\eta_B}$	1
Mc. Claskey [1]	$\frac{1}{\eta_B}$	$\frac{1}{\eta_B}$	1
Sharma- Williams [2]	$\frac{1}{\eta_B^{0.8}}$	$\frac{1}{\eta_B^{1.2}}$	1
BUTU [1]	$\frac{0.85\eta_B^5 + 0.358}{2\eta_B^5 + 0.205}$	$\frac{1}{0.85\eta_B^5 + 0.358}$	$1 - \frac{0.03}{\eta_B}$
MICI [3]	0,9 - 1,0	1,56 - 1,78	0,75 - 0,80

Figura 2. Valores de coeficientes según la eficiencia de la bomba.

(Fuente:[2])

El mismo autor, recopila información de otros métodos que parten de la velocidad específica en modo bomba, mostrados en la Figura 3:

$$\text{Mijailov: } n_{qb} = \frac{n_B \sqrt{Q_B}}{H_B^{0.75}} ; \text{ donde } n_B \text{ [rpm], } Q_B \text{ [m}^3\text{/s] y } H_B \text{ [m].}$$

$$\text{Audicio: } n_{qb} = \frac{n_B \sqrt{Q_B}}{1673 H_B^{0.75}} ; \text{ donde } n_B \text{ [rpm], } Q_B \text{ [l/s] y } H_B \text{ [m].}$$

$$\text{Carvalo: } n_{qb} = \frac{10^3 n_B \sqrt{Q_B}}{(H_B g)^{0.75}} ; \text{ donde } n_B \text{ [rps], } Q_B \text{ [m}^3\text{/s] y } H_B \text{ [m].}$$

Referencia	K_Q	K_h	K_η
Mijailov [5]	$-0.078n_{qb} + 3.292$	$-0.078n_{qb} + 3.112$	$-0.014n_{qb} + 0.9$
o. Audicio [4]	$1.21n_B^{-0.25}$	$1.21n_B^{-0.25} [1 + (0.6 + \ln m_{qb})^2]^{0.3}$	$0.95n_B^{0.2} [1 + (0.5 + \ln m_{qb})^2]^{-0.25}$
Carvalo [6]	$5 * 10^{-5}n_{qb}^2 - 0.0114n_{qb}^2 + 1.2246$	$-2 * 10^{-5}n_{qb}^2 - 0.0214n_{qb}^2 + 0.7688$	N.A.

Figura 3. Valores de coeficientes según la velocidad específica de la bomba.

(Fuente:[2])

Por último, el autor [2] plantea un método muy aplicado que se da a partir de las condiciones del sitio; este método indica la bomba que más se ajusta para operar en modo turbina a partir de las condiciones de caudal y altura del sitio; posteriormente se selecciona en cartas de fabricantes la bomba que más se aproxima a estos valores y una vez elegida la bomba, se pueden obtener las curvas de funcionamiento en modo turbina.

1.4.3 Estado del arte

Bombas

Las bombas son equipos mecánicos empleados para transferir fluidos de un lugar a otro, la principal función es proporcionar energía a un fluido para desplazarlo a través de un sistema, superando las resistencias que puedan existir en el camino, como la fricción en las tuberías. El principio de funcionamiento se basa en el uso de energía mecánica, para la rotación de un eje, con lo cual incrementa la presión del fluido, al hacerlo, generan un flujo que puede ser utilizado para diversos propósitos, como el suministro de agua, la circulación de líquidos en sistemas de calefacción o refrigeración, la alimentación de reactores químicos, entre otros [3].

Turbinas hidráulicas

Las turbinas hidráulicas son dispositivos que aprovechan la energía cinética y la presión del agua en movimiento para hacer girar un rotor, que acciona un generador eléctrico. Estos

equipos son ampliamente utilizados en la generación de energía hidroeléctrica, donde el agua almacenada en embalses o ríos se canaliza a través de las turbinas para generar electricidad. Aunque pueden ser utilizados como sistemas de riego, de bombeo e industrias que requieren energía mecánica [4].

Francis: es la que más se asemeja a una PAT; se trata de una turbina de flujo mixto como se observa en la Figura 4. El flujo entra en la turbina a través de un conjunto de válvulas guía de entrada ajustables, situadas aguas abajo de una voluta en espiral y una tubería forzada. El agua entra en la turbina a través de una entrada radial y fluye hacia abajo en dirección axial mientras pasa a través del rotor. Las paletas de la turbina Francis tienen forma curva y están diseñadas para aprovechar tanto la energía cinética como la presión del agua. Se utilizan en lugares con una amplia gama de caídas de agua y caudales variables [4].



Figura 4. Turbina Francis.

(Fuente: [4])

1.4.4 Instrumentos de control

La instrumentación electrónica de este sistema exige tener un control de distintas magnitudes físicas presentes en sus componentes como son la presión de trabajo, la velocidad del fluido circulante, el caudal del fluido, la temperatura, las revoluciones por minuto entregadas por la bomba-turbina, el torque de respuesta del sistema, para garantizar un rendimiento aceptable del equipo, por ello, para garantizar una medición precisa de las magnitudes, resulta imprescindible el uso de instrumentos de control que garanticen la lectura correcta de estos valores. Por lo tanto, en los instrumentos de control se pueden mencionar los siguientes [5]:

Medidor de Caudal. – En esta situación, trataremos sobre los instrumentos que miden el volumen del fluido circulante de forma inferencial, específicamente en los medidores por tensión inducida, estos caudalímetros se basan en la ley de Faraday la cual menciona la

técnica utilizada para calcular el flujo dentro de una tubería ocurre cuando el líquido atraviesa la dirección de las líneas magnéticas del instrumento, genera una tensión inducida misma que es proporcional a la velocidad del flujo conductor, determinando el caudal del fluido [5].



Figura 5. Medidor de flujo electromagnético.

(Fuente: [6])

Sensor de Velocidad - Revoluciones por Minuto. –Específicamente en los sensores eléctricos, constan de un estator con imán permanente y un rotor con entrehierro uniforme en donde la tensión recopilada en el estator es proporcional a las revoluciones por minuto. [5].



Figura 6. Sensor de Revoluciones por Minuto.

(Fuente: [7])

Medidor de Presión. – Estos instrumentos miden la fuerza que actúa por unidad de superficie en la tubería, donde es importante mencionar el sensor de presión diferencial

que mide la diferencia de presión entre dos puntos dentro de un sistema [5] el cual se observa en la Figura 7.



Figura 7. Sensor de presión diferencial.

(Fuente: [8])

Válvula de Control. - El instrumento consta del cuerpo y el servomotor; el cuerpo que consta del obturador del paso del fluido y el servomotor que acciona al mismo dentro de la válvula. Específicamente en las válvulas eléctricas, su circuito electrónico compara la tensión de alimentación con la tensión de la señal de control mismas que pueden alcanzar pares de potencia entre los 45 N-M a los 7000 N-m. [5]



Figura 8. Válvula de Mariposa con Actuador.

(Fuente: [9])

Estudios realizados en trabajos previos en la Escuela Politécnica Nacional

- **Castro Bryan en agosto del 2022, desarrolló el proyecto "CREACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO PARA EL ANÁLISIS DE PÉRDIDAS UTILIZANDO PYTHON" [10].** Revisó el análisis de pérdidas en el uso de una bomba funcionando como turbina y comparó la curva de rendimiento dada por el fabricante con la obtenida a partir de la consideración de todas las pérdidas, mecánicas e hidráulicas que se pueden presentar a lo largo de la bomba. De donde concluyó que existe un incremento de la altura cuando funciona como turbina en relación a la altura presentada en el catálogo, además de una alta incidencia negativa en el cálculo de la eficiencia de la turbina por parte de las pérdidas por fuga.
- **Villamarín Edison en agosto del 2022, desarrolló el proyecto "SIMULACIÓN DEL IMPELER Y VOLUTA EN ESTADO ESTABLE UTILIZANDO OPENFOAM" [11].** La simulación partió del dominio computacional generado del escaneo 3D, con la finalidad de obtener resultados precisos al comportamiento del fenómeno físico, planteó un modelo en estado estable con un mallado híbrido y un modelo de turbulencia k- ω SST para obtener la potencia máxima generada en el impeler y evaluar el rendimiento funcionando como turbina. Se presentaron las curvas características de potencia y rendimiento en función del caudal dadas unas ciertas revoluciones, dando un máximo de 60.98% con un caudal de 0.02625[m³/s] y 1440 rpm.
- **Atarihuana Sebastián en enero del 2023, desarrollo el proyecto "ESTUDIAR LA GEOMETRÍA DE IMPULSORES DE BOMBAS PARA QUE FUNCIONEN COMO TURBINAS" [12].** Generó la simulación numérica en OpenFoam para analizar diferentes métodos de optimización del rodete de la bomba SAER NCB 65-200NA. Partió de expresiones empíricas para establecer las condiciones iniciales de funcionamiento de la PAT y con esto calculó la eficiencia total de la PAT, de lo cual obtuvo una eficiencia máxima de 79,53% para un caudal 0,0266 [m³/s] y una velocidad de rotación de 1819 [rpm].

1.5 Benchmarking.

En el benchmarking propuesto se detalla la comparativa entre bancos de pruebas existentes en diferentes universidades, donde se han realizado investigaciones relacionadas con las PATs. Por ende, se va a comparar los principales componentes que conforman los bancos de pruebas que son:

Sistema de distribución de fluido: busca comparar la manera en la que se almacena el fluido, que elementos usan para distribuir el fluido y los principales accesorios que aplican.

Impulsión o alimentación del sistema: su objetivo es determinar la forma en la que se le brinda las condiciones adecuadas a la PAT para su evaluación.

Medición de datos y control del banco de pruebas: busca identificar la manera en la que se miden los datos y los instrumentos de medición que se emplean para ello. Así como identificar el sistema de control del banco de pruebas, si es automático, manual o ambas.

1. Banco de pruebas en CERIS-Laboratorio Hidráulico del Instituto Superior Técnico de la Universidad de Lisboa

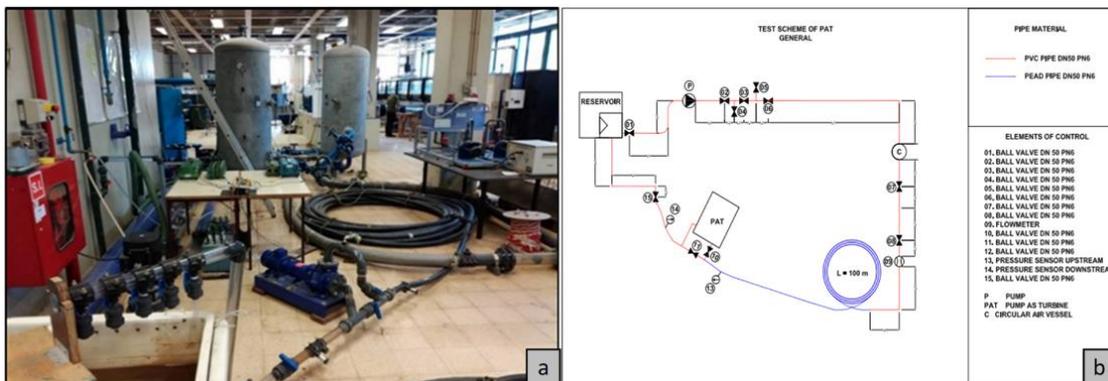


Figura 9. Banco de pruebas para PAT del Instituto Superior Técnico de Lisboa.

(Fuente: [13])

Sistema de distribución de fluido: consta de un depósito para recolectar y suministrar agua a la instalación en bucle, 100 m de tubería de HDPE o 25 m de tubería de PVC para experimentos con PAT radial o axial, respectivamente.

Impulsión o alimentación del sistema: posee una bomba para recircular el flujo, un recipiente de aire para garantizar la presión uniforme en el sistema de gravedad de la tubería.

Medición de datos y control del banco de pruebas: posee dispositivos de medición y control como: caudalímetro electromagnético, válvulas de control de flujo y transductores de presión. Presenta varias válvulas manuales y los sensores conectados a interfaces y computadoras para almacenar los datos.

Varios de los componentes mencionados se pueden apreciar en la Figura 9.

2. Banco de pruebas de la universidad de Jianguo, China

Es un banco de pruebas abierto, ubicado en el centro de inspección técnica y de calidad de maquinaria de fluidos de la Universidad de Jianguo. Este banco se aplicó para realizar un análisis teórico de la relación entre la bomba y el rendimiento de PAT, desarrollado por Sun-Sheng Yanga y Shahram Derakhshan [14]. En esta investigación desarrollaron un método teórico para predecir el rendimiento de PAT utilizando análisis teórico y correlación empírica. Se adquirieron curvas completas de rendimiento de sus modos bomba y turbina. Para verificar la precisión de los métodos de predicción teóricos y numéricos. El banco de pruebas consta de los elementos mostrados en la Figura 10.

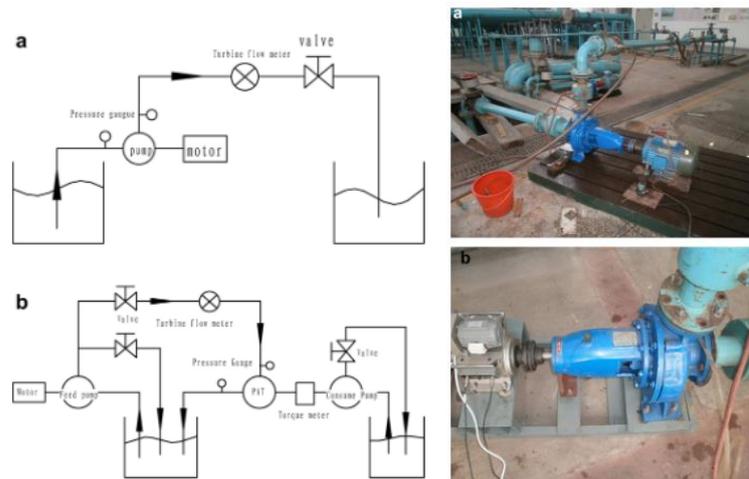


Figura 10. Banco de pruebas para PAT de la Universidad de Jianguo, China.

(Fuente: [14])

Sistema de distribución de fluido: distribución abierta para evaluar en modo bomba, debido a que el reservorio de succión y descarga son diferentes. Distribución cerrada al conectar una bomba impulsora para evaluar la bomba en modo turbina. Posee tuberías de acero embridadas con los respectivos accesorios.

Impulsión o alimentación del sistema: es adaptable para evaluar la bomba en su modo normal y en modo turbina; para el segundo caso se le alimenta mediante otra bomba.

Medición de datos y control del banco de pruebas: posee un torquímetro, un caudalímetro de turbina, manómetros y por medio de una bomba de disipación de energía conectada a la PAT, consume la energía generada por la PAT y regula la velocidad de rotación de esta.

3. Banco de pruebas del Instituto Tecnológico Sardar Vallabhbhai National, India.

Este banco de pruebas del Instituto Tecnológico Sardar Vallabhbhai National, ubicado en India consta de varios componentes que se muestran en la Figura 11.

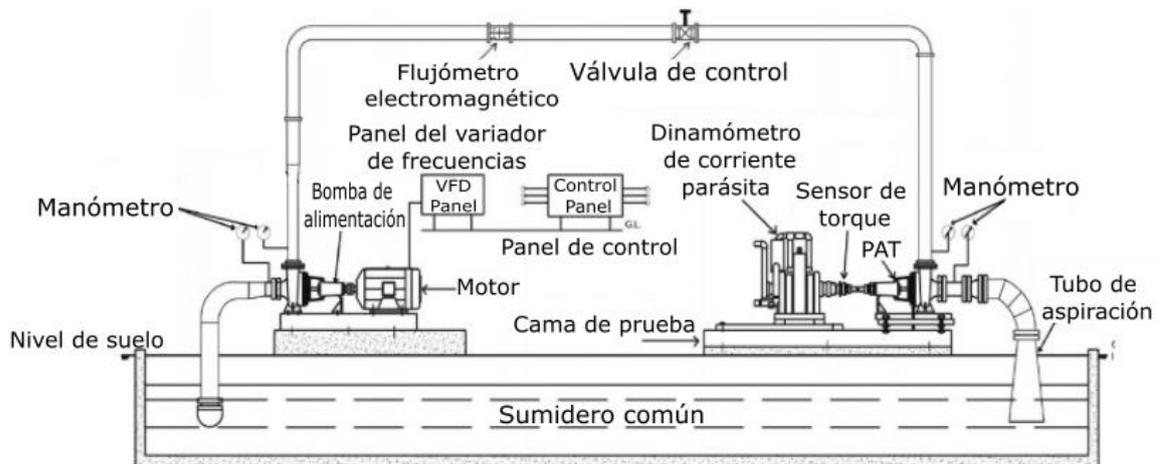


Figura 11. Banco de pruebas para PAT del instituto tecnológico Sardar Vallabhbhai National, India.

(Fuente: [15])

Sistema de distribución de fluido: ocupa un gran espacio y utiliza un sumidero común, el modo de operación es solamente en modo PAT, conectando el sumidero con la bomba y PAT por medio de tuberías de acero. Como parte adicional, cuenta con la presencia de un tubo divergente a la salida de la PAT que permite reducir las pérdidas hidráulicas.

Impulsión o alimentación del sistema: se puede evaluar la bomba solamente en su modo turbina; es alimentada por otra bomba que posee un variador de frecuencia para obtener diferentes casos de medición

Medición de datos y control del banco de pruebas: el control se da gracias a la presencia de un panel de control que esta interconectado con los diversos sensores o equipos, entre los que se incluyen: variador de frecuencia, flujómetro electromagnético, válvula de control, sensor de torque y un dinamómetro de corriente parásita.

4. Banco de pruebas del laboratorio para experimentación e investigación en generación de energía hidroeléctrica, de la Universidad del Valle de Cali, Colombia.

Esta universidad posee un laboratorio totalmente automatizado, que cuenta con un controlador que dispone de una Interfaz hardware/software capaz de operar y monitorear las variables hidráulicas, mecánicas y eléctricas en forma remota a través de Internet [2].

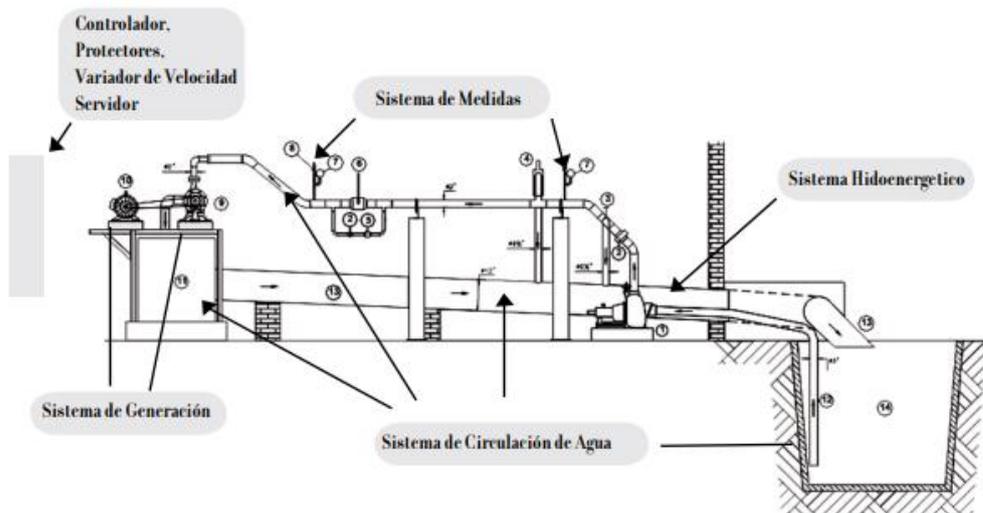


Figura 12. Esquema del banco de pruebas del laboratorio de la Universidad del Valle, Colombia.

(Fuente:[2])

Sistema de distribución de fluido: ocupa un gran espacio, almacena y succiona el agua de un tanque, que recircula el agua; la mayoría de los componentes y tuberías son plásticas.

Impulsión o alimentación del sistema: posee energía hidráulica simulada con una bomba de alta eficiencia.

Medición de datos y control del banco de pruebas: el control se da mediante la variación de la velocidad de giro de la bomba de alimentación y una válvula reguladora de caudal. Los principales sensores que posee son: medidor de presión, caudal, torquímetro y tacómetro. Todos interconectados a un controlador que realiza el registro de las mediciones y control del sistema.

2 METODOLOGÍA

Para el desarrollo del banco, se aplicará el método de la ingeniería concurrente [16]; donde se parte desde el estado del arte hacia el análisis de la casa de la calidad para obtener las especificaciones técnicas del banco de pruebas, con la estructura funcional del sistema, después con su estructura modular y se realizará el análisis de las alternativas de diseño, junto con los cálculos de diseño, diagrama de procesos electrónicos del sistema y el desarrollo de planos y análisis de costos.

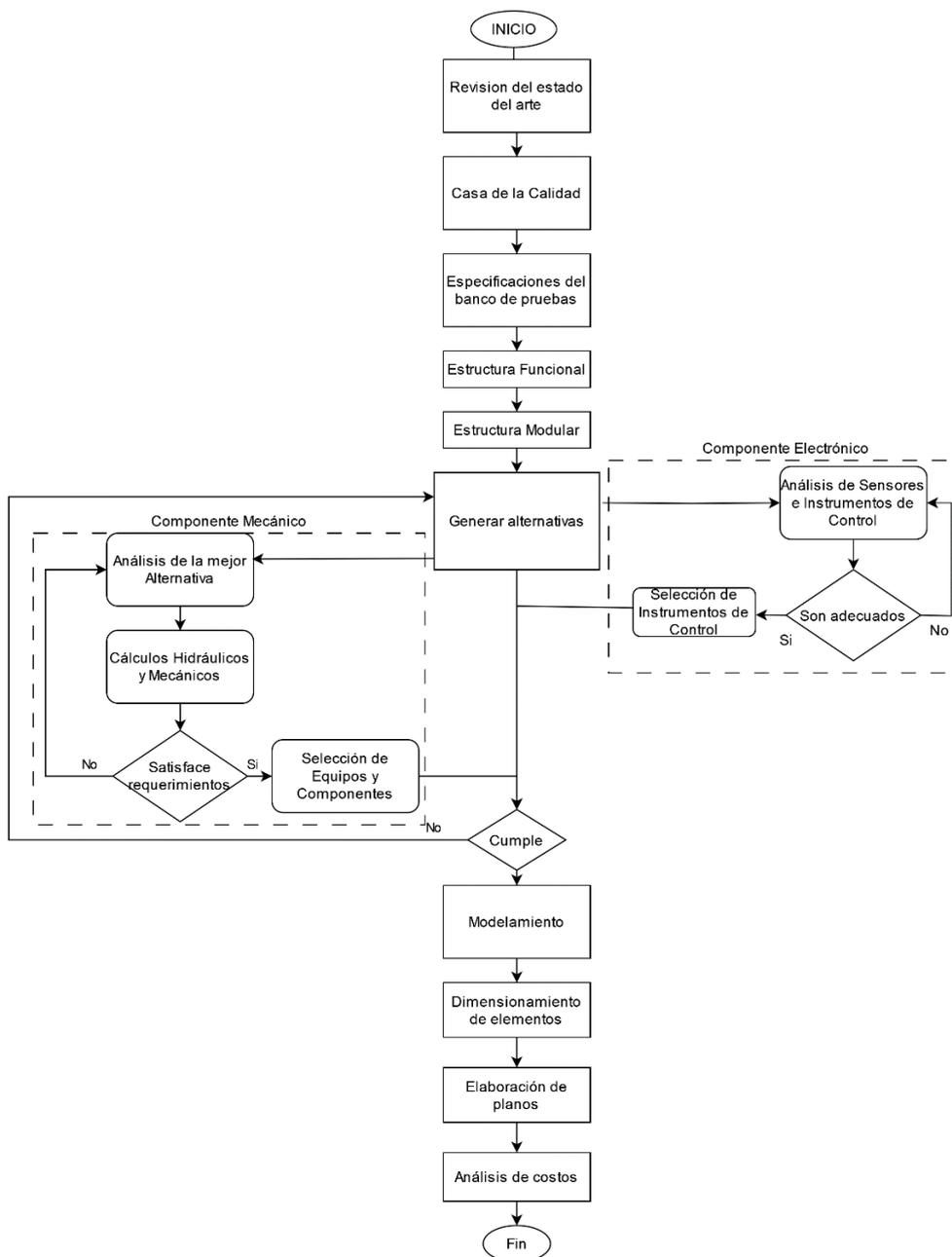


Figura 13. Diagrama de Flujo para el diseño del Banco de Pruebas.

(Fuente: Propia)

La revisión del estado del arte y el Benchmarking presentados en la sección anterior, sirven como base para el desarrollo del diseño del banco de pruebas. Por ello se parte describiendo la metodología de diseño desde la casa de la calidad. Y todos los resultados se presentan y analizan en la sección 3.

2.1 Casa de la Calidad y especificaciones técnicas

Para cumplir con las necesidades del cliente, se toma en cuenta todos los requerimientos mencionados en la voz del usuario y se traducen a la voz del ingeniero, para ello, se utilizó una escala de 0-25 en pasos de 5, donde 0 viene a ser menos importante, y 25 sería el más importante.

Voz del usuario:

- Utilizar la bomba disponible en el laboratorio.
- Adaptarse de acuerdo con las condiciones de espacio del laboratorio.
- Medición de datos a diferentes condiciones de funcionamiento.
- Probar experimentalmente bajo condiciones de modelos teóricos previamente desarrollados.
- Modalidad de control sencilla.
- Generación de electricidad.
- Fácil movilidad.

Voz del ingeniero:

- Uso de una Bomba SAERNCB 65-200NA funcionando como turbina.
- Espacio útil de 3m x 1,80m.
- Control de las condiciones de funcionamiento de la PAT.
- Medición de presión, caudal y revoluciones por minuto del sistema.
- Uso de un alternador para generación de electricidad.
- Montaje y desmontaje sencillo.

La casa de la calidad desarrollada se muestra en el Anexo I; del análisis de la casa de la calidad se obtuvieron las especificaciones técnicas, que se muestran en la sección 3.

2.2 Análisis y Selección de Alternativas

2.2.1 Análisis funcional

Para el análisis funcional se clasificó la funcionalidad del banco de pruebas según niveles que detallan de mejor manera como funcionará el banco de pruebas.

Función global y niveles

Nivel 0: En este nivel se describe la función principal que va a desarrollar el banco de pruebas a diseñarse, el cual se puede observar en la Figura 14.

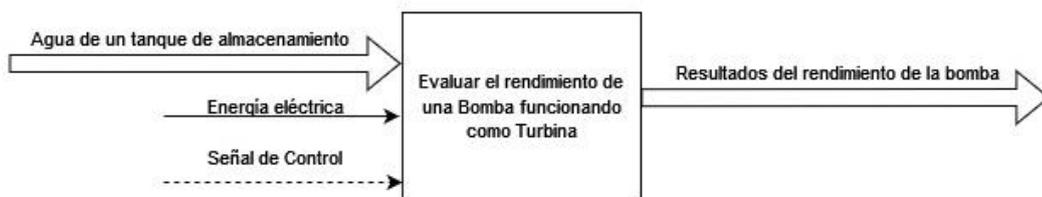


Figura 14. Nivel cero, estructura funcional del sistema.

(Fuente: Propia)

Nivel 1: Este nivel corresponde a las subfunciones que va a desarrollar el banco de pruebas para cumplir con su función principal, se describen los módulos que componen el sistema, como se muestra en la Figura 15.

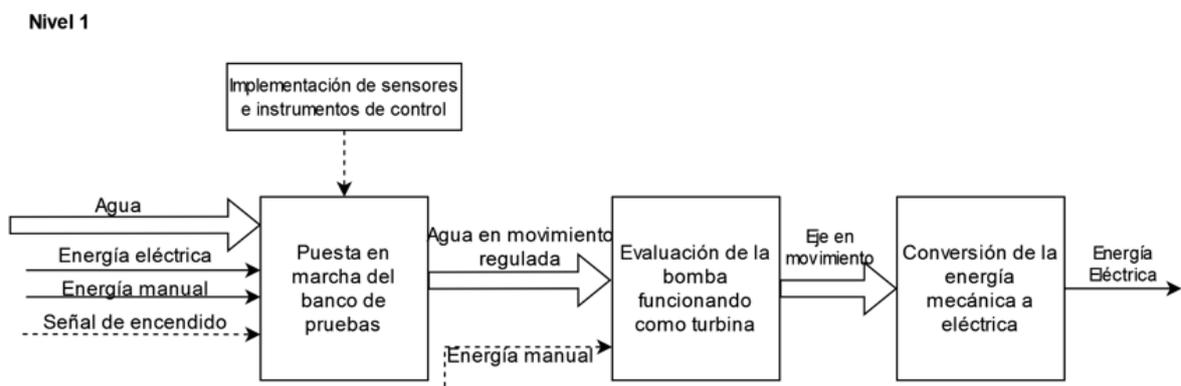


Figura 15. Nivel 1, estructura funcional del sistema.

(Fuente: Propia)

Nivel 2: Este nivel describe las subfunciones de cada módulo en forma técnica detallando en mayor medida las tareas de cada módulo de una forma más clara y específica, el cual se observa en la Figura 16.

Nivel 2

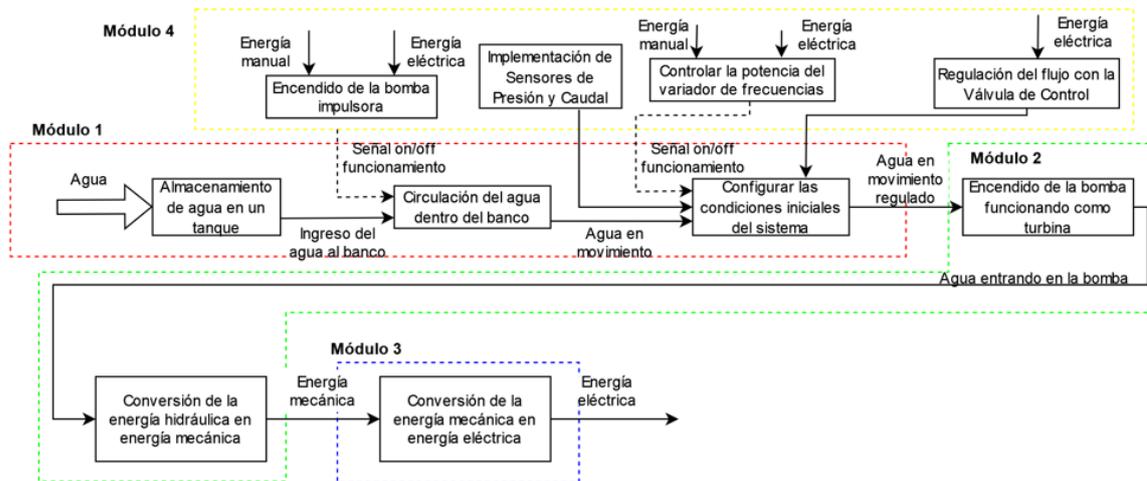


Figura 16. Nivel 2, estructura funcional del sistema.

(Fuente: Propia)

Definición y funciones de módulos:

- Módulo 1: Requerimientos para el funcionamiento de la PAT.
 - Almacenamiento y suministro de agua.
 - Soporte y anclaje de equipos
 - Circulación del agua
 - Configurar las condiciones iniciales.
- Módulo 2: Operación de la bomba funcionando como turbina.
 - Bomba funcionando como turbina
- Módulo 3: Generación de energía eléctrica.
 - Conversión de la energía mecánica en eléctrica
- Módulo 4: Medición y Control del Banco de Pruebas.
 - Control del variador de frecuencias
 - Control de la válvula de control de flujo
 - Medición de presiones
 - Medición de revoluciones por minuto
 - Medición de flujo

- Selección de una interfaz de control.

2.2.2 Alternativas de solución

En esta sección se presenta las diversas alternativas a considerar para cada función de los módulos propuestos anteriormente, por medio de las matrices morfológicas de los módulos. La elección de la mejor alternativa para cada módulo se analiza en la sección 3, para lo cual se evaluó según criterios técnicos de importancia y se propuso la mejor solución virtual para el diseño del banco de pruebas.

Modulo 1: Requerimientos para el funcionamiento de la PAT.

Almacenamiento y suministro de agua

El almacenamiento y suministro de agua debe ser efectuado obligatoriamente por un tanque, debido a la limitación de espacio y para evitar gasto de agua, ya que con esto el fluido se puede recircular.

- **Tanque plástico**
- **Tanque metálico**

De las opciones propuestas, resulta más conveniente el uso de un tanque metálico debido a que es posible fabricarlo y adecuarlo al tamaño requerido y según el espacio disponible en el laboratorio, así como el hecho de que el material puede dar soporte de mejor manera a la tubería metálica.

Soporte y anclaje de equipos

Es de gran importancia fijar y montar los equipos, accesorios, sensores de medición y elementos eléctricos y de control que se seleccionen en algún lugar o zona compacta y que sea fácil de montar y desmontar para futuros cambios o mantenimientos del banco de pruebas.

- **Estructura de acero**
- **Empotramiento**

La opción de aplicar una estructura metálica sobre la cual se puedan acoplar los equipos y sensores es aplicada debido a la facilidad de montaje y desmontaje del banco de pruebas. Con esto se evitan los grandes inconvenientes a la hora de querer hacer cambios o

reubicaciones en el laboratorio y, del mismo modo, se facilita el mantenimiento del banco de pruebas.

Circulación del agua

La circulación del agua a través del banco de pruebas se realiza a través de tuberías de circulación y accesorios, de los cuales se pueden elegir los siguientes materiales:

- **PVC**
- **Hierro Galvanizado**
- **Cobre**

Las tuberías de hierro presentan ventajas de buena resistencia a la corrosión y durabilidad. Lo mejor de este tipo de tuberías es el montaje y desmontaje en caso de ser roscada o bridada, debido al requerimiento de facilidad de montaje y desmontaje, es la opción más adecuada.

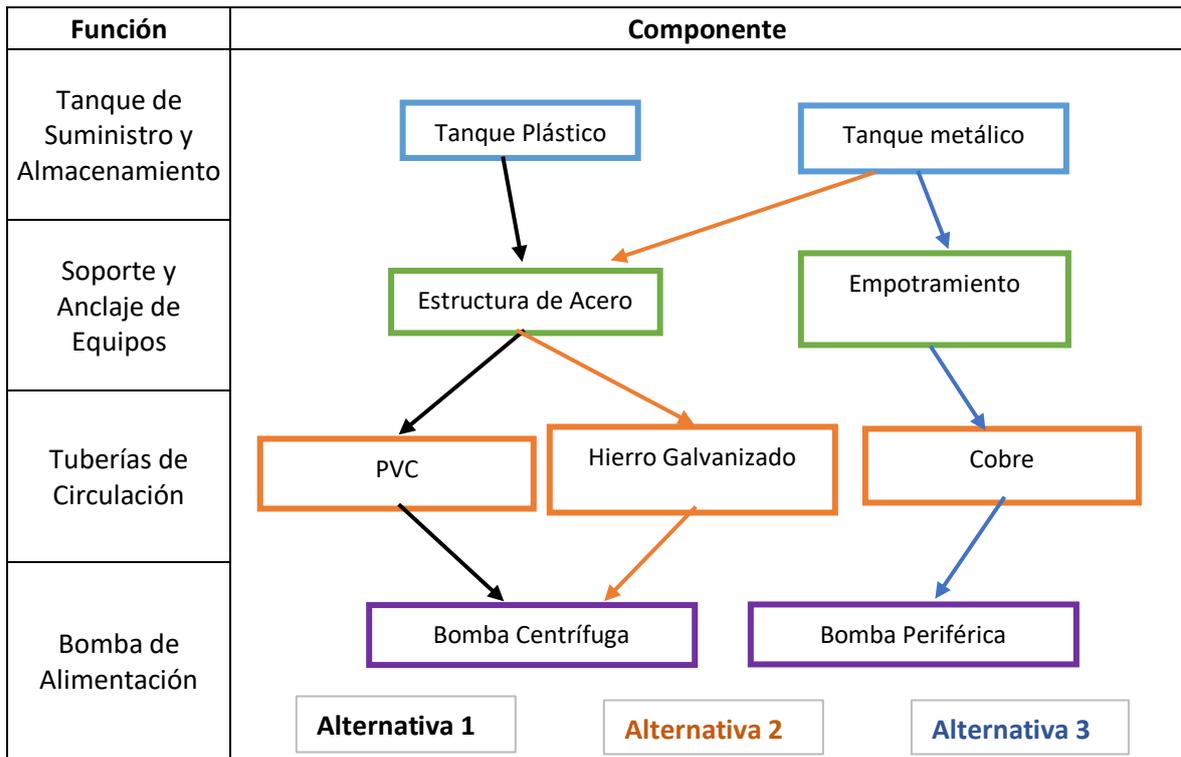
Configurar las condiciones iniciales

Las condiciones iniciales se refieren a las condiciones de presión y caudal de entrada a la PAT, las cuales serán modificadas y controladas por el sistema de control para dar diferentes condiciones a la PAT y realizar las mediciones para el procesamiento de datos.

- **Bomba Centrífuga**
- **Bomba Periférica**

Las condiciones pueden ser dadas por una caída de agua de la altura adecuada o con el uso de bombas. Debido a que no es posible tener una caída de agua en el laboratorio, se elegirá una electrobomba para poder variar las condiciones requeridas por la PAT. La opción elegida será el uso de una bomba centrífuga debido a la facilidad, versatilidad y capacidad de este tipo de bombas, además de ser las más utilizadas en la industria y adaptarse a los requerimientos del banco de pruebas.

Tabla 1. Matriz Morfológica del Módulo 1.



Modulo 2: Operación de la bomba funcionando como turbina.

Bomba Funcionando como Turbina

En esta función se elige la bomba que funcionará como turbina para la generación de electricidad; para el diseño solicitado del laboratorio, se dispone de una bomba seleccionada con la cual se realizaron trabajos de investigación previos en la universidad. Por ello, la bomba seleccionada se muestra en la Tabla 2.

- **SAERN CB 65-200NA**

Tabla 2. Matriz morfológica para el módulo 2.

Función	Componente
Bomba funcionando como turbina	

Modulo 3: Generación de energía eléctrica.

Conversión de la energía mecánica en eléctrica

Esta función consiste en la generación de electricidad aplicando la rotación y torque del eje de la PAT, una opción adecuada para este módulo sería el uso de un alternador para la conversión de la energía mecánica en eléctrica.

- **Generador o Alternador**

Tabla 3. Matriz morfológica del módulo 3.

Función	Componente
Alternador Monofásico 6 polos 60Hz	Alternador Monofásico 6 polos 2.2kW 3HP CME Tipo 112Mb 60Hz

Modulo 4: Control, Medición y Visualización del Banco de Pruebas.

La función de este módulo es controlar todos los dispositivos electrónicos que se utilizarán en el banco de pruebas; mediante el control se buscará llegar a los diferentes puntos de operación de la bomba funcionando como turbina. Se realizará la medición, visualización y almacenamiento de datos para verificar el comportamiento de la bomba en modo turbina. Las variables que se van a medir son: caudal, presión de entrada, presión de salida y velocidad de rotación del eje. Estas variables han sido seleccionadas debido a que con ellas se puede obtener la potencia hidráulica que entrega la PAT y al convertir esta energía en eléctrica se puede determinar la eficiencia de la PAT.

El control es importante debido a que se desea estudiar el comportamiento de la PAT en diversos casos; para esto el control se basa fundamentalmente en variar la frecuencia de la bomba impulsora y variar el caudal que circula por el sistema y por ende por la PAT.

Control de la variación de frecuencias

Un variador de frecuencias debe ser utilizado para variar la fuente de alimentación eléctrica del banco de pruebas, así se cambian las condiciones de operación del motor de alimentación de la bomba impulsora lo que hace posible que exista un control sobre el sistema.

- **Variador 3.7kW 200~240VAC**

Instrumento de control - Válvula de Flujo

Este instrumento de control se utiliza como un bucle de regulación para el operador, consta del cuerpo principal que permite el paso del fluido y de un servomotor que acciona la apertura o cierre de la válvula.

- **Electroválvula Solenoide**
- **Válvula de Mariposa EuroFLY con Actuador J4C Multivoltaje**

Medición de presiones

La obtención del valor de la presión que se ejerce dentro del banco de pruebas es una de las magnitudes principales que se deben adquirir ya que se requieren para la obtención de otras magnitudes de la PAT.

- **Transmisores Comerciales Wika Tipo UT-10/UT-11**
- **Sensor de Presión Nidec PA-850**

Medición de Revoluciones por Minuto

Las rpms son necesarias para la selección de otros componentes del banco, ya sea en el caso del generador que va a ser conectado en el sistema.

- **Tacómetro Láser Digital DT-2234C**
- **Encoder Absoluto Acuro AX65**
- **Sensor de Velocidad 8-24DVC Encoder 5A407**

Medición de Flujo

Se requiere medir el flujo porque proporciona datos cruciales para validar el diseño, identificar fallas o ineficiencias y verificar que el sistema cumple con los datos específicos.

- **Sensor Tipo Paleta Series SF Finetek**
- **Sensor de Flujo VSR-3**
- **Flujómetro Electromagnético EPD 30 Finetek**

Interfaz de Control

Este es un componente importante ya que supervisa las condiciones de funcionamiento de forma precisa del banco de pruebas.

- Delta PLC DVP ES2-EX2
- PLC Modelo SR DC12-24V

Tabla 4. Matriz Morfológica del Módulo 4.

Función	Componente
Controlador 1: Variador de Frecuencias	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; text-align: center;">VARIADOR 3.7kW 200~240VAC</div>
Controlador 2: Válvula de Control	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid green; padding: 5px; text-align: center;">Electroválvula Solenoide SumiWater</div> <div style="border: 1px solid green; padding: 5px; text-align: center;">Válvula de Mariposa EuroFLY con Actuador J4C Multivoltaie</div> </div>
Sensor de Presión	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; text-align: center;">2 transmisores Comerciales WIKA Tipo: UT-10/UT-11</div> <div style="border: 1px solid red; padding: 5px; text-align: center;">Sensor de Presión Nidec PA-850</div> </div>
Sensor de Revoluciones por minuto	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid yellow; padding: 5px; text-align: center;">Tacómetro Láser Digital DT-2234C</div> <div style="border: 1px solid yellow; padding: 5px; text-align: center;">Encoder Absoluto Acuro AX65</div> <div style="border: 1px solid yellow; padding: 5px; text-align: center;">Sensor de Velocidad 8-24VDC Encoder 5A407</div> </div>
Sensor de Flujo	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid orange; padding: 5px; text-align: center;">Sensor Tipo Paleta Series SF Finetek</div> <div style="border: 1px solid orange; padding: 5px; text-align: center;">Sensor de Fluio VSR-3</div> <div style="border: 1px solid orange; padding: 5px; text-align: center;">Flujómetro Electromagnético EPD 30 Finetek</div> </div>
Interfaz de Control	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="border: 1px solid purple; padding: 5px; text-align: center;">Delta PLC DVP ES2-EX2</div> <div style="border: 1px solid blue; padding: 5px; text-align: center;">PLC MODELO SR DC12-24V</div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-around; margin-top: 10px;"> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; text-align: center; color: orange;">Alternativa 1</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; text-align: center; color: blue;">Alternativa 2</div> <div style="border: 1px solid gray; padding: 5px; text-align: center; color: black;">Alternativa 3</div> </div>

Los resultados de la evaluación de las alternativas de solución permiten obtener la mejor alternativa con la cual se partió como base para los cálculos hidráulicos y la selección de equipos, metodología que se muestra a continuación.

2.3 Cálculos y selección de equipos

2.3.1 Selección de PAT

La PAT seleccionada se encuentra en el laboratorio de la Escuela Politécnica Nacional para la cual se diseñó el banco de pruebas. La bomba es: SAER NCB 65-200NA. La cual posee las especificaciones técnicas mostradas en la Tabla 5, dadas por el fabricante. Es

necesario caracterizar a esta bomba en su funcionamiento en modo turbina; por ello se aplicó la metodología presentada por [17] para conocer las características de caudal y altura requeridas para tener el punto de máxima eficiencia de la PAT, los cuáles se calculan a partir del punto de máxima eficiencia en el modo bomba. Adicional a esto se realizó el cálculo para puntos de máxima eficiencia a velocidades de giro menores en el modo bomba para tener un rango de caudales y cabezas disponibles para observar y registrar el comportamiento de la PAT en diferentes circunstancias.

Tabla 5. Especificaciones Técnicas SAER NCB 65-200NA.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS PAT		
Serie	SAER NCB 65-200NA	
Dimensiones	80X65X200	
Velocidad [rpm]	1800	
Caudal	Mínimo [l/min]	583
	Nominal [l/min]	1050
	Máximo [l/min]	1870
Preponderancia	Mínimo [m]	23,9
	Nominal [m]	21,8
	Máximo [m]	14,8
H (Q=0) [m]	24,5	
NPSH 3%	4,71	
Presión máxima de trabajo [bar]	2,49	
Potencia sobre el eje [hp]	6,37	
Eficiencia	80,8	
Máxima potencia absorbida [hp]	7,4421	

En primer lugar, los autores proponen los factores de conversión C_Q y C_H que relacionan la capacidad y altura en modo bomba y turbina, partiendo de la velocidad específica n_{sp} de la bomba que se muestran en la Ecuación 1, la Ecuación 2 y Ecuación 3.

$$n_{sp} = \frac{n_p \sqrt{Q_P}}{H_P^{\frac{3}{4}}} \quad (1)$$

Ecuación 1. Velocidad específica de la bomba.

$$C_Q = \frac{Q_T}{Q_P} = 0.00029 n_{sp}^2 - 0.02771 n_{sp} + 2.01648 \quad (2)$$

Ecuación 2. Factor de conversión de caudal de la bomba.

$$C_H = \frac{H_T}{H_P} = -0.00003 n_{sp}^3 + 0.00440 n_{sp}^2 - 0.20882 n_{sp} + 4.64293 \quad (3)$$

Ecuación 3. Factor de conversión de la altura de la bomba.

$$n_{sp} = 0.9867 n_{st} + 5.2818 \quad (4)$$

Ecuación 4. Relación de velocidad específica de la bomba y PAT.

$$n_{st} = \frac{n_t \sqrt{Q_T}}{H_T^{\frac{3}{4}}} \quad (5)$$

Ecuación 5. Velocidad específica en modo turbina.

Donde:

n_{sp} = velocidad específica en modo bomba

n_p = velocidad de rotación de la bomba [rpm]

Q_p = caudal de la bomba [m^3/s]

H_p = altura de la bomba [m]

C_Q = factor de caudal

C_H = factor de altura

Q_T = caudal en modo turbina [m^3/s]

H_T = altura en modo turbina [m]

n_t = velocidad de rotación en modo turbina [rpm]

2.3.2 Diseño de tuberías y cálculos de pérdidas

La selección del diámetro de tubería se hizo de tal manera que no exceda demasiado la velocidad recomendada para instalaciones de tuberías de conducción de agua; con esto se evita tener pérdidas muy grandes en el circuito de tuberías. El caudal es conocido y los valores recomendados de velocidad se muestran en la Tabla 6 según [18].

Además, se realizaron los cálculos considerando una reducción del caudal debido a la presencia de una válvula de control en el sistema que permitirá variar este parámetro y se considerará hasta un cierre máximo de la mitad de la válvula.

**Reasonable Velocities
for the Flow of water through Pipe**

Service Condition	Reasonable Velocity
Boiler Feed2.4 to 4.6 metres per second
Pump Suction and Drain Lines1.2 to 2.1 metres per second
General Service1.2 to 3.0 metres per second
City	to 2.1 metres per second

Tabla 6. Velocidades recomendables de flujo de agua [18]

Considerando la relación de la ecuación 6:

$$V = \frac{Q}{A} \tag{6}$$

Ecuación 6. Velocidad dentro de una tubería en función del caudal.

El sistema de diseño propuesto se realizó en base a la normativa ASME B31.3 para las tuberías a presión, la normativa EN-1092-1 para la selección de bridas y accesorios bridados y la normativa ASME B31.3 para el diseño de tuberías a presión, así como el diseño de las juntas soldadas donde en el primer caso selecciona a partir de la presión interna de la tubería y en el segundo selecciona en base a su espesor.

Se verifica en las tablas de resumen de pérdidas los valores de velocidad del agua, a partir del caudal y área transversal de tubería. Una vez que se seleccione la tubería adecuada y los accesorios necesarios, se divide el diseño de tuberías en tres secciones de relevancia: tubería de succión, tubería de impulsión y tubería de descarga. Para estas secciones se calculó por separado los valores de pérdidas por fricción y pérdidas por accesorios, denominadas “pérdidas mayores” y “pérdidas menores”, respectivamente.

Cálculo de pérdidas menores:

Este cálculo se realizó según la Ecuación 7, para la cual es necesario determinar los valores de coeficientes de pérdidas según los accesorios presentes, dichos coeficientes se obtuvieron de [19] o en su defecto de los catálogos del equipo seleccionado.

$$h_m = \sum_i^n K_i \left(\frac{V_i^2}{2g} \right) \tag{7}$$

Ecuación 7. Pérdidas menores en tubería.

Donde:

$$h_m = \text{pérdidas menores [m]}$$

K_i = coeficiente de pérdidas singulares

V_i = velocidad

g = gravedad

Cálculo de pérdidas mayores:

Se realizó el cálculo a través de la Ecuación 8 la ecuación de Darcy, la Ecuación 9 del coeficiente de pérdidas de Colebrook y la Ecuación 10 el número de Reynolds, como se explica en la metodología de [19]:

$$h_l = f \frac{L}{D} \left(\frac{V^2}{2g} \right) \quad (8)$$

Ecuación 8. Ecuación de Darcy.

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log \left[\frac{\varepsilon}{3.7D} - \frac{2.51}{Re\sqrt{f}} \right] \quad (9)$$

Ecuación 9. Coeficiente de pérdidas de Colebrook.

$$Re = \frac{DV}{\nu} \quad (10)$$

Ecuación 10. Número de Reynolds.

Donde:

h_l = pérdidas mayores [m]

L, D = longitud, diámetro interno de tubería [m]

V = velocidad [m/s]

g = gravedad

f = coeficiente de fricción

ε = rugosidad absoluta [m]

ν = viscosidad cinemática [m^2/s]

Se calcularon las pérdidas mayores para los caudales propuestos, considerando las siguientes condiciones del fluido necesarias.

$\varepsilon = 0,00015$ [m]

$\nu = 1,005 * 10^{-6}$ [m^2/s]

Este cálculo nos dará los valores totales de pérdidas en las tuberías del banco de pruebas, por ello, se debe realizar un balance de energía al sistema para determinar la fuerza que debe suministrar la bomba impulsora para realizar una adecuada selección de bomba.

Para el diseño de las tuberías, se selecciona de acuerdo al espesor mínimo de las tuberías de acuerdo a las normas ASME B31.3 que define el espesor mínimo requerido para tuberías a presión interna de acuerdo a la Ecuación 11, donde considera las tolerancias mecánicas (c) que al ser maquinados los elementos lo define en 0.5mm.

$$t_m = t + c \quad (11)$$

Ecuación 11. Espesor mínimo requerido para diseño de tubería.

$$t = \frac{PD}{2(SEW + PY)} \quad (12)$$

Ecuación 12. Espesor de diseño para tuberías a presión.

Donde:

P = Presión interna de trabajo.

D = Diámetro externo de la tubería.

S = Valor del esfuerzo del material.

E = Factor de calidad del material utilizado.

W = Factor de resistencia de la junta soldada.

Y = Coeficiente de diseño según la temperatura.

Varias de los coeficientes obtenidos son de acuerdo a la norma ASME B31.3 para tuberías a presión. Por otra parte, para las juntas soldadas, la norma menciona que menciona si el espesor del elemento es menor a 6mm, entonces el cordón de soldadura se realiza de acuerdo al espesor del material, en cambio si es mayor a 6mm el espesor de la tubería el cordón de soldadura es igual a 6mm.

2.3.3 Selección de bomba

Una vez que se han establecido las pérdidas y la altura que necesita suministrar la bomba para satisfacer las condiciones de la PAT, primero se realiza un balance de energía. Para ello se considera el esquema hidráulico de la instalación. Y se aplica la Ecuación 13 la ecuación de Bernoulli:

$$\frac{V_1^2}{2g} + \frac{P_1}{\rho g} + z_1 + H_{Bi} - H_T - h_t = \frac{V_2^2}{2g} + \frac{P_2}{\rho g} + z_2 \quad (13)$$

Ecuación 13. Ecuación de Bernoulli [19].

Comprobación de NPSH

Uno de los parámetros importantes cuando se selecciona una bomba es determinar la cabeza neta positiva de succión (NPSH); para evitar que se produzca el fenómeno de cavitación, por ello se debe cumplir que:

$$NPSH_{disp} \geq NPSH_{req}$$

$$NPSH_{disp} = \frac{p_a - p_v}{\gamma} - h_{ts} - h_{nva} - \frac{V_s^2}{2g} \quad (14)$$

Ecuación 14. NPSH del sistema [19].

Donde:

p_a = presión atmosférica absoluta = 71941 [Pa]

p_v = presión de vapor absoluta = 3227 [Pa]

γ = peso específico = 9778 [N/m³]

h_{ts} = pérdidas en tubería de succión [m]

h_{nva} = altura del nivel de agua = -0,5 [m]

V_s = velocidad a la entrada de la bomba [m/s]

Comprobación de presión máxima en tuberías del sistema.

Se realizó para determinar si la tubería seleccionada fue adecuada y soportará la presión de trabajo. Por ello, se realizó el balance de energía de la Ecuación 13, en las partes consideradas críticas del sistema y se verificó que no exceda los límites permitidos por las tuberías considerando las diferentes normas utilizadas en el diseño de tuberías a presión.

2.3.4 Cálculo de volumen ocupado y diseño del tanque

La recirculación de agua se obtendrá al implementar un tanque en el banco de pruebas, el cual permite almacenar agua y distribuirla nuevamente. El volumen se calculó estimando el volumen de agua que ocuparán las máquinas y tuberías, para conocer la mínima cantidad de agua requerida y evitar el vaciado del sistema. Con eso se diseñó para un valor

mayor de volumen que asegura que nunca se vacíen las tuberías y siempre circule el fluido, evitando posibles daños en la bomba y PAT.

2.3.5 Selección de Sensores

Para la selección de sensores, se realiza considerando las diferentes características de acuerdo a cada sensor y por los proveedores de los fabricantes, los cuáles son los siguientes:

- La disponibilidad en el mercado.
- Los rangos de operación del sistema.
- La precisión del instrumento.
- El diámetro de la tubería.
- La topología de la tubería.
- El sistema de comunicación de los componentes.
- La potencia del motor.
- La señal de salida del controlador.
- Las características del fluido.
- La cantidad de entradas y salidas analógicas y digitales.

2.3.6 Selección del generador

Para seleccionar un generador es necesario conocer la potencia que puede entregar una turbina y su velocidad de rotación. Se consideró el rendimiento de la turbina obtenida del trabajo de simulación [12] el cuál se realizó como trabajo de integración curricular previo y es específicamente para esta bomba; de ello se muestra la ecuación que permite obtener la potencia hidráulica que entrega la PAT.

$$P_T = \rho g H_T Q_T \eta \quad (15)$$

Ecuación 15. Potencia de la turbina.

Donde,

$$\rho = \text{densidad} = 997 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

$$g = \text{gravedad [m/s}^2\text{]}$$

$$H_T = \text{altura [m]}$$

$$Q_T = \text{caudal [m}^3\text{/s]}$$

$$\eta = \text{rendimiento} = 79,53\%$$

Además, se debe considerar el número de polos que debe tener el generador seleccionado para que pueda ser implementado con la PAT, como se muestra en la Ecuación 16 así como la velocidad de rotación [20]:

$$n_s = \frac{120 * f}{2p} * (1 - s) \quad (16)$$

Ecuación 16. Velocidad de rotación del generador.[21]

Siendo:

$f =$ Frecuencia (Hz)

$2p =$ número de polos

$s =$ deslizamiento

Posteriormente, se desarrolló un diagrama de procesos que esquematiza la instrumentación necesaria para el banco de pruebas.

2.3.7 Cálculo del Golpe de Ariete.

De acuerdo a[22], se puede determinar el golpe de ariete para tuberías calculando la velocidad de propagación de las ondas dentro de la tubería, considerando el líquido utilizado es agua, se determina a través de la siguiente ecuación:

$$a = \frac{9900}{\sqrt{48300000 + \frac{10^6 D}{E * e}}} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (17)$$

Ecuación 17. Celeridad del agua en tuberías [22]

Donde:

$a =$ celeridad del fluido [m/s]

$E =$ módulo de elasticidad de la tubería [kg/cm²]

$D =$ diámetro interno [mm]

$e =$ espesor [mm]

Con la celeridad obtenida es posible obtener el tiempo de cese de circulación aplicando coeficientes de ajustes determinados experimentalmente, la longitud y velocidad del fluido, así como la altura manométrica de la tubería. Además, se debe encontrar la longitud crítica de la tubería y compararla con la longitud real de la tubería, para determinar la aplicabilidad de la fórmula de Allievi mostrada en la Ecuación 19.

$$T = C + \frac{KLV}{gH_m} \quad (18)$$

Ecuación 18. Tiempo de cese de circulación del fluido.

$$L_c = \frac{aL}{2}$$

$$P_g = \frac{a * V}{g} \quad (19)$$

Ecuación 19. Fórmula de Allievi para el golpe de ariete.

Con la última ecuación se obtuvo el valor de golpe de ariete, al cual se le debe sumar el valor de la presión interna de la tubería. Y verificar que se encuentre en los límites permitidos para la tubería seleccionada.

2.4 Modelado y análisis de Costos:

La parte final de la metodología consistió en seleccionar y cotizar las máquinas e instrumentos que se emplearán en el banco de pruebas. El análisis de costos consistió en separar los costos por los módulos y componentes presentados anteriormente, presentando costos de elementos normalizados, materia prima y mano de obra, en caso de requerirla.

Se finalizó con el modelado 3D del banco de pruebas, un esquema de proceso para la conexión electrónica y el desarrollo de planos para su futura construcción.

3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Esta sección se encargará de explicar los módulos 1 y 2 referentes a la parte mecánica e hidráulica del diseño del banco de pruebas.

3.1 Casa de la Calidad y Especificaciones Técnicas

Se obtuvo la casa de la calidad que se muestra en el Anexo I. Centrándose solo en la parte hidráulica y mecánica, se observó que son requeridas las siguientes especificaciones de gran importancia para el banco de prueba: se tiene al espacio disponible, la movilidad del sistema y la potencia requerida.

Variables de gran importancia:

- Espacio Disponible y Movilidad.
- Potencia requerida.

En la Tabla 7 se muestran las especificaciones técnicas del banco de pruebas, obtenidas a partir de la casa de la calidad y la cual incluyen los componentes mecánicos e hidráulicos.

Tabla 7. Especificaciones Técnicas del banco de pruebas para una PAT.

Empresa Cliente: Laboratorio Mecánica de Fluidos		Producto: Banco de Pruebas para bombas		Fecha inicial: 23/5/2023
Diseñadores: Cisneros Santiago Peña Jorge		funcionando como turbinas		Página 1
Concepto	Fecha	Propone	R/D	Descripción
Función		C	R	Uso de la Bomba SAER NCB 65-200NA
Fuerza		I	R	Potencia requerida máxima 5 HP
Dimensiones		C + I	R	Dimensiones máximas del Banco de Pruebas: 3x1.8 [m]

3.2 Evaluación de Alternativas de Solución

El método que se utilizó se trató del método ordinal de criterios ponderados, en el cual se elaboran tablas donde cada solución o criterio se analiza con los otros criterios para cada alternativa de solución, donde se tiene la siguiente ponderación:

- **1:** Si el criterio o solución de la fila es superior al de las columnas.
- **0.5:** Si el criterio o solución de la fila es igual al de las columnas.

- **0:** Si el criterio o solución de la fila es inferior al de las columnas.

Al final, se suma uno (1) a cada criterio para evitar que aquel menos favorable no tenga una valoración de cero.

Módulo 1: Requerimientos para el funcionamiento de la PAT.

En la presente tabla, se resumen las alternativas de solución el módulo 1 de la PAT.

Tabla 8. Matriz Morfológica del Módulo 1.

Alternativas	
Solución o Alternativa 1:	Uso de un tanque de plástico, tuberías y accesorios de PVC, montados sobre una estructura de acero. Las condiciones de presión y caudal serán dadas por el uso de una bomba centrífuga.
Solución o Alternativa 2:	Almacenamiento y suministro de agua por medio de un tanque metálico; circulación realizada a través de tuberías y accesorios de hierro galvanizado. Los elementos sujetos a una estructura metálica y, por último, las condiciones de presión y caudal serán dadas por el uso de una bomba centrífuga.
Solución o Alternativa 3:	Aplicación de un tanque metálico, con tuberías y accesorios de cobre para la circulación del agua. Además del uso de una bomba periférica para dar las condiciones de presión y caudal a la PAT. Todos estos elementos serán empotrados o sujetos directamente al piso.

Orden de Preferencia de los Criterios

En este módulo se tomó como criterio de preferencia la seguridad, para después escoger el costo del sistema ya que este involucra una gran cantidad de componentes importantes; después, se escogió la disponibilidad en el mercado de los componentes y, por último, se seleccionó la movilidad del sistema una vez implementado, obteniendo lo siguiente:

Tabla 9. Ponderación de criterios del módulo 1.

CRITERIOS						
Seguridad>Costo>Disponibilidad en el mercado=Movilidad						
Criterio	Seguridad	Costo	Disponibilidad en el mercado	Movilidad	S+1	Ponderado
Seguridad		1	1	1	4	0.40
Costo	0		1	1	3	0.30
Disponibilidad en el mercado	0	0		1	2	0.20
Movilidad	0	0	0		1	0.10
				SUMA	10	1.00

Entonces, evaluando el peso específico del criterio seguridad, se obtiene lo siguiente:

$$\text{Alternativa 2} = \text{Alternativa 3} > \text{Alternativa 1}$$

Tabla 10. Evaluación del criterio seguridad del módulo 1.

Seguridad	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3	S+1	Ponderado
Alternativa 1		0	0	1	0.17
Alternativa 2	1		0.5	2.5	0.42
Alternativa 3	1	0.5		2.5	0.42
			SUMA	6	1.00

Por otro lado, el peso específico del criterio costo para este módulo, se detalla en la siguiente tabla:

$$\text{Alternativa 2} > \text{Alternativa 1} > \text{Alternativa 3}$$

Tabla 11. Evaluación del criterio costo del módulo 1.

Costo	Altn. 1	Alt. 2	Alt. 3	S+1	Ponderado
Alternativa 1		0	1	2	0.33
Alternativa 2	1		1	3	0.50
Alternativa 3	0	0		1	0.17
			SUMA	6	1.00

El peso específico para la disponibilidad en el mercado se detalla de la siguiente manera:

$$\text{Alternativa 2} > \text{Alternativa 1} = \text{Alternativa 3}$$

Tabla 12. Evaluación del criterio disponibilidad en el mercado del módulo 1.

Disponibilidad en el mercado	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3	S+1	Ponderado
Alternativa 1		0	0.5	1.5	0.25
Alternativa 2	1		1	3	0.50

Alternativa 3	0.5	0		1.5	0.25
			SUMA	6	1.00

Por último, el peso específico del criterio movilidad del presente módulo se describe de la siguiente manera:

$$\text{Alternativa 2} > \text{Alternativa 1} > \text{Alternativa 3}$$

Tabla 13. Evaluación del criterio movilidad del módulo 1.

Movilidad	Alt. 1	Alt. 2	Alt. 3	S+1	Ponderado
Alternativa 1		0	1	2	0.33
Alternativa 2	1		1	3	0.50
Alternativa 3	0	0		1	0.17
			SUMA	6	1.00

Tabla 14. Resultados de la evaluación de criterios del módulo 1.

Módulo 4	Seguridad	Costo	Disponibilidad	Movilidad	Suma	Ponderado
en el mercado						
Alternativa 1	0.067	0.100	0.050	0.033	0.250	0.250
Alternativa 2	0.167	0.125	0.100	0.050	0.442	0.442
Alternativa 3	0.167	0.125	0.050	0.017	0.358	0.358
				SUMA	1.000	1

Módulo 2: Operación de la Bomba Funcionando como Turbina.

Debido a que en este módulo solo se utilizará un tipo de bomba funcionando como turbina para la generación de energía, no es necesario un análisis de criterios ponderados, ya que será la única solución de este módulo. Además, la alternativa elegida es la bomba SAER NCB 65-200 NA disponible en el laboratorio.

3.3 Resultados de Cálculo y Selección de Equipos

3.3.1 Condiciones iniciales de la PAT

De la metodología presentada en la sección anterior, se resumen los resultados de los cálculos para obtener el caudal, altura y velocidad de rotación de la bomba funcionando como turbina, para diversos puntos de mejor eficiencia en modo bomba. Entonces, se

obtienen los cálculos en diferentes condiciones para un caudal mínimo, nominal y máximo. Se muestra como referencia el punto de máxima eficiencia para los valores nominales de la bomba, de lo cual se observan valores de caudal y altura demasiado altos para ser tratados en un banco de pruebas de laboratorio, debido a la gran demanda y pérdida de energía que representaría; y esto a su vez se ve reflejado en la robustez del equipo y su costo. Por ello se consideró, tomar puntos de máxima eficiencia a velocidades de giro más bajas, sobre las cuales se aplicaron las correlaciones y se obtuvieron los resultados de la Tabla 15.

Tabla 15. Condiciones de caudal y altura para la PAT.

$Q_B [m^3/s]$	$H_B [m]$	$n_p [rpm]$	n_{sp}	C_Q	C_H	$Q_T [m^3/s]$	$H_T [m]$	n_{st}	$n_t [rpm]$
0,0175	21,80	1800	23,6	1,524	1,771	0,0267	38,61	18,57	1761
0,0097	6,72	1000	23,6	1,524	1,770	0,0148	11,89	18,59	978
0,0078	4,31	800	23,6	1,524	1,772	0,0118	7,639	18,54	783
0,0058	2,42	600	23,6	1,524	1,770	0,0089	4,285	18,58	587

Como fue explicado en la sección anterior, se demostró que los requerimientos de la PAT siempre son mayores a los que se necesitan en modo bomba; esto causó que se obtengan puntos de operación elevados que se adicionan a las pérdidas por fricción y por accesorios, propias del banco de pruebas. Por esas razones se calculó para puntos de operación en valores mucho más bajos, que se pueden obtener dentro de un laboratorio con mayor seguridad.

3.3.2 Diseño de tuberías y cálculos de pérdidas

El material de la tubería es de acero galvanizado, la selección del material proporciona ciertos parámetros necesarios para establecer las pérdidas por fricción en las tuberías, las bridas seleccionadas son bridas PN 16 y PN 10 junto con los pernos establecidos para este tipo de componentes y los codos utilizados son codos largos todos de acuerdo a la norma EN-1092-1.

Succión

En base a la metodología explicada se establece una tubería estándar de 3[in], (88,9mm de diámetro externo y espesor 5,49mm) de acuerdo a la disponibilidad en el mercado. La tubería de succión consta de lo siguiente:

- Conectada a la parte inferior del tanque de almacenamiento con una entrada recta.

- Codo largo embridado para cambiar la dirección.
- Reductor excéntrico conectado a la entrada de la bomba para reducir la sección de tubería al diámetro de entrada de la bomba.
- Se evita poner una válvula de pie debido a que no existirá retorno de agua cuando el nivel de agua sea superior a la altura de la bomba instalada al nivel del suelo.
- La longitud total de esta sección es de 1,6m

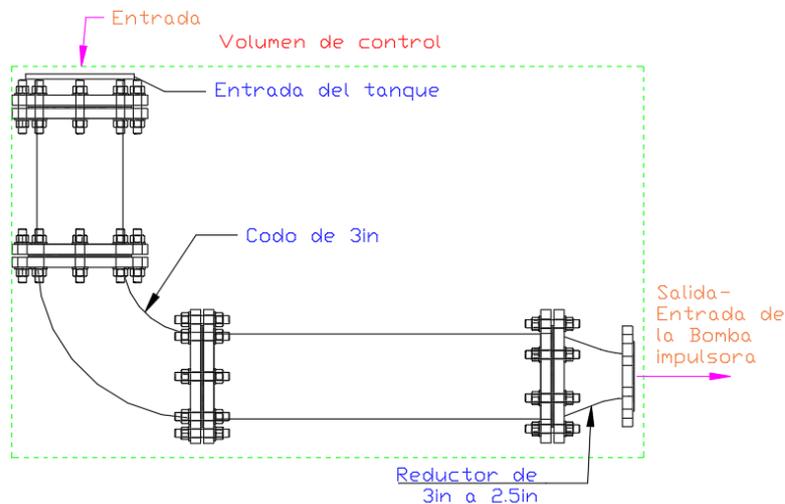


Figura 17. Esquema de succión del banco de pruebas.

(Fuente: Propia)

Se tienen los valores de coeficiente de pérdidas en la Tabla 16:

Tabla 16. Valores de coeficientes de pérdidas para tubería de succión.

Accesorio	K_i
Entrada (in)	0,5
Codo (c)	0,22
Reducción excéntrica (re)	0,08

A continuación, se muestra la Ecuación 20 de sumatoria de pérdidas menores h_{ms} , considerando la velocidad en cada accesorio y de la cual se obtiene la Tabla 17 de resumen de los cálculos. Para la Tabla 18 se aplican las ecuaciones 8, 9,10; con lo que se determinan los valores de pérdidas mayores.

$$h_{ms} = K_{in} \left(\frac{V_{in}^2}{2g} \right) + K_c \left(\frac{V_c^2}{2g} \right) + K_{re} \left(\frac{V_{re}^2}{2g} \right) \quad (20)$$

Ecuación 20. Pérdidas menores en accesorios en tubería de succión.

Tabla 17. Tabla resumen de pérdidas menores en tubería de succión.

	Q completo			Q medio, Válvula		
	Válvula abierta			cerrada a la mitad		
	QMIN	QNOM	QMAX	QMIN	QNOM	QMAX
<i>Caudal</i> [m^3/s]	0,0089	0,0118	0,0148	0,0044	0,0059	0,0074
<i>Velocidad (NPS3)</i> [m/s]	1,8630	2,4840	3,1060	0,9315	1,2420	1,5530
<i>Velocidad (DN65)</i> [m/s]	2,6770	3,5690	4,4630	1,3385	1,7845	2,2315
<i>h_{in}</i> [m]	0,0884	0,1572	0,2459	0,0221	0,0393	0,0615
<i>h_c</i> [m]	0,0389	0,0692	0,1082	0,0097	0,0173	0,0270
<i>h_{re}</i> [m]	0,0292	0,0519	0,0812	0,0073	0,0130	0,0203
<i>h_{ms}</i> [m]	0,1566	0,2784	0,4352	0,0391	0,0696	0,1088

Tabla 18. Tabla resumen de pérdidas mayores para tubería de succión.

	Q completo			Q medio, Válvula		
	Válvula abierta			cerrada a la mitad		
	QMIN	QNOM	QMAX	QMIN	QNOM	QMAX
<i>Caudal</i> [m^3/s]	0,0089	0,0118	0,0148	0,0044	0,0059	0,0074
<i>Velocidad (NPS3)</i> [m/s]	1,8630	2,4840	3,1060	0,9315	1,2420	1,5530
<i>Re</i>	144449	192582	240809	72225	96291	120405
<i>f</i>	0,0244	0,0241	0,0240	0,0255	0,0250	0,0246
<i>h_{ls}</i>	0,0887	0,1558	0,2418	0,0232	0,0403	0,0622

Impulsión

Se estableció una tubería estándar de 3[in], (88,9mm de diámetro externo y espesor 5,49mm). La tubería está considerada desde la salida de la bomba hasta la entrada a la PAT y consta de lo siguiente:

- Conectada a la salida de la bomba con expansión concéntrica, para incrementar el diámetro de la tubería.
- Medidor de caudal.
- Válvula de control del tipo mariposa, que se encargará de variar el caudal del sistema para adaptarlo al caudal requerido por la PAT. Se considerará para un

estado completamente abierto y para un estado de apertura media para evitar excesiva pérdida de carga.

- Dos codos largos embridados para cambiar la dirección.
- Medidor de presión a la entrada de la PAT.
- Reducción concéntrica conectada a la entrada de la PAT para reducir la sección de tubería al diámetro de entrada de la PAT que corresponde a 65mm.
- La longitud total de esta sección es de 2,9 m.

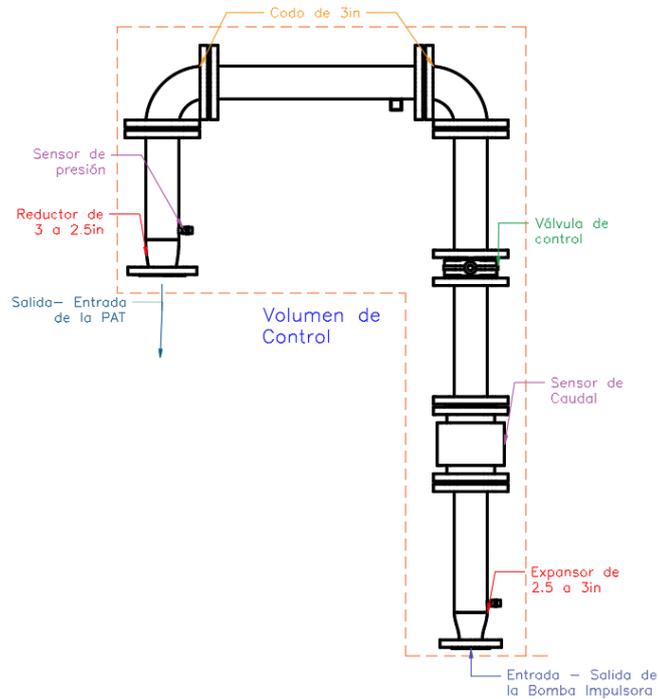


Figura 18. Esquema de impulsión del banco de pruebas.

(Fuente: Propia)

Tabla 19. Valores de coeficientes de pérdidas para tubería de impulsión.

Accesorio	K_i
Ampliación concéntrica (ac)	0,04
Válvula de mariposa completamente abierta (v1)	260 (Kv1)
Válvula de mariposa abierta 45° (v2)	52 (Kv2)
2 codos largos (c)	072
Reducción concéntrica (rc)	0,08

A continuación, se muestra la Ecuación 21 de sumatoria de pérdidas menores, considerando la velocidad en cada accesorio y la tabla de resumen de los cálculos.

$$h_{mi} = K_{ac} \left(\frac{V_{ac}^2}{2g} \right) + 10 * \left(\frac{Q * 3600}{Kv_i} \right)^2 + K_c \left(\frac{V_c^2}{2g} \right) + K_{rc} \left(\frac{V_{rc}^2}{2g} \right) \quad (21)$$

Ecuación 21. Pérdidas menores en tubería de impulsión

Tabla 20. Tabla resumen de pérdidas menores para tubería de impulsión.

	Q completo			Q medio, Válvula		
	Válvula abierta			cerrada a la mitad		
	QMIN	QNOM	QMAX	QMIN	QNOM	QMAX
<i>Caudal</i> [m ³ /s]	0,0089	0,0118	0,0148	0,0044	0,0059	0,0074
<i>Velocidad (NPS3)</i> [m/s]	1,8630	2,4840	3,1060	0,9315	1,2420	1,5530
<i>Velocidad (DN50)</i> [m/s]	4,5250	6,0320	7,5430	2,2625	3,0160	3,7715
<i>Velocidad (DN65)</i> [m/s]	2,6770	3,5690	4,4630	2,2625	3,0160	3,7715
<i>h_{ac}</i> [m]	0,0071	0,0126	0,0197	0,0104	0,0185	0,0290
<i>h_{vi}</i> [m]	0,1513	0,2688	0,4205	0,9457	1,6797	2,6281
<i>h_c</i> [m]	0,1274	0,2264	0,3540	0,0318	0,0566	0,0885
<i>h_{re}</i> [m]	0,0292	0,0519	0,0812	0,0209	0,0371	0,0580
<i>h_{mi}</i> [m]	0,3150	0,5597	0,8754	1,0089	1,7920	2,8036

Tabla 21. Tabla resumen de pérdidas mayores para tubería de impulsión

	Q completo			Q medio, Válvula		
	Válvula abierta			cerrada a la mitad		
	QMIN	QNOM	QMAX	QMIN	QNOM	QMAX
<i>Caudal</i> [m ³ /s]	0,0089	0,0118	0,0148	0,0044	0,0059	0,0074
<i>Velocidad (NPS3)</i> [m/s]	1,8630	2,4840	3,1060	0,9315	1,2420	1,5530
<i>Re</i>	144449	192582	240809	72225	96291	120405
<i>f</i>	0,0244	0,0241	0,0240	0,0255	0,0250	0,0246
<i>h_{li}</i>	0,1608	0,2824	0,4383	0,0420	0,0731	0,1127

Descarga

Para la descarga se tiene una tubería estándar de 3[in], (88,9mm de diámetro externo y espesor 5,49mm). La que se observa en la Figura 19 y consta de lo siguiente:

- Medidor de presión a la salida de la PAT.
- Codo largo embrizado para cambiar la dirección y dirigido al tanque de almacenamiento.
- La longitud total de esta sección es de 0,8m

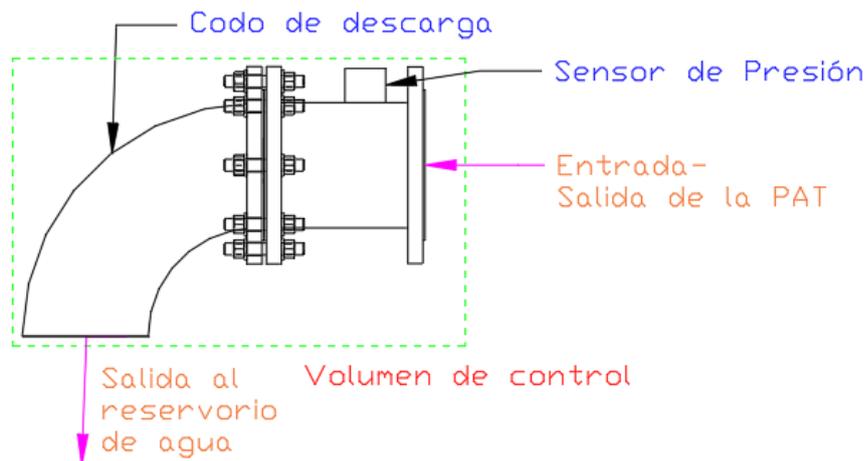


Figura 19. Esquema de descarga del banco de pruebas.

(Fuente: Propia)

Tabla 22. Valores de coeficientes de pérdidas para tubería de descarga.

Accesorio	K_i
Codo largo (c)	0,36

A continuación, se muestra la ecuación de sumatoria de pérdidas menores, considerando la velocidad en cada accesorio y la tabla de resumen de los cálculos.

$$h_{md} = K_c \left(\frac{V_c^2}{2g} \right) \quad (22)$$

Ecuación 22. Pérdidas menores en tubería de descarga.

Tabla 23. Tabla resumen de pérdidas menores en tubería de descarga.

	Q completo			Q medio, Válvula		
	Válvula abierta			cerrada a la mitad		
	QMIN	QNOM	QMAX	QMIN	QNOM	QMAX
<i>Caudal</i> [m^3/s]	0,0089	0,0118	0,0148	0,0044	0,0059	0,0074
<i>Velocidad (NPS3)</i> [m/s]	1,8630	2,4840	3,1060	0,9315	1,2420	1,5530
<i>Velocidad (DN80)</i> [m/s]	1,7670	2,3560	2,9470	0,8835	1,1780	1,4735
<i>h_c</i> [m]	0,0637	0,1132	0,1770	0,0159	0,0283	0,0443
<i>h_{md}</i> [m]	0,0637	0,1132	0,1770	0,0159	0,0283	0,0443

Tabla 24. Tabla resumen de pérdidas mayores para tubería de descarga.

	Q completo			Q medio, Válvula		
	Válvula abierta			cerrada a la mitad		
	QMIN	QNOM	QMAX	QMIN	QNOM	QMAX
<i>Caudal</i> [m^3/s]	0,0089	0,0118	0,0148	0,0044	0,0059	0,0074
<i>Velocidad (NPS3)</i> [m/s]	1,8630	2,4840	3,1060	0,9315	1,2420	1,5530
<i>Re</i>	144449	192582	240809	72225	96291	120405
<i>f</i>	0,0244	0,0241	0,0240	0,0255	0,0250	0,0246
<i>h_{ld}</i>	0,0333	0,0584	0,0961	0,0087	0,0151	0,0233

Resumen de pérdidas menores y mayores del sistema

A continuación, se muestran todas las pérdidas del sistema, que se deben considerar para seleccionar la bomba y se muestra para los casos en donde la válvula está completamente abierta y un estado de apertura media.

Tabla 25. Tabla resumen de pérdidas mayores y menores del banco de pruebas.

	Q completo			Q medio, Válvula		
	Válvula abierta			cerrada a la mitad		
	QMIN	QNOM	QMAX	QMIN	QNOM	QMAX
<i>Caudal</i> [m^3/s]	0,0089	0,0118	0,0148	0,0044	0,0059	0,0074
<i>Pérdidas menores</i> h_m	0,5352	0,9513	1,4877	1,0639	1,8899	2,9567
<i>Pérdidas mayores</i> h_l	0,2828	0,4966	0,7762	0,0738	0,1285	0,1982
<i>Pérdidas totales</i> h_t	0,8180	1,4479	2,2638	1,1377	2,0184	3,1549

En el análisis y cálculo de pérdidas del banco de pruebas se observa que la condición de trabajo en la que se encuentre la válvula es un factor determinante para el cálculo. Es importante mencionar que las pérdidas menores resultaron tener mayor valor que las pérdidas mayores, debido a que el diámetro es mucho mayor en relación con la longitud de la tubería del sistema; por ello, la cantidad y el tamaño de los accesorios es un factor determinante para determinar estos resultados.

3.3.3 Selección de bomba

A partir de la Ecuación 13 presentada en la metodología de cálculo, se desarrolló el balance de energía desde la entrada del agua a la tubería de succión (punto 1) hasta la salida del agua por la tubería de descarga de la PAT (punto 2), en el esquema hidráulico de la Figura 20. En dichos puntos se tiene que la presión y velocidad de entrada y salida son aproximadamente 0.

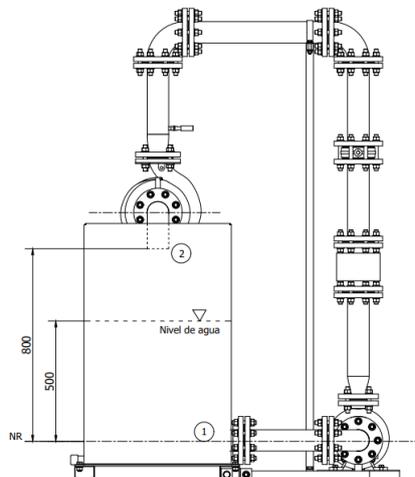


Figura 20. Esquema hidráulico para el balance de energía.

(Fuente: Propia)

Del balance de energía se obtiene el caudal y altura que necesita suministrar la bomba para cumplir los requerimientos de la PAT y pérdidas por fricción y accesorios para los diferentes casos que se expusieron anteriormente. En la Tabla 26 se muestra el caudal y altura que necesita suministrar la bomba impulsora, a partir de estos datos se selecciona la bomba de alimentación del sistema.

Tabla 26. Valores de altura y caudal requeridos.

	Q completo		Q medio, Válvula	
	Válvula abierta		cerrada a la mitad	
	$Q_{Bi}[m^3/s]$	$H_{Bi}[m]$	$Q_{Bi}[m^3/s]$	$H_{Bi}[m]$
QMIN	0,0089	5,408	0,0044	5,736
QNOM	0,0118	9,387	0,0059	9,972
QMAX	0,0148	14,45	0,0074	15,37

Se selecciona la bomba PEDROLLO F 50/125B, del catálogo del fabricante PEDROLLO [23] que posee las siguientes características mostradas en la Tabla 27:

Tabla 27. Especificaciones técnicas de la bomba impulsora.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS BOMBA IMPULSORA	
Serie	PEDROLLO F 50/125B
Dimensiones	65X50X125
Velocidad [rpm]	3450
Caudal	Mínimo [l/min] 300 Nominal [l/min] 900 Máximo [l/min] 1200
Preponderancia	Mínimo [l/min] 20,7 Nominal [l/min] 15 Máximo [l/min] 9
H (Q=0) [m]	21,5
NPSH 3%	3,5
Potencia sobre el eje [hp]	4
Eficiencia	70
Máxima potencia absorbida [hp]	4,4

Se determinó el tamaño de tubería de tal manera que no exceda valores recomendados de velocidad del fluido o que a su vez no exceda dichos valores de manera constante. La bomba seleccionada es una Bomba Pedrollo F50/125B de 4HP, debido a que la PAT no va a trabajar en sus condiciones de diseño nominales porque solo se va a implementar con fines académicos y se evaluará con caudales y alturas más pequeñas de los valores nominales.

A continuación, se grafican los valores requeridos por el banco de pruebas en los casos planteados y las curvas características de la bomba impulsora a su velocidad nominal (3450 rpm) y a diversas velocidades de rotación, aplicando las leyes de afinidad de las bombas. De esto se tiene que la bomba seleccionada será capaz de cubrir todos estos valores, además de otra variedad de puntos intermedios para diversas tomas de datos.

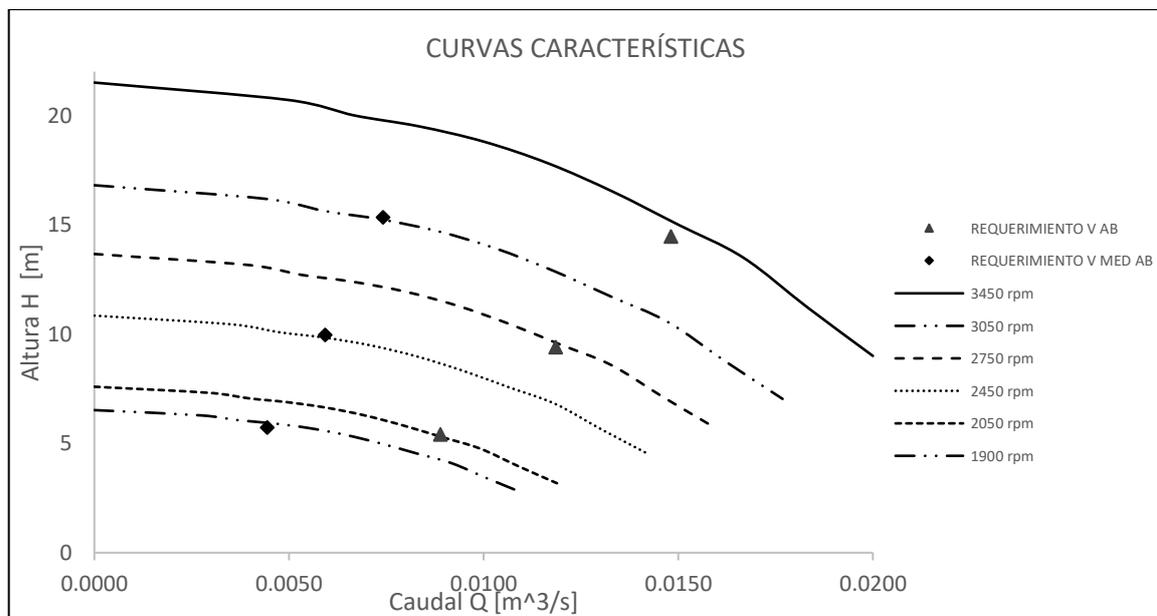


Figura 21. Curva H-Q a diferentes rpm de la bomba impulsora seleccionada.

El NPSH se calculó para los caudales y alturas más grandes de operación, valores mostrados en la Tabla 28.

Tabla 28. Valores de NPSH disponible y requerido.

Válvula completamente abierta			
Q_{Bi} [m³/s]	H_{Bi} [m]	$NPSH_{disp}$ [m]	$NPSH_{req}$ [m]
0,0089	5,441	7,006	1,75
0,0118	9,445	6,600	2,25
0,0148	14,540	6,077	2,95

Para los casos planteados, se cumple que: $NPSH_{disp} \geq NPSH_{req}$. Por lo tanto, para todos estos puntos de operación la bomba funcionara correctamente.

Para la comprobación de presión máxima de tuberías se tomó como punto inicial la salida del tanque y como puntos finales: la salida de la bomba, la entrada de la PAT y el punto más alto de la tubería de impulsión.

Tabla 29. Comprobación de presiones en el sistema.

	QMIN	QNOM	QMAX
Presión salida de bomba [kPa]	42,239	71,381	108,338
Presión tubería de impulsión [kPa]	32,004	65,364	107,768
Presión entrada PAT [kPa]	35,205	65,750	104,529

La bomba seleccionada es más pequeña que la PAT, esto se justifica debido a que se diseñó el banco de pruebas de tal manera que la PAT trabaje con valores mucho más bajos que los nominales, debido a lo explicado en la sección 3.3.1 referente a las condiciones iniciales, lo que implica un menor caudal y altura de diseño.

El espesor de diseño de la tubería de acuerdo a la Ecuación 11 que corresponde a la norma ASME B31.3 establece que un espesor de diseño mínimo de 0.51mm es requerido para la presión de trabajo que se tiene en el sistema, por lo cual una tubería de 3 pulgadas es adecuada en el diseño por las consideraciones de velocidad del fluido, además, como el espesor de las tuberías es inferior a 6mm entonces se utiliza el espesor del material como el ancho de la junta de la soldadura que sería de 5mm.

3.3.4 Cálculo de volumen ocupado y diseño del tanque

En base al diseño explicado previamente, se estimó que el volumen de agua ocupado por las tuberías y demás elementos es 100L, que es el volumen mínimo que debe existir para evitar que el sistema se quede sin agua; adicional a eso se estableció una altura del nivel de agua de 0,5 [m] sobre el nivel del eje de la bomba y 0,1 [m] de la distancia de la base del tanque a la altura del eje.

Se establecen las siguientes dimensiones del tanque:

$$L = 1 [m]$$

$$a = 0,60 [m]$$

$$h = 1 [m]$$

$$V_{max} = L * a * h = 0,6 [m^3]$$

$$V_{ocupado} = 0,1 + 0,6 * 0,6 = 0,46 [m^3]$$

Se considera lo siguiente para el diseño del tanque:

- Dimensiones de 1x1x0,6 [m]
- Tanque armado con soldadura, con planchas laterales plegadas y base de 3 [mm] de espesor.
- Soldadura de refuerzos en la parte inferior y lados.
- Conexión tipo brida con tubería de succión.
- Desfogue en la parte posterior para vaciar el tanque.

3.4 Modelado y análisis de Costos

En cuanto al análisis de costos, uno de los principales factores considerados fue la disponibilidad en el mercado ecuatoriano para no tener gastos de importación en los componentes. Además, se consideró la PAT disponible en el laboratorio, lo que representa un ahorro dentro de los costos del proyecto. El detalle completo de los costos calculados se encuentra en el Anexo IV. Y en la siguiente tabla se muestra el costo de los módulos 1 y 2.

Tabla 30. Costo de Implementación del Banco de Pruebas.

Costo Total del Componente Mecánico	
Módulo 1	\$4,352.64
Módulo 2	Se dispone del equipo.
Total	\$4,352.64

Del modelado que se muestra sobre el banco de pruebas de la Figura 22 se detallan sus principales componentes. Para la construcción, los planos de conjunto, subconjunto y taller se pueden observar en el Anexo VI.

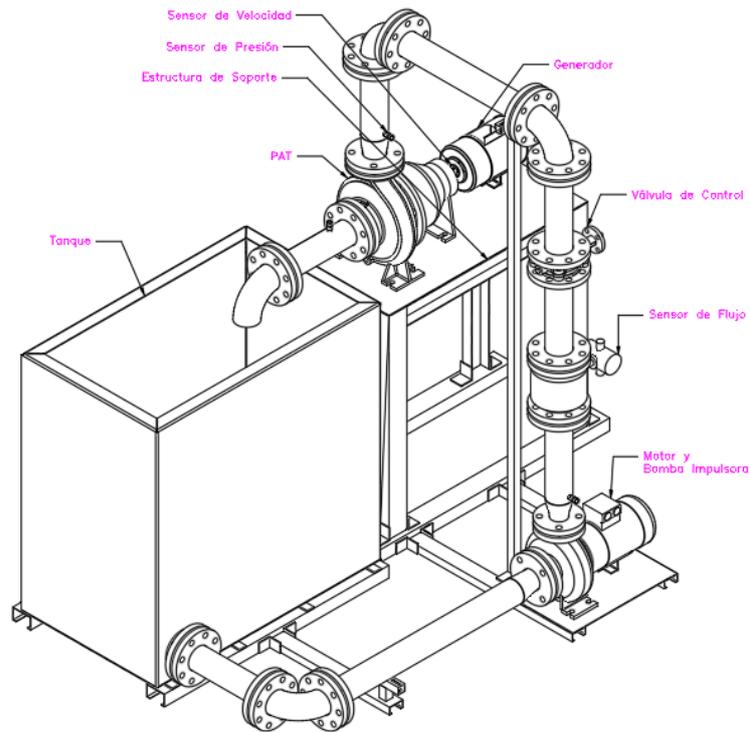


Figura 22. Esquema General del Banco de Pruebas.

(Fuente: Propia)

4 CONCLUSIONES

De la casa de la calidad se obtuvo las siguientes especificaciones técnicas aplicables para el diseño mecánico e hidráulico: las dimensiones del banco de pruebas y la selección de la bomba impulsora, donde se concluye que el más determinante es el espacio disponible para su implementación porque limita al resto de componentes del sistema.

La metodología utilizada en el presente estudio permitió generar un modelo 3D del banco de pruebas, a partir de correlaciones experimentales para caracterizar la PAT, con una bomba impulsora adecuada, una red de tuberías diseñada de acuerdo a la norma UNE EN-1092-1 y ASME B31.3 para su futura construcción, modelo que se encuentra detallado en el Anexo VI en forma de planos de diseño.

Del estudio mecánico del sistema se logró obtener un modelo que posee los siguientes componentes importantes: una tubería de circulación de 3 pulgadas de acero galvanizado, un tanque metálico reservorio de agua, una PAT SAER NCB 65-200NA, una estructura metálica de soporte y una bomba impulsora PEDROLLO F50/125B de 4HP, que van a trabajar acondicionando a la bomba funcionando como turbina.

El banco de pruebas alcanza las siguientes condiciones máximas de funcionamiento: 0.0148 [m³/s] o 888 [l/min] en caudal, 14,45 [m] como altura en modo turbina, unas revoluciones por minuto de 978 [rpm] y una potencia entregada de 1369 [W].

El costo del componente mecánico es de \$4,352.64, que incluye el costo de todos los elementos mecánicos e hidráulicos necesarios en el banco de pruebas; así como materia prima, proceso de fabricación y elementos normalizados. El módulo 1 es el módulo más costoso del proyecto el cuál abarca la mayoría de los componentes mecánicos del sistema. Y el costo total del proyecto es de \$9116,18 el cual ya considera los componentes eléctricos y de control.

4.1 Recomendaciones

Se demostró que para evaluar la PAT a su carga y caudal de máxima eficiencia se puede llegar a los valores encontrados inicialmente, pero implementar un banco de pruebas de estas condiciones implica un mayor gasto económico y pérdidas de energía muy altas, por ello, se implementó un banco de pruebas para una bomba funcionando como turbina, con sus elementos de montaje necesarios y una estructura metálica de soporte del sistema.

Cuando se diseñe un banco de pruebas es recomendable considerar la robustez y costo que este puede llegar a tener, desde el inicio. Por ello la selección de la PAT es el paso fundamental que se debe considerar al seguir la metodología expuesta en este proyecto.

Es recomendable iniciar el proceso de cálculo basándose en trabajos similares, con esto se evita tener varias iteraciones y se simplifica el proceso de diseño.

4.2 Trabajo futuro

Una vez realizada la implementación del sistema, se debería realizar una guía de prácticas laboratorio del banco de pruebas para los estudiantes, con esto podrán evaluar las bombas funcionando como turbinas. El objetivo de esto sería que amplíen sus conocimientos sobre las máquinas reversibles y las posibles aplicaciones que estas tienen para brindar soluciones innovadoras a los problemas.

Por último, de acuerdo a lo investigado, se tienen bancos de pruebas que permiten evaluar a la PAT en su modo bomba y en su modo inverso. Esto implica conexiones adicionales al banco de pruebas o procesos de montaje y desmontaje de este. Por ello una opción de trabajo futuro sería implementar este sistema de doble funcionamiento de la PAT para tener base de comparación de ambos modos de funcionamiento.

5 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J.-M. Chapallaz, P. Eichenberger, y G. Fisher, *Manual on pumps used as turbines: a publication of Detsches*, vol. 11. 1992.
- [2] R. Ortiz Flórez, “PROYECTO DE INVESTIGACION ‘MÁQUINAS REVERSIBLES APLICADAS A MI-CROCENTRALES HIDROELÉCTRICAS’”, 2008.
- [3] I. J. Karassik, *Pump handbook*. McGraw-Hill, 2001.
- [4] B. Leyland, “Small hydroelectric engineering practice”. [En línea]. Disponible en: www.TechnicalBooksPdf.com
- [5] A. Creus Solé, “Instrumentación industrial, 8va Edición”. [En línea]. Disponible en: www.FreeLibros.me
- [6] Manufactura LATAM, “Medidor electromagnético de Flujo M1000”, el 1 de junio de 2014.
- [7] Diordi Accesorios, “Tacómetro Láser Digital Medición A Distancia”. <https://diordi.com/industria-y-herramientas/534-tacometro-laser-digital-99999-rpm-medicion-a-distancia.html> (consultado el 2 de agosto de 2023).
- [8] EMERSON, “Rosemount 3051S Transmisor de Caudal por presión diferencial”.
- [9] TodoValvulas S.A.S., “Válvula Mariposa con Actuador Neumático ”, 2020. <https://todovalvulas.com/producto/valvula-mariposa-con-actuador-neumatico/> (consultado el 15 de agosto de 2023).
- [10] David Castro Noroña, “CREACION DEL MODELO MATEMATICO PARA EL ANALISIS DE PERDIDAS UTILIZANDO PYTHON”, 2022.
- [11] Villamarin Edison, “SIMULACIÓN DEL IMPELER Y VOLUTA EN ESTADO ESTABLE UTILIZANDO OPENFOAM”, 2022.
- [12] Atarihuana Sebastian, “ESTUDIAR LA GEOMETRÍA DE IMPULSORES DE BOMBAS PARA QUE FUNCIONEN COMO TURBINAS”, Quito, ene. 2023.
- [13] M. Pérez-Sánchez, P. A. López-Jiménez, y H. M. Ramos, “PATs operating in water networks under unsteady flow conditions: Control valve manoeuvre and overspeed effect”, *Water (Switzerland)*, vol. 10, núm. 4, abr. 2018, doi: 10.3390/w10040529.

- [14] S. S. Yang, S. Derakhshan, y F. Y. Kong, "Theoretical, numerical and experimental prediction of pump as turbine performance", *Renew Energy*, vol. 48, pp. 507–513, dic. 2012, doi: 10.1016/j.renene.2012.06.002.
- [15] A. Doshi, S. Channiwala, y P. Singh, "Influence of Nonflow Zone (Back Cavity) Geometry on the Performance of Pumps as Turbines", *J Fluids Eng*, vol. 140, p. 121107, jun. 2018, doi: 10.1115/1.4040300.
- [16] Carles Riba, *Diseño concurrente*. 2002.
- [17] S. Barbarelli, M. Amelio, G. Florio, y N. M. Scornaienchi, "Procedure Selecting Pumps Running as Turbines in Micro Hydro Plants", en *Energy Procedia*, Elsevier Ltd, sep. 2017, pp. 549–556. doi: 10.1016/j.egypro.2017.08.282.
- [18] CRANE THE VALVE EXPERTS, "Flow of Fluids Through Valves Fittings, and pipe.", *Technical Paper No 410M*, 1999.
- [19] J. Saldarriaga, *HIDRAULICA DE TUBERIAS*. Mc Graw Hill, 1998.
- [20] Universidad de Guanajuato, "Selección del generador eléctrico ", el 22 de diciembre de 2021. <https://blogs.ugto.mx/rea/clase-digital-7-seleccion-del-generador-electrico-parte-i/> (consultado el 26 de agosto de 2023).
- [21] "Cálculo del número de polos del motor de inducción", 2013. <https://electromatic2012.blogspot.com/2013/04/calculo-del-numero-de-polos-del-motor.html> (consultado el 27 de agosto de 2023).
- [22] Lázaro López Andres, "Manual de Hidráulica", *Universidad de Alicante*, pp. 293–320, 2004.
- [23] PEDROLLO, "Catálogo general 60Hz". www.casadelriegoecuador.com.