



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

**Diseño y Construcción de un módulo didáctico de una pico central hidroeléctrica
para el laboratorio de energías renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas
ESPE-L Sede Latacunga.**

Álvarez Chávez, Vicente Leonardo y Gallardo Cherrez, Luis Javier

Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería Electromecánica

Trabajo de Titulación, previo a la obtención del Título de Ingeniero en Electromecánica

Ing. Jiménez León, Mario Polibio MSC.

22 de agosto del 2023

Latacunga



Plagiarism report

TESIS_ALVAREZ_GALLARDO_V2.docx

Scan details

Scan time:
August 21th, 2023 at 22:12 UTCTotal Pages:
73Total Words:
18244

Plagiarism Detection



Types of plagiarism	Words
Identical	1.6% 296
Minor Changes	0.3% 48
Paraphrased	1.1% 203
Omitted Words	0% 0

AI Content Detection

Text coverage
 AI text
 Human text

Plagiarism Results: (66)

Diseño y construcción de una pico central hidroeléct... 0.5%

<http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/3637>

DSpace Repository Diseño y construcción de una pico central hidroeléctrica utilizando una turbina Michell bancki para generación ...

Browsing Tesis - Carrera de Ingeniería Electromecán... 0.3%

<http://repositorio.espe.edu.ec/xmlui/handle/21000/2715/bro...>

DSpace Repository Browsing Tesis - Carrera de Ingeniería Electromecánica (ESPEL) by Subject: "ENERGÍAS RENOVABLES" Login E...

Diseño y simulación de un sistema pico-hydro para ... 0.3%

<https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/ar...>

Revista UIS Ingenierías Registrarse Ent...

Ing. Mario Polibio Jiménez León

C.I.:0501519326

ID: L00007707

Director del Proyecto



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería Electromecánica

Certificación

Certifico que el trabajo de titulación: "Diseño y Construcción de un módulo didáctico de una pico central hidroeléctrica para el laboratorio de energías renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L Sede Latacunga" fue realizado por los señores Álvarez Chávez, Vicente Leonardo Y Gallardo Cherez, Luis Javier; el mismo que cumple con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, además fue revisado y analizado en su totalidad por la herramienta de prevención y/o verificación de similitud de contenidos; razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que se lo sustente públicamente.

Latacunga, 22 de agosto del 2023

Ing. Mario Polibio Jiménez León

C.I.:0501519326

ID: L00007707

Director del Proyecto



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones
Carrera de Ingeniería Electromecánica

Responsabilidad de Autoría

Nosotros, **Álvarez Chávez Vicente Leonardo Y Gallardo Cherrez, Luis Javier**, con cédulas de ciudadanía n° 1724683402 y 0503981631, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de titulación: **“Diseño y Construcción de un módulo didáctico de una pico central hidroeléctrica para el laboratorio de energías renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L Sede Latacunga”** es de nuestra autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos legales, teóricos, científicos, técnicos, y metodológicos establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 22 de agosto del 2023

Álvarez Chávez, Vicente Leonardo
C.C.: 1724683402

Gallardo Cherrez, Luis Javier
C.C.: 0503981631



Departamento de Eléctrica, Electrónica y Telecomunicaciones

Carrera de Ingeniería Electromecánica

Autorización de Publicación

Nosotros **Álvarez Chávez Vicente Leonardo** y **Gallardo Cherrez Luis Javier**, con cédulas de ciudadanía n° 1724683402 y 0503981631, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de titulación: **“Diseño y Construcción de un módulo didáctico de una pico central hidroeléctrica para el laboratorio de energías renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L Sede Latacunga”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 22 de agosto del 2023

Álvarez Chávez Vicente Leonardo

C.C.: 1724683402

Gallardo Cherrez Luis Javier

C.C.: 0503981631

Dedicatoria.

A mi padre Danilo el cual ha sido el pilar sobre el cual se ha construido toda mi formación como profesional y poder decir que todo esto es gracias a su apoyo, trabajo, esfuerzo y confianza que ha puesto sobre mí.

A mi madre Carmen, quien siempre ha visto mi potencial mucho antes de yo verlo, y apoyándome, siempre brindándome ánimos y fortaleza para que cumpla mis metas, sin importar cuáles sean.

A mi hermana Daniela junto a su esposo Gustavo, ambos han confiado en mis conocimientos adquiridos durante todo este tiempo de formación y me han dado la oportunidad de ejercer y trabajar para ellos, apostando a que daré lo mejor de mí para poder sacar adelante la empresa que conformamos.

A mi hermana Katherin y su esposo Diego en conjunto con mis sobrinas hermosas, los cuales siempre viendo mi bienestar han puesto todo de su parte para que yo pueda terminar este largo camino, al igual cabe destacar todos esos buenos consejos de apoyo y fuerza para poder ser un mejor profesional y mejor persona.

A mi hermano Danilo quien, siendo un apoyo incondicional de mucha certeza y fuerza, siempre dándome consejos para poder ser una persona mucho más tranquila y no precipitarme hacer las cosas.

Gracias a todos.

Vicente Leonardo.

Dedicatoria

Dedico este proyecto de titulación a mi familia que han sido los que me apoyaron a lo largo de toda mi formación profesional.

A mi Padre Luis, que ha sido el que me ha apoyado en toda mi formación profesional con su esfuerzo y trabajo de día a día para que sus hijos tengan un buen futuro.

Luis Javier.

Agradecimiento

Agradezco a mis padres por apoyarme todo este tiempo, en cumplir mis metas, de igual manera a mis hermanas y hermano que me han apoyado en este largo camino, agradezco a mis profesores por todos los conocimientos que me han inculcado, para poder ser el profesional que soy ahora.

A mis compañeros y amigos que he conseguido durante toda la carrera, que siempre estuvieron ahí para apoyarme en todo momento.

Y agradezco a Dios por ponerme en el camino correcto en conjunto a las personas que necesitaba para poder cumplir esta gran meta.

Vicente Leonardo.

Agradecimiento

Agradezco a mi Padre y mis hermanas por el apoyo que me han brindado en toda la carrera y que han sido el motivo por el cual he culminado mi formación profesional.

A mis profesores por los conocimientos adquiridos en toda la carrera universitaria que me servirá para la vida profesional.

A mis compañeros de la carrera que me han apoyado a lo largo de la carrera para poder culminar y seguir estudiando.

Luis Javier.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Carátula	1
Reporte de verificación de contenido.....	2
Certificación	3
Responsabilidad de autoría	4
Autorización de publicación	5
Dedicatoria.....	6
Dedicatoria	7
Agradecimiento.....	8
Agradecimiento.....	9
Índice de contenido	10
Índice de figuras	15
Índice de tablas.....	18
Resumen.....	20
Abstract.....	21
Capítulo I: Introducción.....	22
Antecedentes.....	22
Formulación del problema.....	24
Objetivos del proyecto.....	25
<i>Objetivo general</i>	25
<i>Objetivos específicos</i>	25
Justificación e importancia	26
Hipótesis	27
Variables de investigación.....	27
<i>Variables independientes</i>	27

<i>Variables dependientes</i>	27
Capítulo II: Fundamentación teórica	28
Energía eléctrica.....	28
Energía hidráulica.	28
Recurso hídrico.	29
Energía potencial del agua.	30
Generadores.	31
<i>Generador de flujo radial</i>	33
Hidroeléctricas	34
<i>Clasificación</i>	35
Turbinas Hidráulicas.	36
<i>Turbina de acción o impulso</i>	37
<i>Turbinas de reacción</i>	38
<i>Turbina de flujo cruzado</i>	39
<i>Turbina turgo</i>	39
Circuito hidráulico.....	40
Componentes de un circuito hidráulico.	41
<i>Medidores de caudal</i>	42
Manómetro	44
Válvula.....	45
<i>Válvula de globo</i>	45
<i>Válvula de Retención (Check)</i>	46
<i>Válvula de pie</i>	46
Bombas de agua.....	46
<i>Parámetros para la selección de la bomba</i>	46

<i>Tipos de bombas.</i>	47
Tuberías.	49
<i>Tuberías de acero.</i>	49
<i>Tuberías plásticas.</i>	49
<i>Velocidades de flujo recomendada.</i>	50
Número de Reynolds.....	51
Pérdidas en flujos desarrollados en tubos.....	52
El diagrama de Moody.....	52
Pérdidas menores en tuberías de flujo.	53
Cavitación.	54
<i>Carga de Succión positiva neta</i>	54
Factor de seguridad.	56
Golpe de ariete.	57
<i>Fases o periodos de la tubería.</i>	57
Esfuerzos normales para vigas en flexión.....	59
Capítulo III: Diseño y Selección de Dispositivos	61
Casa de la calidad	62
<i>Resultados de la matriz de la casa de calidad</i>	62
<i>Ficha técnica</i>	63
<i>Análisis funcional.</i>	65
Diseño del sistema hidráulico.	66
<i>Dimensionamiento turbina-generador.</i>	66
<i>Calculo circuito hidráulico.</i>	69
<i>Selección de la bomba.</i>	82
<i>Instrumentación.</i>	85

<i>Calculo capacidad del tanque mínimo.</i>	86
<i>Golpe de ariete.</i>	88
Diseño eléctrico.....	90
<i>Dimensionamiento del Interruptor termomagnético.</i>	91
<i>Dimensionamiento del contactor.</i>	94
<i>Dimensionamiento del relé térmico.</i>	95
<i>Dimensionamiento calibre de conductores.</i>	95
<i>Módulo multímetro para tablero</i>	97
Diseño mecánico	98
<i>Calculo estructura.</i>	98
<i>Verificación en software.</i>	106
Capítulo IV: Construcción, montaje y pruebas	108
Construcción de la estructural principal.	108
Tablero de control eléctrico.....	109
Tanque almacenador de agua	110
Tablero de soporte.	111
Base de la bomba de agua.....	112
Ducto de descarga de agua.	113
Empaque	114
Sistema de tuberías.....	115
Base del flujómetro.	116
Tubería flexible	117
Montaje del sistema.	118
Resumen de materiales seleccionados.	119
Pruebas de funcionamiento.....	121

<i>Pruebas de funcionamiento de la bomba centrífuga.....</i>	<i>121</i>
<i>Pruebas de funcionamiento del generador microhidráulico.</i>	<i>125</i>
<i>Prueba de funcionamiento del módulo didáctico.....</i>	<i>126</i>
Análisis de resultados.	128
<i>Datos de generación con cargas altas</i>	<i>130</i>
Capítulo V: Conclusiones y recomendaciones.....	132
Conclusiones.....	132
Recomendaciones.....	134
Bibliografía.	135
Anexos.....	139

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Energía hidráulica</i>	28
Figura 2 <i>Aplicación de la energía potencial del agua</i>	31
Figura 3 <i>Rotor de polos salientes</i>	32
Figura 4 <i>Rotor polos no salientes</i>	33
Figura 5 <i>Generador de flujo radial</i>	34
Figura 6 <i>Pico central hidroeléctrica</i>	36
Figura 7 <i>Turbina Pelton</i>	37
Figura 8 <i>Turbina Francis</i>	38
Figura 9 <i>Turbina flujo cruzado</i>	39
Figura 10 <i>Turbina turgo</i>	40
Figura 11 <i>Circuito hidráulico</i>	41
Figura 12 <i>Medidor de caudal</i>	42
Figura 13 <i>Tubeo Venturi</i>	43
Figura 14 <i>Boquilla de flujo</i>	43
Figura 15 <i>Rotámetro sobre la tubería</i>	44
Figura 16 <i>Diagrama de Moody</i>	53
Figura 17 <i>Momento en viga recta</i>	59
Figura 18 <i>Matriz de la casa de la calidad</i>	61
Figura 19 <i>Banco de resistencias</i>	67
Figura 20 <i>Gráfica bomba centrífuga</i>	68
Figura 21 <i>Diagrama P&ID</i>	69
Figura 22 <i>Diagrama de Moody</i>	75
Figura 23 <i>Características de la bomba seleccionada</i>	83
Figura 24 <i>Datos bomba seleccionada</i>	84

Figura 25 <i>Manómetro Genebre.</i>	85
Figura 26 <i>Flujómetro modelo 570.</i>	86
Figura 27 <i>Diagrama de fuerza</i>	90
Figura 28 <i>Breaker seleccionado</i>	92
Figura 29 <i>Curva C de interruptor termomagnético.</i>	93
Figura 30 <i>Contactador seleccionado.</i>	94
Figura 31 <i>Relé térmico seleccionado</i>	95
Figura 32 <i>Calibre de conductores AWG para alimentación.</i>	96
Figura 33 <i>Calibre de conductores recomendados para el sistema de control.</i>	96
Figura 34 <i>Módulo de Multímetro para tablero.</i>	97
Figura 35 <i>Estructura principal.</i>	99
Figura 36 <i>Geometría del tanque.</i>	100
Figura 37 <i>Diagrama de fuerzas</i>	102
Figura 38 <i>Diagrama de cuerpo libre MDSolid.</i>	103
Figura 39 <i>Diagrama de esfuerzos cortantes</i>	104
Figura 40 <i>Diagrama de momento flector</i>	104
Figura 41 <i>Catálogo Dipac perfil Cuadrado.</i>	106
Figura 42 <i>Estructura principal.</i>	108
Figura 43 <i>Tablero de control eléctrico.</i>	109
Figura 44 <i>Tanque almacenador de agua.</i>	110
Figura 45 <i>Tablero de soporte.</i>	111
Figura 46 <i>Base de la bomba de agua.</i>	112
Figura 47 <i>Ducto de descarga de agua.</i>	113
Figura 48 <i>Empaque.</i>	114
Figura 49 <i>Sistema de tuberías.</i>	115

Figura 50 <i>Base del flujómetro</i>	116
Figura 51 <i>Tubería Flexible</i>	117
Figura 52 <i>Montaje del sistema</i>	118
Figura 53 <i>Prueba de funcionamiento de la bomba centrífuga</i>	121
Figura 54 <i>Tipos de succión</i>	124
Figura 55 <i>Conexión del banco de resistencias</i>	126
Figura 56 <i>Gráfica Potencia - Corriente</i>	128
Figura 57 <i>Gráfica Voltaje - Corriente</i>	129

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Clasificación de centrales hidroeléctricas</i>	35
Tabla 2 <i>Parámetros de selección de bomba</i>	47
Tabla 3 <i>Velocidades recomendadas</i>	50
Tabla 4 <i>Factores de seguridad</i>	56
Tabla 5 <i>Requisitos del cliente</i>	62
Tabla 6 <i>Requisitos funcionales</i>	63
Tabla 7 <i>Especificaciones técnicas para el diseño</i>	64
Tabla 8 <i>Alternativas de construcción</i>	65
Tabla 9 <i>Modelos de generadores Zohan</i>	67
Tabla 10 <i>Clasificación tuberías</i>	71
Tabla 11 <i>Resumen de los cálculos realizados</i>	72
Tabla 12 <i>Características del agua</i>	73
Tabla 13 <i>Rugosidad de la tubería</i>	74
Tabla 14 <i>Resistencia en válvulas y accesorios</i>	76
Tabla 15 <i>Componentes del circuito</i>	77
Tabla 16 <i>Resumen de las pérdidas en la tubería de descarga</i>	78
Tabla 17 <i>Presiones del agua</i>	79
Tabla 18 <i>Capacidad de los componentes del módulo</i>	87
Tabla 19 <i>Módulo de elasticidad del PVC</i>	88
Tabla 20 <i>Selección de contactores y relés bimetálicos para motores</i>	91
Tabla 21 <i>Resumen del diseño eléctrico</i>	98
Tabla 22 <i>Propiedades ASTM A36</i>	105
Tabla 23 <i>Resultados del análisis de la estructura principal</i>	107
Tabla 24 <i>Resumen de materiales seleccionados</i>	120

Tabla 25 Componentes usados para la prueba de funcionamiento de la bomba centrífuga. ..	122
Tabla 26 Parámetros obtenidos en la prueba de funcionamiento de la bomba centrífuga.	123
Tabla 27 Parámetros Obtenidos en Pruebas	123
Tabla 28 Datos del generador microhidráulico con succión positiva.	125
Tabla 29 Datos obtenidos de la prueba realizada.	127
Tabla 30 Comparación de parámetros hidráulicos del generador.	130

Resumen

El siguiente trabajo presenta el diseño y construcción de un módulo didáctico de una pico central hidroeléctrica, la cual es implementada en el laboratorio de energías renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga, teniendo como objetivo principal el proporcionar a los estudiantes un aprendizaje práctico acerca del aprovechamiento del recurso hídrico como fuente de energía. Para llevar a cabo este proyecto, se utilizó un generador microhidráulico el cual mediante una turbina tipo turgo, transforma la energía potencial del agua en energía eléctrica usando el método de inyección de fluido directamente hacia los álabes del interior de esta. La selección de esta turbina se basó en su capacidad para adaptarse a las características de caudal y altura proporcionada por una bomba centrífuga que conforma parte del sistema con el fin de obtener un óptimo desempeño del módulo didáctico de generación, De igual manera, se llevó a cabo una selección de los materiales usados en la construcción de la pico central hidroeléctrica, considerando la resistencia, durabilidad y costo, buscando obtener un equilibrio entre eficiencia y viabilidad económica. Una vez definido el diseño se implementó el módulo y se realizó pruebas experimentales para verificar el funcionamiento del generador microhidráulico y de la turbina tipo turgo en diferentes valores de carga conectada a la salida del generador, garantizando así un desempeño óptimo de la pico central hidroeléctrica.

Palabras clave: pico hidroeléctrica, bomba de agua, energías renovables.

Abstract.

The following work presents the design and construction of a didactic module of a pico hydroelectric power plant, which is implemented in the renewable energy laboratory of the University of the Armed Forces ESPE, Latacunga headquarters, with the main objective of providing students with a learning about the use of water resources as a source of energy. To carry out this project, a micro-hydraulic generator was used which, through a turgo-type turbine, transforms the potential energy of water into electrical energy using the fluid injection method directly into the blades inside it. The selection of this turbine was based on its ability to adapt to the characteristics of flow and head provided by a centrifugal pump that is part of the system in order to obtain optimal performance of the generation training module. In the same way, a selection of the materials used in the construction of the hydroelectric central pico was carried out, considering the resistance, durability and cost, seeking to obtain a balance between efficiency and economic viability. Once the design was defined, the module was implemented and experimental tests were carried out to verify the operation of the micro-hydraulic generator and the turgo-type turbine at different values of load connected to the output of the generator, thus guaranteeing optimal performance of the hydroelectric power station.

Keywords: hydroelectric peak, water pumps, renewable energy.

Capítulo I

Introducción

Este capítulo trata de la problemática actual que enfrenta el planeta Tierra debido al crecimiento poblacional y la consiguiente necesidad de recursos, y como la generación de energía es uno de los aspectos claves de esta problemática, las energías renovables se presentan como una alternativa sostenible y respetuosa con el medio ambiente, el Ecuador destaca por ser un país generador de energía hídrica limpia y renovable, y cómo la implementación de centrales hidroeléctricas ha permitido al país generar electricidad de manera eficiente y sostenible. Se plantea la necesidad de construir un módulo didáctico en forma de laboratorio para simular una central hidroeléctrica, con el objetivo de fomentar la creación de nuevas formas de utilización de recursos y mejorar la formación de futuros ingenieros.

Antecedentes

En la actualidad, el planeta Tierra se enfrenta a un desafío cada vez mayor debido al crecimiento poblacional y la consiguiente necesidad de recursos, este incremento demográfico ha llevado a una época de consumismo desmesurado, donde la explotación de recursos naturales se ha convertido en una práctica cotidiana, dando como resultado una sobreexplotación de recursos fósiles y altos niveles de contaminación que amenazan la sostenibilidad del planeta.

La generación de energía es uno de los aspectos clave de esta problemática, el uso masivo de combustibles fósiles ha demostrado ser perjudicial para el medio ambiente, debido a los procesos de transformación y combustión de estos combustibles emiten múltiples contaminantes que afectan directamente a la capa de ozono. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la energía eléctrica es vital para el desarrollo social y económico del ser humano.

Ante este escenario, surge la necesidad de buscar nuevas fuentes de energía que sean sostenibles y amigables con el medio ambiente, las energías renovables se presentan como una alternativa viable en esta búsqueda de fuentes naturales, como la solar, eólica e hídrica, no solo evitan los efectos contaminantes asociados a los combustibles fósiles, sino también minimizan las afecciones al ecosistema.

El Ecuador es un país que cuenta con una amplia variedad de recursos naturales, de las cuales el agua desempeña un papel fundamental en la generación de energía. Se estima que el volumen total de agua disponible en el país alcanza los 357 km³ distribuidos a lo largo de su territorio, lo que posiciona a Ecuador como un potencial generador de energía hídrica limpia y renovable (Benavides, 2019).

En el año 2020, Ecuador logró generar el 92% de su energía a partir de fuentes hídricas, demostrando así el potencial y la viabilidad de esta forma de generación, el 7% provino de fuentes térmicas y un 1% de fuentes no convencionales, como la solar, eólica, biomasa, biogás y geotérmica. La energía hídrica se destaca por su bajo costo de generación y mantenimiento, la no dependencia de combustibles fósiles, ausencia de problemas de contaminación, larga vida útil y retorno del recurso hídrico a su cauce natural. (Landa & Llanganate, 2009).

Teniendo en cuenta todas estas ventajas, se plantea la necesidad de construir un módulo didáctico tamaño laboratorio para simular el funcionamiento de una central hidroeléctrica. Este módulo se implementa en el área de energías renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas E.S.P.E sede Latacunga, siendo el principal objetivo mostrar el funcionamiento de una central hidroeléctrica, utilizando elementos electromecánicos, hidráulicos y eléctricos para transformar el recurso hídrico en energía eléctrica (Espitia, 2013).

Es esencial aprovechar de manera adecuada este valioso recurso, ya que representa la mayor parte de la generación de energía eléctrica en el país y al enseñar el funcionamiento de una central hidroeléctrica desde la formación de los futuros ingenieros, se busca fomentar la creación de nuevas formas de utilización del recurso y mejorar su eficiencia, de esta manera se puede avanzar hacia la diversificación de la matriz energética. (Hauser, 2011).

Formulación del problema

En la actualidad, el laboratorio de energías renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas E.S.P.E sede Latacunga cuenta con equipos altamente competentes para el estudio de la energía solar y la energía eólica. Sin embargo, se ha visto la necesidad en el laboratorio de las energías renovables la falta de un módulo didáctico que permita a los estudiantes adquirir conocimientos prácticos sobre el funcionamiento de una central hidroeléctrica.

Cabe destacar que la carrera de ingeniería Electromecánica proporciona a los estudiantes conocimientos técnicos orientados a la rama de la ciencia de la energía y la mecánica, entre las asignaturas más relevantes se encuentran el funcionamiento de motores DC, circuitos eléctricos, diseño de elementos mecánicos y procesos de mecanizado, entre otras. Para complementar estos conocimientos teóricos, se cuenta con laboratorios equipados con maquinaria y equipos mecánicos que permiten poner en práctica los conceptos aprendidos.

Es por ello, que se ha decidido diseñar y construir un módulo didáctico que simule una pico central hidroeléctrica, la cual permitirá a los estudiantes comprender las distintas variables que intervienen en el funcionamiento de una central hidroeléctrica, como la altura, el caudal, el tipo de generador y la potencia. A través del uso de este módulo, los estudiantes pueden aplicar los conocimientos teóricos recibidos durante toda su carrera y ponerlos en práctica.

Con la incorporación de este módulo didáctico de una pico central hidroeléctrica, se completa el área de energías renovables en el laboratorio, abarcando todas las aplicaciones

relevantes para nuestro país. Esto preparará a los futuros profesionales para su desempeño laboral en el campo de las energías renovables, brindándoles las herramientas necesarias para enfrentar los desafíos que se presentan en este campo en constante evolución.

¿La implementación de un módulo interactivo para el laboratorio de energías renovables beneficiará a los estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L en comprender de mejor manera el funcionamiento de una central hidroeléctrica y sus principios básicos de funcionamiento?

Objetivos del proyecto

Objetivo general

Diseñar y construir un módulo didáctico de una pico central hidroeléctrica con una potencia óptima para laboratorio, obteniendo el recurso hídrico de una bomba de agua para alimentar a la turbina; que permita realizar prácticas de operación para facilitar el aprendizaje.

Objetivos específicos

- Dimensionar la potencia de salida que tendrá el módulo didáctico de una pico central hidroeléctrica.
- Diseñar el circuito hidráulico para el correcto dimensionamiento del sistema de una pico central hidroeléctrica mediante el uso de una bomba de agua.
- Construir el módulo e implementar medidores de variables mecánicas y eléctricas en el proceso de generación de electricidad.
- Realizar prácticas de operación, control de parámetros y regulación de variables que intervienen en el funcionamiento del sistema de una pico central hidroeléctrica.

Justificación e importancia

Debido a la importancia de los recursos renovables en el campo de la ingeniería, es fundamental que la Universidad de Las Fuerzas Armadas E.S.P.E sede Latacunga continúe su desarrollo y se involucre de manera oportuna en este ámbito, se ha identificado una necesidad en el área de recursos renovables relacionada con la implementación de un módulo para realizar prácticas de energía hídrica, la universidad ha dado pasos importantes al priorizar la implementación de equipos y módulos didácticos que permitan a los estudiantes comprender mejor los conceptos teóricos llevándolos a la práctica.

Sin embargo, existe una brecha en cuanto al conocimiento práctico sobre centrales hidroeléctricas, tomando en consideración que el Ecuador es conocido por su alto nivel en la generación eléctrica a través de centrales hidroeléctricas, la universidad carece de un módulo para prácticas de laboratorio en este campo, lo que implica que los estudiantes solo adquieran conocimientos teóricos sobre el funcionamiento de una central hidroeléctrica, lo cual puede ser insuficiente para su formación como futuros profesionales.

Es crucial que los nuevos ingenieros cuenten con una comprensión sólida tanto teórica como práctica sobre el funcionamiento de las centrales hidroeléctricas, ya que esto les permitirá contribuir de manera efectiva al desarrollo sostenible y a la producción de energía limpia en el país, por lo tanto, es necesario abordar esta necesidad implementando un módulo para prácticas de energía hidroeléctrica en el laboratorio de energías renovables, brindando a los estudiantes la oportunidad de aplicar sus conocimientos en un entorno práctico, seguro y fortaleciendo su formación como profesionales en el campo de los recursos renovables.

Hipótesis

¿La implementación de un módulo interactivo para el laboratorio de energías renovables beneficiará a los estudiantes de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE-L en comprender de mejor manera el funcionamiento de una central hidroeléctrica y sus principios básicos de funcionamiento?

Variables de investigación***Variables independientes***

Diseño y construcción de un módulo de generación hídrica para los laboratorios de energías renovables de la universidad de las fuerzas armadas ESPE-L.

Variables dependientes

Facilitar el aprendizaje y entendimiento del funcionamiento de una pico central hidroeléctrica para los estudiantes que cursen la materia de energías renovables en la universidad de las fuerzas armadas ESPE-L.

Capítulo II

Fundamentación teórica

Energía eléctrica

La energía eléctrica se produce de la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, estos están conectados por un material que permite que fluyan las cargas eléctricas, se crea una corriente eléctrica. La energía eléctrica puede convertirse en muchos otros tipos de energía, como luz, movimiento o calor.

Energía hidráulica.

La energía hidráulica se obtiene a partir de la utilización de la fuerza del agua que se encuentra en movimiento, mediante la transformación de la energía cinética y potencial del agua en energía mecánica y eléctrica, se realiza mediante la implementación de centrales hidroeléctricas, generando una fuente de energía limpia y renovable sin emitir gases contaminantes, su implementación puede tener impactos ambientales y sociales significativos, su utilización contribuye a reducir el deterioro del planeta.

Figura 1

Energía hidráulica



Nota. En la figura se puede observar la aplicación de la energía hidráulica. Tomado de (Nelson, 2016).

Recurso hídrico.

El recurso hídrico es la capacidad de aprovechamiento de un fluido, en su mayoría de agua, al tener grandes cantidades de caudales se los utiliza para generar energía mecánica, la cual por medio de turbinas se transforman en energía eléctrica, existen dos formas de utilización de este, estas pueden ser mediante desviación de cauce y de tipo embalsamiento. (Hauser, 2011).

- ❖ Caudal. Es el volumen del agua que fluye en un tiempo, usualmente se mide en litros por segundo o en metros cúbicos por segundo.
- ❖ Variaciones del caudal. Los recursos hídricos en la naturaleza son muy variables y para tener un valor promedio aproximado se debe obtener datos de un mes o años.
- ❖ Concentración de sedimento. Partículas de desecho, arena.

Además de estos aspectos, en la generación también se debe tener en cuenta los siguientes aspectos:

- ❖ Altura bruta disponible. La distancia entre el recurso hídrico y el rodete de la turbina (Altura geodésica).
- ❖ Altura neta equivalente. Altura equivalente real percibida por la turbina.

Así tenemos:

$$Q = v * A \tag{1}$$

Donde:

Q: Es caudal.

v: Velocidad del fluido.

A: Área.

Para el cálculo de la potencia hidráulica para una central hidráulica se tiene la siguiente Ecuación.

$$P_h = \rho * g * h * Q \quad (2)$$

Donde:

P_h : Potencia Hidráulica.

ρ : Densidad del fluido.

h : Altura neta.

Q : Caudal.

Energía potencial del agua.

La energía potencial del agua se refiere a la capacidad que tiene el agua de realizar trabajo debido a su posición o altura con respecto a un punto de referencia, como el nivel del suelo. Esta es el resultado de la fuerza de gravedad que actúa sobre el agua y puede ser aprovechada para generar diferentes formas de energía, como la energía eléctrica o energía mecánica, como es en las centrales.

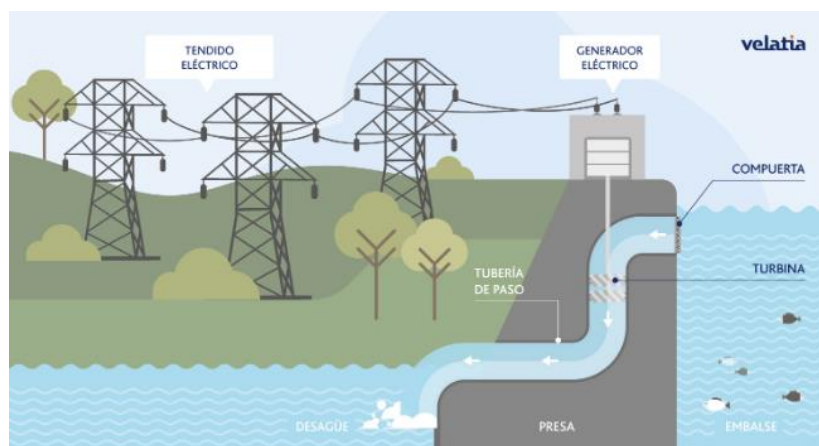
Cuando el agua se encuentra en una posición elevada, posee una mayor cantidad de energía potencial, esta se convierte en energía cinética cuando el agua cae o fluye hacia un nivel más bajo, en las centrales hidroeléctricas, se aprovecha esta energía cinética mediante la construcción de embalses o utilizando el flujo natural de ríos o cauces naturales.

En el caso de los embalses, se almacena una gran cantidad de agua en una posición elevada, cuando se necesita generar electricidad, el agua es liberada y fluye hacia las turbinas,

lo que provoca su rotación cuando la energía cinética del agua en movimiento se transfiere a las turbinas, que están conectadas a generadores eléctricos, estos generadores convierten la energía mecánica en energía eléctrica utilizable.

Figura 2

Aplicación de la energía potencial del agua



Nota. En la figura se muestra el funcionamiento de una central hidroeléctrica. Tomado de (Velatia, 2020).

Generadores.

Un generador es un convertidor de energía el cual transforma la energía mecánica a energía eléctrica, en otras palabras, es lo contrario a un motor eléctrico.

La transformación de la energía proveniente del eje del rotor (energía mecánica) en eléctrica se realiza por la acción de un campo magnético sobre el bobinado que se encuentra en el estator del generador, al realizar un movimiento en el eje del generador de forma mecánica que sea de forma relativa entre el campo generado por el rotor y el bobinado del estator, se genera una fuerza electromotriz (Santillán & David, 2016).

Los generadores síncronos, el campo magnético que se genera en el rotor provienen de una fuente DC, al alimentar una bobina con corriente DC se convierte en un electroimán creando así un campo magnético, los rotores de los generadores pueden ser construidos salientes o no salientes.

En el caso del rotor de polos salientes en la Figura 3, se encuentran alrededor de la superficie del rotor proyectados hacia afuera, su principal característica es que este cuenta con un gran número de polos, los cuales pueden llegar hasta 64. Este tipo de generadores se observa que mayoría de aplicaciones son en motores térmicos o turbinas hidráulicas para sistemas de baja velocidad (Santillán & David, 2016).

Figura 3

Rotor de polos salientes.



Nota. En la figura se muestra un rotor de polos salientes. Tomado de (Electromotores, 2020).

El rotor de polos no salientes, representado en la Figura 4, es un tipo de rotor utilizado en motores eléctricos que no tiene salientes en su estructura, lo que le permite tener una mayor eficiencia y menor ruido, una de sus principales características es el número reducido de polos que posee, ya que suelen ser de 2 a 4, obteniendo así un diseño mucho más fácil.

Figura 4

Rotor polos no salientes



Nota. En la figura se muestra un rotor de polos no salientes. Tomado de (Rodríguez, 2015).

Generador de flujo radial.

Los generadores de flujo radial obtienen su nombre debido a que el campo magnético generado por los imanes permanentes es perpendicular al eje de giro, lo que provoca un flujo en el entrehierro en dirección radial. Esto significa que el campo magnético se orienta de forma perpendicular al eje de giro o en dirección radial.

Existen dos tipos de máquinas rotatorias o de flujo radial: los generadores, que convierten la energía mecánica en eléctrica, y los motores, que generan energía eléctrica a partir de energía mecánica, tanto las máquinas de corriente continua como las de corriente alterna pueden funcionar como motores o generadores sin necesidad de modificaciones previas.

El primer principio, conocido como "acción del generador", se refiere a la inducción de voltaje en un conductor presente en un campo magnético cuando el flujo magnético es interrumpido por el conductor. Esto se realiza para aprovechar la energía mecánica y generar movimiento.

El segundo principio, denominado "acción del motor", se refiere a las fuerzas mecánicas que se producen entre imanes. Al acercar o alejar un imán del otro, se generan campos magnéticos que producen energía eléctrica y, a su vez, generan movimiento debido a las fuerzas entre los dos campos magnéticos (Ramos & Carrillo, 2019).

Figura 5

Generador de flujo radial.



Nota. En la figura se muestra un generador de imanes permanentes. Tomado de (Greef,2020).

Hidroeléctricas

Las centrales hidroeléctricas son instalaciones diseñadas para aprovechar la energía potencial del agua en movimiento, ya sea de ríos, embalses u otras fuentes de agua, tomando en consideración su capacidad para convertir esta energía en electricidad, las centrales hidroeléctricas ofrecen una serie de ventajas:

- Su capacidad para regular el suministro de energía.
- Al almacenar grandes volúmenes de agua en embalse.
- Liberar el agua según la demanda de electricidad.

- Permite un suministro constante y confiable del recurso hídrico.
- Larga vida útil de las centrales hidroeléctricas, están diseñadas para funcionar durante décadas, lo que las convierte en una inversión a largo plazo.
- El mantenimiento es relativamente bajo y reduce los costos operativos a lo largo del tiempo.

Clasificación

La clasificación de centrales hidroeléctricas se define por su capacidad y su potencia de generación.

Tabla 1

Clasificación de centrales hidroeléctricas.

Clasificación de las centrales Hidroeléctricas según su potencia.	
Denominación	Potencia
Pico central	$P < 10\text{kW}$
Micro central	$10\text{kW} < P < 50\text{kW}$
Mini central	$50\text{kW} < P < 1000\text{kW}$
Pequeña Central	$1\text{MW} < P < 5\text{MW}$
Mediana Central	$5\text{MW} < P < 50\text{MW}$
Gran Central	$P > 50\text{MW}$

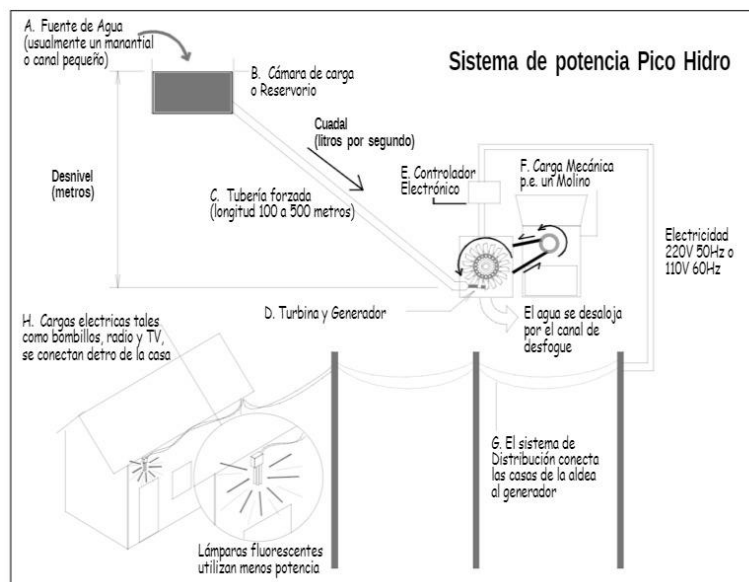
Nota. Esta tabla muestra la clasificación de las centrales hidroeléctricas por su potencia de generación. Tomado de (IDEA,2006).

Pico central hidroeléctrica. Según Landa & Llanganate (2009), la pico hidroeléctrica son las centrales que generan electricidad a menos cinco kilovatios, al ser estos sistemas de baja generación tiene ventajas respecto a centrales grandes, esto es debido a distintos

procedimientos que se realizan en los pasos de diseño, las pico hidroeléctricas se encuentra en mayor número en lugares donde el acceso de la electricidad por transmisión es muy complicada, se instalan en lugares pobres e inaccesibles, con esto se puede realizar el funcionamiento de equipos eléctricos de baja potencia. Este sistema de pico central hidroeléctrica puede funcionar conectado a la red o de manera aislada. (S. M. González et al., 2011).

Figura 6

Pico central hidroeléctrica.



Nota. En la figura se muestra la instalación de una pico central hidroeléctrica. Tomado de (Maher & Smith, 2001).

Turbinas Hidráulicas.

La turbina hidráulica es un dispositivo que aprovecha la energía del agua en movimiento para generar energía mecánica, su sistema de funcionamiento se basa en un rotor el cual por medio de sus álabes que giran dentro de una carcasa, cuando el agua fluye a través de ella, su

presión y velocidad hacen girar el rotor, convirtiendo así la energía hidráulica en energía mecánica utilizable en su gran mayoría en la generación de energía hidroeléctrica.

Existen varios tipos de turbinas hidráulicas, cada tipo de turbina tiene características y aplicaciones específicas en función de las condiciones del flujo de agua y los requerimientos de generación de energía.(Fernández, 2015)

Turbina de acción o impulso.

Las turbinas de acción o impulso se basan en el principio de conservación del momento lineal, es decir, el agua llevada a alta presión es dirigida a través de una boquilla o una serie de toberas hacia las palas del rodete, proporcionándole velocidad y presión, al impactar las palas, el agua transfiere su energía cinética al rodete, generando un movimiento giratorio, produciendo energía mecánica resultante que puede ser utilizada para impulsar máquinas o generar electricidad si son implementadas en centrales hidroeléctricas. Estas turbinas son eficientes en saltos de agua medios o altos y se clasifican según el flujo del agua, como turbinas de chorro libre, turbinas Pelton y turbinas Francis. (Ceupe, 2017)

Figura 7

Turbina Pelton.



Nota. En la figura se muestra una turbina Pelton instalada. Tomado de (Ceupe, 2017).

Turbinas de reacción.

Las turbinas de reacción son ampliamente utilizadas en la generación de energía hidroeléctrica, ya que utilizan agua, la cual ingresa a la turbina a través de una tubería forzada y luego pasa por una cámara espiral, donde se acelera y dirige hacia el distribuidor, el distribuidor regula el flujo del agua hacia el rodete, que está compuesto por álabes curvados, a medida que el agua pasa por los álabes del rodete, ejerce una fuerza sobre ellos, haciendo que la turbina gire, el agua se descarga a través del tubo de aspiración o descarga. (M. P. González, 2009).

Figura 8

Turbina Francis.



Nota. En la figura se muestra una turbina Francis desmontada. Tomado de (Ceupe, 2017).

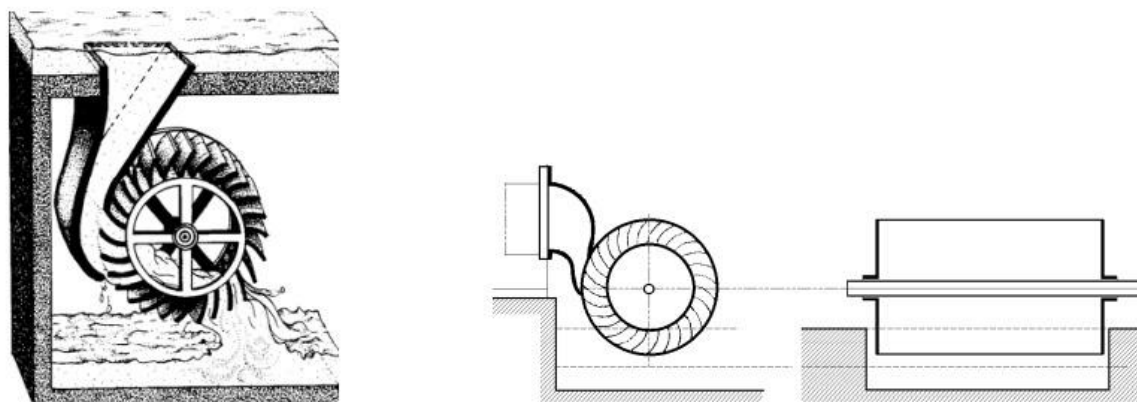
Esta rotación del rodete se convierte en energía mecánica que puede ser aprovechada para generar electricidad mediante un generador acoplado a la turbina, las turbinas de reacción son altamente eficientes y pueden adaptarse a una amplia gama de condiciones de flujo y carga, las turbinas de reacción son eficientes en saltos de agua bajos o medios y se clasifican según el flujo del agua, como turbinas Kaplan y turbinas Francis (Fernández, 2015).

Turbina de flujo cruzado.

En las turbinas de flujo cruzado funciona bajo el principio de la transformación de la energía potencial en energía cinética del fluido es transportado por una tubería de conducción, donde el fluido llega hacia el inyector y debido a la geometría de esta acelera el fluido y lo direcciona hacia el rodete donde entra en contacto con una determinada cantidad de álabes en admisión colocados en un ángulo (Illidge et al., 2020).

Figura 9

Turbina flujo cruzado



Nota. En la figura se muestra una turbina .Tomado de (Fernández, 2015).

Turbina turgo.

La turbina turgo permite que el chorro de agua impacte a varias cucharas simultáneamente, esto debido a que la interferencia entre el chorro de salida y de entrada es menor que en turbinas Pelton, al comparar estas turbinas en las condiciones de igual diámetro de rodete, la turbina turgo admite un caudal mayor en el diseño cercano al doble respecto a la turbina Pelton.

La turbina tipo turgo es un tipo de turbina hidráulica utilizada para generar energía eléctrica a partir del flujo de agua a alta presión, consiste en un rotor con álabes curvados que

se encuentra sumergido en el agua, la cual ingresa al rotor a través de una tobera o inyector, creando un chorro de alta velocidad que impacta en los álabes curvados.

Figura 10

Turbina turgo



Nota. En la figura se muestra un generador con una turbina turgo. Tomado de (Zohan, 2014).

Por lo tanto, se puede decir que la potencia que puede generar es también cercana al doble, siendo esto una de las principales características para ser más usadas en microcentrales o picos centrales (Hauser, 2011).

La eficiencia de una turbina tipo turgo depende de varios factores, como la presión y caudal del agua, el diseño de los álabes y el tamaño del rotor, estas turbinas son especialmente adecuadas para lugares con caudales moderados pero altas presiones, como en sistemas de conducción de agua a gran altura.

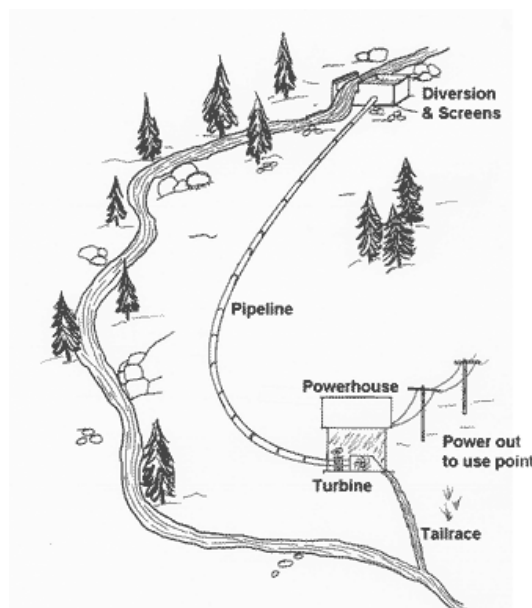
Circuito hidráulico.

El circuito hidráulico es un sistema en el que hay una serie de elementos correlacionados para poder transformar la energía proveniente de un recurso hídrico hacia la turbina, el agua fluye en un extremo y pasa a través de tuberías y de componentes para poder

controlar el flujo de agua con el fin de que llegue a una turbina acoplada a un generador (Canyon, 2014).

Figura 11

Circuito hidráulico.



Nota. En la figura se muestra el circuito hidráulico de una central hidroeléctrica. Tomado de (Canyon, 2014).

En una central hidroeléctrica de potencias bajas se utiliza un diseño hidráulico el cual es encargado de mover la turbina para poder generar electricidad, el diseño se realiza con la finalidad de definir los diámetros y longitud de las deferentes tuberías que compondrán el sistema, se debe tomar en cuenta los parámetros del lugar y los componentes.

Componentes de un circuito hidráulico.

En un circuito hidráulico donde el fluido es agua se necesita varias componentes para poder realizar el circuito y la debida instrumentación para poder controlar, así tenemos:

Medidores de caudal.

Los medidores de caudal tienen la capacidad de censar la velocidad y rapidez del flujo de volumen de cualquier líquido o gas, la medición del flujo es esencial para el proceso de control de procesos y la transferencia a de los fluidos.

Existen variedad de medidores de flujo, algunos de estos dispositivos miden el caudal del fluido de manera directa, mientras existen los cuales miden una velocidad de flujo promedio. Según sea las condiciones de lugar donde se va a realizar se tendrá diferentes formas de medir el flujo, entre estas tenemos:

Figura 12

Medidor de caudal.



Nota. En la figura se muestra medidor de flujo de área variable. Tomado de (Villajulca, 2009)

Tubo Venturi. Es un tubo el cual posee una disminución de diámetros, lo que ocasiona que el fluido aumente su velocidad, pero disminuya su presión (Rosetta, 2017).

El tubo Venturi se constituye de una entrada cilíndrica, una tubería en forma de cono que es seguido por una sección cilíndrica, el flujo que proviene de la tubería principal aumenta

su velocidad en la zona de la garganta en donde también disminuye su velocidad, en ese instante, el fluido se expande hasta llegar al diámetro de la tubería principal (Mott, 2015).

Figura 13

Tubo Venturi



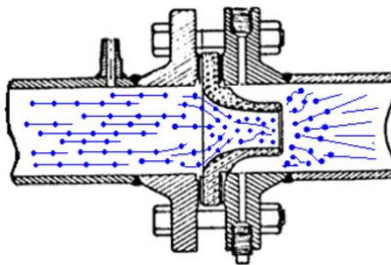
Nota. En la figura se representa un tubo Venturi. Tomado de (Wika, 2019).

La diferencia de presión se da en la tubería principal y la sección de la garganta para un fluido incompresible se dice que el caudal:

La Boquilla de flujo. La boquilla es una reducción gradual al flujo de la corriente y esta sigue por una sección cilíndrica recta y corta donde se mide la presión con respecto a la tubería principal, donde se obtiene la diferencia de presiones para poder medir el caudal que pasa através del conducto (Olivares, 2012).

Figura 14

Boquilla de flujo.



Nota. En la figura se muestra el funcionamiento de la boquilla de flujo. Tomado de (Elprofesor, 2012).

Medidor de flujo de turbina. Este tipo de medidor contienen en su interior una turbina que es libre de rotar dentro del conducto, el fluido al pasar por el cilindro ocasiona que la turbina gire y la rapidez rotacional de la turbina es aproximadamente proporcional a la razón del flujo (Çengel & Cimbala, 2006).

Medidores de área variable. Estos dispositivos usan el mismo principio de medición que los medidores de presión diferencial.

La diferencia entre estos dos medidores de flujo es que en el medidor de presión diferencial el área es constante y existe una diferencia de presiones, en cambio, en el rotámetro el área es la que cambia y la diferencia de presiones es constante (Villajulca, 2009).

Figura 15

Rotámetro sobre la tubería.



Nota. En la figura se muestra un rotámetro previamente ensamblado a su tubería de soporte. Tomado de (Rotad, 2018).

Manómetro.

Un manómetro es un dispositivo que mide la presión de un fluido, generalmente expresada en unidades como psi (libras por pulgada cuadrada) o bar, mediante la lectura de la diferencia entre la presión del fluido y la presión atmosférica.

$$P_m = P_{abs} - P_{atm} \quad (3)$$

Donde:

P_m : Presión manométrica.

P_{abs} : Presión absoluta.

P_{atm} : Presión atmosférica.

El funcionamiento de un manómetro se basa en el tubo de Bourdon que es un tubo enrollado, el fluido al ingresar en la entrada del tubo del manómetro genera una fuerza el cual provoca que el tubo se empiece a desenrollar, este movimiento hace que se pueda mover una aguja con ayuda de un mecanismo el cual indica el valor de la presión (Roman, 2017).

Válvula.

Una válvula es un componente de gran importancia dentro de un sistema de tuberías, su función principal es regular, controlar y dirigir el flujo de fluidos, permite abrir o cerrar el paso, así como ajustar la cantidad de flujo permitido. Hay diferentes tipos de válvulas, como las de compuerta, globo, mariposa, bola y retención, cada una con características específicas para adaptarse a diversas aplicaciones industriales.

Válvula de globo.

Este tipo de válvula realiza su recorrido mediante un giro de la manija de manera sencilla obstruyendo el paso del fluido, este tipo de válvula es de las más comunes y económicas, pero poseen grandes pérdidas debido a su construcción, siendo su factor K de los más altos, las pérdidas que se tiene por parte de esta válvula es debido a la forma que esta hace que la trayectoria del fluido cambie.

Válvula de Retención (Check)

Este tipo de válvula permiten el paso del flujo hacia una dirección, si el fluido desea ir en sentido contrario esta lo bloquea, al tener esta funcionalidad permite aplicarla en el uso para bombear agua a grandes alturas, ya que el fluido no podrá regresar por la tubería por acción de la presión hidrostática en esos instantes.

Válvula de pie

Las válvulas de pie funcionan de igual manera que la válvula check, solo permiten el paso del flujo en una sola dirección, en cambio el uso de una válvula de pie sirve en las tuberías de aspiración de las bombas, ocasionando que estas tuberías nunca estén en vacío impidiendo la cavitación de las bombas o el desborde de los tanques.

Bombas de agua.

La aplicación de las bombas es impulsar el fluido de un lugar hacia otro por medio de un sistema de tuberías, se debe tomar en cuenta las variables que intervienen en el funcionamiento de la bomba como el caudal deseado del fluido mientras en este proceso se transmite al mismo la energía cinética necesaria para poder vencer la carga dinámica total requerida h_a .

Parámetros para la selección de la bomba.

Según (Çengel & Cimbala, 2006) al seleccionar una bomba de agua se debe tomar en consideración los parámetros de funcionamiento para el cual la bomba se pondrá en funcionamiento Tabla 2.

Para el cálculo de la potencia real de una bomba se deben tomar en cuenta el rendimiento de esta:

$$P_{Bomba} = \frac{P_{sal}}{746w * \eta_{Bomba}} [Hp] \quad (4)$$

Donde:

P_{Sal} : Potencia de salida.

η_{Bomba} : Rendimiento de la bomba.

Tabla 2

Parámetros de selección de bomba.

Parámetro	Definición
Tipo de fluido	Se debe tomar en cuenta la naturaleza del fluido al cual se va a utilizar en el proceso para la selección de materiales.
Caudal	Se requiere la capacidad requerida en la velocidad del flujo.
Lado de succión	Las condiciones del lado de succión si es profundo o en la parte alta y a nivel.
Lado de descarga	Las condiciones que se encuentra el lado de descarga.
Altura	La carga total que se pondrá a la bomba h_a
Sistema	El tipo de sistema que la bomba entrega el fluido con los parámetros necesarios.
Fuente de energía eléctrica.	El tipo de fuente de energía que se tenga para poder mover la bomba de agua (energía eléctrica, motor, turbina)
Condiciones de instalación.	Las condiciones del lugar, tamaño del lugar designado, problemas ambientales
Costos	Costos de la compra e instalación del sistema de la bomba. Costo de operación.

Nota. Esta tabla muestra los parámetros de selección de la bomba. Tomado de (Çengel & Cimbala, 2006).

Tipos de bombas.

La clasificación de las bombas o máquinas hidráulicas podría ser por su desplazamiento positivo o máquinas dinámica según sea el modo en que se logre la transferencia de energía.

En esta clasificación tenemos a la máquina de desplazamiento positivo en el cual existe un volumen cerrado donde se dirige el fluido dentro, la transferencia de energía se realiza en el volumen cerrado por movimiento de las fronteras, debido a esto se logra la succión del fluido y la expulsión de este.

Dentro de la clasificación de las máquina hidráulicas se tiene las de tipo dinámica, las cuales a diferencia de las de desplazamiento positivo no poseen un volumen cerrado, como lo es en el caso de tipo dinámicas poseen alabes rotatorios que suministran la energía necesaria al fluido (Çengel & Cimbala, 2006).

Bombas de desplazamiento positivo. Las bombas de desplazamiento positivo son dispositivos mecánicos utilizados para transferir fluidos de un lugar a otro manteniendo la presión y caudal constantes, su funcionamiento se basa en el desplazamiento físico de un volumen fijo de fluido en cada ciclo, este desplazamiento se logra mediante diferentes mecanismos, como el movimiento alternativo de un pistón, el giro de un engranaje o la deformación de un diafragma. (Çengel & Cimbala, 2006).

Las bombas de desplazamiento positivo son esenciales en diversas industrias debido a su capacidad para generar presión y caudal constantes, así como para entregar fluidos de manera precisa y controlada. Su versatilidad y eficiencia las convierten en una herramienta fundamental en aplicaciones que van desde el bombeo de combustibles en la industria petrolera hasta la dosificación precisa de ingredientes en la industria alimentaria.

Bombas axiales. Este tipo de bombas no utilizan las fuerzas centrífugas internas que se ocasionan al girar los álabes, en cambio, su comportamiento se asemeja a los aeroplanos, según (Çengel & Cimbala, 2006) “se genera una fuerza de sustentación con el cambio de la cantidad de movimiento del fluido cuando giran los álabes.

Bombas centrífugas. El principio de funcionamiento de una bomba centrífuga se basa en un rotor, rodete o impuso este dispositivo transfiere la energía mecánica del motor al fluido ocasionando el movimiento.

Este tipo de bombas se utilizan más donde el fluido es más demandante debido a que funciona con altos caudales y existen diseños de potencias pequeñas (Mott, 2015).

Tuberías.

La tubería es un componente en los circuitos hidráulico, son conductos que se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, desde el suministro de agua potable y alcantarillado hasta la distribución de petróleo y gas, los materiales utilizados para fabricar tuberías incluyen acero, hierro fundido, plástico, cobre y otros metales.

Tuberías de acero.

Este tipo de tuberías se utilizan en sistemas de fluidos, como condensadores, intercambiadores de calor, sistemas de que su fluido principal sea el combustible entre otras, estas tuberías no son recomendadas para transportar agua debido a la oxidación para ello se utilizaran tuberías de acero galvanizado o acero inoxidable que es la mejor opción.

Tuberías plásticas

Las tuberías plásticas debido a sus características como su peso, resistencia a varios fluidos y flexibilidad se usan en varias aplicaciones industriales, ya que se tiene varios tipos de plásticos para fabricar las tuberías. (Mott, 2015)

Debido a las características y diversidad de plásticos para realizar las tuberías, esta puede tener las mismas aplicaciones que otro tipo, suelen tener los mismos tamaños y normas en su fabricación.

Tubería PVC. Tubería fabricada con el plástico policloruro de vinilo (PVC)La tubería más usada para la fontanería debido a su gran variedad de medidas y aplicaciones en circuitos

de presión según su medida y denominación PN, debido a ser plástico, su uso es fácil y su precio es accesible.

Velocidades de flujo recomendada.

La velocidad de flujo dentro de un circuito hidráulico es afectada por diversos factores, para escoger una velocidad óptima para el sistema se debe tomar en cuenta el tipo de fluido que se va a transportar, la longitud del circuito y las tolerancias de los diferentes componentes que se encuentran en el circuito hidráulico. Se debe considerar que esta selección puede afectar a la bomba debido al fenómeno de cavitación que al tener velocidades muy altas en el sistema puede provocar una caída de presión en la succión y este llegar a un punto donde la bomba comience a cavitarse, en la siguiente tabla tenemos las velocidades recomendadas (Mott, 2015).

Tabla 3

Velocidades recomendadas.

Velocidades Recomendadas							
Rapidez del flujo de volumen		Línea de succión			Línea de descarga.		
		Tamaño de la tubería	Velocidad		Tamaño de la tubería	Velocidad	
<i>gal/min</i>	<i>m³/h</i>	<i>in</i>	<i>ft/s</i>	<i>m/s</i>	<i>in</i>	<i>ft/s</i>	<i>m/s</i>
10	2.3	1	3.7	1.1	¾	6.0	1.8
100	22.7	2 ½	6.7	2.0	2	9.6	2.9
500	114	5	8.0	2.4	3 ½	16.2	4.9
2000	454	8	12.8	3.9	6	22.2	6.8

Nota. Esta tabla muestra las diferentes velocidades recomendadas según caudal y diámetro.

Tomado de (Mott, 2015).

Número de Reynolds.

El número de Reynolds es muy importante para realizar cálculos de mecánica de fluidos, se utiliza para determinar el tipo de flujo que existe dentro de un sistema, este puede ser de tipo laminar o turbulento y dependen de varios aspectos como la geometría del conducto, tipo de fluido, la rugosidad, la velocidad del fluido y se calcula mediante la multiplicación de la densidad del fluido, la velocidad característica, la longitud característica y la viscosidad dinámica, dividido por la viscosidad cinemática. (Çengel & Cimbala, 2006).

$$Re = \rho * \frac{v * D}{\mu} \quad (5)$$

Donde:

ρ : Densidad del fluido.

v : Velocidad de flujo.

D : Diámetro interno de la tubería.

μ : Viscosidad dinámica.

El número de Reynolds indica que las fuerzas inerciales son grandes con respecto a las fuerzas viscosas, por lo tanto, no pueden evitar aleatoriedades ni rápidas fluctuaciones en el movimiento del flujo, en el cambio de flujo laminar a turbulento existe un rango en donde se produce y se le conoce como flujo transicional.

$Re \leq 2300$, Flujo laminar.

$2300 \leq Re \leq 4000$, Flujo transicional.

$Re \geq 4000$, Flujo Turbulento.

Pérdidas en flujos desarrollados en tubos.

En un circuito hidráulico existen pérdidas debido a fricción de la tubería, el cambio de presión que la fricción genera permite seleccionar el tipo de bombas, para el flujo desarrollado en un tubo, la pérdida de carga que resulta en las paredes de la tubería en el trayecto del fluido se puede expresar mediante la ecuación de Darcy, expresada a continuación. (Potter et al., 2015).

$$h_L = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g} \quad (6)$$

Donde:

h_L : Pérdidas En el trayecto.

f : Fricción en la tubería.

L : Longitud.

D : Diámetro interno de la tubería.

g : Gravedad.

v : Velocidad del fluido.

El diagrama de Moody.

En una tubería el factor de fricción se ve relacionado con la rugosidad relativa y el número de Reynolds $\frac{D}{\epsilon}$, con el número de Reynolds sabiendo si el tipo de flujo es laminar o turbulento, con estos datos obtenidos se pueden representar en la Figura 16, el diagrama de Moody (Çengel & Cimbala, 2006).

Con los datos obtenidos del fluido en el circuito hidráulico y los datos necesarios que el diagrama de Moody requiere, se puede obtener la fricción del circuito hidráulico calculado según sea en tuberías lisas o con rugosidad.

Figura 16

Diagrama de Moody

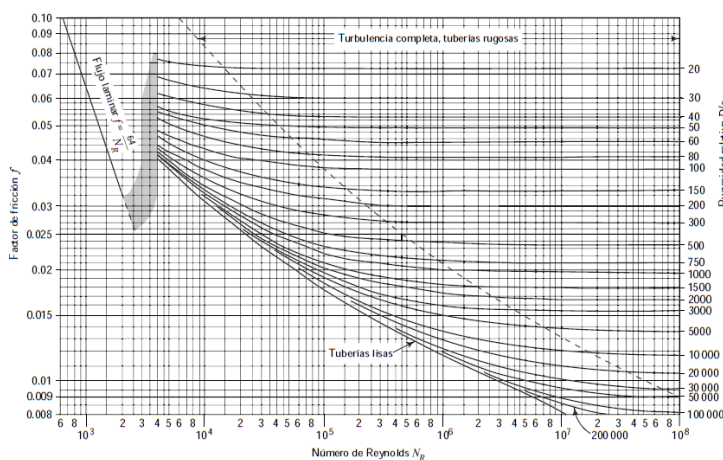


FIGURA 8.7 Diagrama de Moody. (Fuente: Pao, R. H. E. Fluid Mechanics, p. 284. Derechos reservados ©c. 1961. Reproducido con autorización del autor)

Nota. En la figura se presenta el diagrama de Moody. Tomado de (Mott, 2015).

Pérdidas menores en tuberías de flujo.

Los circuitos hidráulicos se constituyen de varias componentes que se ven expuestas a pérdidas debido a su forma, estas pueden ensancharse o disminuir según su diámetro, dichas pérdidas se las conoce como perdidas menores, estas pueden exceder a las perdidas por fricción tomando como referencia a la Ecuación 7. (Potter et al., 2015).

Los circuitos hidráulicos poseen varios componentes y para poder expresar las perdidas menores debido a los componentes se expresan en la siguiente ecuación.

$$H_L = K \frac{v^2}{2g} \quad (7)$$

Donde:

K : Coeficiente de pérdida.

v : Velocidad del flujo.

g : Gravedad.

Cavitación.

En una bomba al existir una succión para que esto suceda debe existir una diferencia de presiones, siendo dentro de la bomba una presión menor para realizar la succión por lo que se crea presiones bajas, al llegar a cierta presión conocida como presión de vapor se crea burbujas de vapor dentro de la bomba de una manera similar a la ebullición (Mott, 2015).

Al presentarse la cavitación en una bomba provoca daños internos que degradan el desempeño, la bomba comienza a hacer ruidos extraños como si tuviera fluido pesado en su interior.

Para evitar este tipo de fenómeno en la entrada de succión no debe estar cerca de la presión de vapor del agua, para ello la tubería de succión debe ser de un mayor diámetro para poder disminuir la velocidad en el que debe fluir, al realizar una succión a nivel o a favor de la bomba.

Carga de Succión positiva neta

Conectar la carga de succión de forma positiva a la bomba centrífuga es de gran importancia para evitar posibles daños internos en su funcionamiento, ya que al mantener un NPSH (Net Positive Suction Head) dentro del rango requerido es fundamental para evitar el fenómeno de la cavitación debido a la presión de vapor dentro de la bomba, para lograr esto es necesario tener en cuenta el diseño y seleccionar una bomba adecuada para el proceso (Mott, 2015).

NPSH. Los diferentes fabricantes de bombas determinan la presión mínima de succión de sus bombas para evitar la cavitación, estos datos proporcionados por los fabricantes se les llama carga de succión neta requerida ($NPSH_R$) y al realizar cálculos en donde se va a realizar la instalación y el circuito de tuberías se tiene la carga de succión neta disponible $NPSH_D$

$$NPSH_D > 1.10 NPSH_R \quad (8)$$

Donde:

$NPSH_D$: Carga de succión positiva disponible en la bomba.

$NPSH_R$: Carga de succión positiva requerida en la bomba.

El cálculo del $NPSH_D$ depende de la presión de vapor del fluido a bombear, se deben considerar las pérdidas en la succión, la ubicación del depósito y la presión en el depósito. El NPSH disponible se calcula utilizando la siguiente ecuación.

$$NPSH_D = h_{sp} + h_s - h_l - h_{vp} \quad (9)$$

$$NPSH_D = h_{sp} - h_s - h_l - h_{vp}$$

Donde:

h_{sp} : Carga de la presión estática;

$$h_{sp} = P_{sp}/\gamma$$

h_s : Altura de succión

h_l : Pérdidas en la tubería

h_{vp} : Carga de presión de vapor del fluido;

$$h_{vp} = P_{vp}/\gamma$$

P_{vp} : Presión de vapor.

P_{sp} : Presión atmosférica.

γ : Peso específico del fluido.

Factor de seguridad.

El factor de seguridad hace que la estructura sea más segura ya sea para el operario con el fin de no tener perdidas en el producto, cuanto mayor sea el factor de seguridad más seguro es el producto final, para esto se muestra a continuación una tabla.

Tabla 4

Factores de seguridad

Equipo	Factor de seguridad
	– FOS –
Componentes de aeronaves	1.5 – 2.5
Calderas	3.5 – 6
Pernos	8.5
Ruedas de hierro fundido	20
Componentes del motor	6 – 8
Eje de alta resistencia	10 – 12
Equipos de elevación – ganchos	8 – 9
Recipientes a presión	3,5 – 6 (especificado en el código de diseño)
Componentes de la turbina – estáticos	6 – 8
Componentes de la turbina – giratorios	2 – 3
Muelle, grande y resistente	4.5
Trabajos de estructura de acero en edificios	4 – 6
Trabajos de acero estructural en puentes	5 – 7
Cables de acero	8 – 9

Nota. En la tabla se muestra los diferentes factores de seguridad. Tomado de (Engineering, 2023).

Golpe de ariete.

El golpe de ariete es un fenómeno que se produce al realizar un cambio brusco en una sección de una tubería, esto produce al interior del conducto ondas que pueden aumentar o disminuir la presión del fluido, este tipo de fenómeno se puede ver cuando se produce cierre de válvulas o al iniciar bombas. Si no se controla adecuadamente, puede generar una presión o depresión excesiva que provoque la rotura de la tubería, por lo tanto, es importante tomar medidas preventivas para evitar daño.(ingeniería, 2018).

Fases o periodos de la tubería.

En la ecuación 10, se tiene tiempo en que tarda la onda de sobrepresión en regresar en la tubería. (F. González et al., 2015).

$$T = \frac{2L}{C} \quad (10)$$

Donde:

T : Periodo.

L : Longitud de tubería

C : Velocidad de propagación.

Realizar una maniobra que el tiempo de cierre de un dispositivo que pueda producir sobrepresión es menor que el período que la onda de sobrepresión regresa se considera rápida.

$$t < \frac{2L}{C}$$

En el caso de que el cierre de dispositivos sea menor que el periodo se considera la siguiente ecuación para el cálculo de sobrepresión:

$$h_a = \frac{Cv}{g} \quad (11)$$

Donde:

h_a : Sobrepresión

C : Velocidad de propagación de la onda de la tubería.

v : Velocidad del flujo.

g : Gravedad.

En el caso que el tiempo de cierre sea más que el periodo en la onda de sobrepresión regrese se considera:

$$t > \frac{2L}{C}$$

Si el cierre es lento, la sobrepresión que existe en ese periodo se realiza con la Ecuación 12, de Michaud-Vensano.

$$h_a = \frac{2Lv}{gt} \quad (12)$$

Donde:

h_a : Sobrepresión

L : Longitud de la tubería.

v : Velocidad del flujo.

g : Gravedad.

t : Tiempo de cierre.

La Ecuación 13, de Allievi se considera para el cálculo de la velocidad de la onda en el agua (F. González et al., 2015).

$$C = \frac{9900}{\sqrt{48,3 + K * \frac{D}{e}}} \quad (13)$$

Donde:

C : La velocidad de la onda.

K : Coeficiente relacionado con el módulo de estabilidad del material.

D : Diámetro de la tubería.

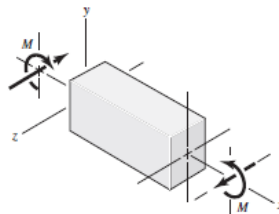
e : Espesor del tubo.

Esfuerzos normales para vigas en flexión

El fragmento de una viga recta que se muestra en la representación gráfica está sometido a un momento flector positivo (M), se puede observar una flecha curva que indica la acción física del momento, así como una flecha recta que representa el vector momento. El eje x se corresponde con el eje neutro de la sección, mientras que el plano XZ , que incluye los ejes neutros de todas las secciones transversales. (Budynas & Nisbett, 2012).

Figura 17

Momento en viga recta.



Nota. En la figura se muestra una viga recta. Tomado de (Budynas & Nisbett, 2012).

Se tiene la siguiente ecuación.

$$\sigma_{max} = \frac{M}{Z} \quad (14)$$

Donde:

σ_{max} : Magnitud máxima del esfuerzo en flexión.

M : Momento

Z : Módulo de sección.

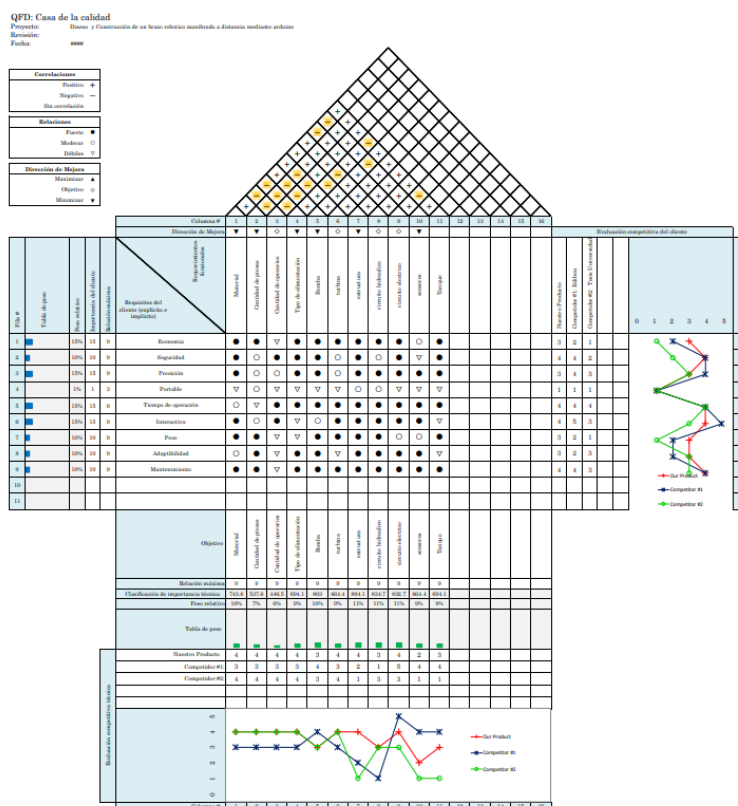
Capítulo III

Diseño y Selección de Dispositivos

El capítulo se enfoca en el diseño del sistema mecánico, hidráulico, eléctrico y de control, mediante la elaboración de la matriz de la casa de la calidad, en la Figura 18, se muestra el diseño de la misma que se detalla en el Anexo A, el cual permite la obtención de las especificaciones del módulo de la pico central hidroeléctrica a base de las necesidades del consumidor para un diseño óptimo de los sistemas.

Figura 18

Matriz de la casa de la calidad.



Nota. En la figura se presenta la matriz QFD de diseño para el módulo didáctico.

Casa de la calidad

Mediante la utilización del método de diseño de la casa de la calidad en donde se describe los requisitos del cliente y los requerimientos funcionales de la máquina. El análisis realizado de estas características se puede observar en la matriz del Anexo A.

Resultados de la matriz de la casa de calidad

La matriz de la casa de la calidad determina los requisitos del cliente como se observa en la Tabla 5 mediante una lluvia de ideas, el principal objetivo que se debe cumplir es el uso del módulo didáctico de una pico central hidroeléctrica, tamaño laboratorio para facilitar el aprendizaje y adquisición de conocimientos de los estudiantes.

Tabla 5

Requisitos del cliente

Requisitos del Cliente	
Propiedades	Magnitud
Economía	15%
Seguridad	10%
Precisión	15%
Portable	1%
Tiempo de operación	15%
Interactividad	15%
Peso	10%
Adaptabilidad	10%
Mantenimiento	10%

Nota. En la tabla se observa los requisitos que son presentados por el cliente.

Los requerimientos funcionales del módulo de la pico central hidroeléctrica se detallan a continuación en la Tabla 6, en donde bajo un criterio de diseño se pone en consideración cada elemento que se utiliza, tomando en consideración sus propiedades técnicas y sus capacidades de adaptabilidad.

Tabla 6*Requisitos funcionales.*

Requisitos Funcionales	
Propiedades	Magnitud
Material	10%
Cantidad de piezas	7%
Cantidad de operarios	6%
Tipo de alimentación	9%
Bomba	10%
Turbina	9%
Estructura	11%
Circuito hidráulico	11%
Circuito eléctrico	11%
Sensores	9%
Tanque	9%

Nota. En la tabla se detalla los requisitos de funcionamiento para un óptimo diseño.

Ficha técnica

Con la información obtenida de la matriz de la casa de calidad y tomando los datos analizados en la Tabla 5 y 6, la cuales se refieren a los requisitos de diseño y de funcionamiento, se realiza una tabla general con la cual se establece los parámetros iniciales con los cuales se debe iniciar el diseño de la pico central hidroeléctrica, lo que garantiza la calidad del producto satisfaciendo las necesidades del cliente donde:

C = Cliente

I = Ingeniería

Tabla 7

Especificaciones técnicas para el diseño.

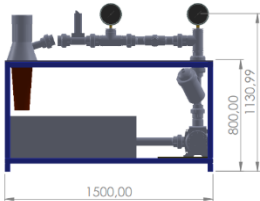
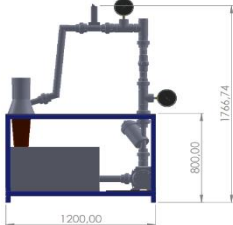
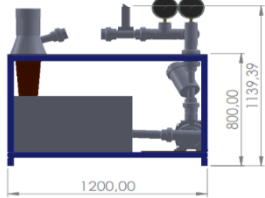
Especificaciones técnicas para el diseño		
ESPE	Producto: Módulo didáctico de una pico central hidroeléctrica	
Concepto	Especificaciones del Producto	Descripción
Función	I+C	El módulo de la pico central hidroeléctrica debe funcionar correctamente.
	I	La Turbina debe generar al menos su potencia nominal
Dimensión	I+C	El módulo debe ser de fácil operación y uso para los practicantes
	C	El módulo debe mantener un tamaño óptimo para el espacio designado en el laboratorio
Movimiento	I	Todos los espacios del módulo deben ser útiles y prácticos.
	I	La máquina debe tener un peso adecuado para eliminar vibraciones del sistema
Montaje	I+C	Acceso y visión fácil a los componentes de ajuste y control del módulo hídrico
	I+C	El módulo es prácticamente estático
	I+C	La máquina debe ser de fácil montaje y mantenimiento.
Fuerzas	I+C	Buena sujeción de los elementos.
	I	Óptimo análisis de reacciones y esfuerzos que existe en la estructura del módulo.
	I	Cálculo correcto de pesos de los materiales para que la estructura soporte
	I	Las uniones deben soportar las presiones del sistema.
	I+C	Los perfiles de metal deben mantener mínimo 2 mm de espesor
Energía	I	Los materiales deben soportar los tiempos de trabajo del sistema
	I+C	La alimentación de funcionamiento del módulo hidráulico será eléctrica trifásica.
	I+C	El módulo se encargará de convertir la energía hídrica en eléctrica
Vida útil	C	La máquina debe ser diseñada para la utilización en periodos cortos por mucho tiempo
	I+C	La máquina puede ser mejorada en caso de ser requerido
Seguridad	I	El módulo debe cumplir con normas de seguridad.
	I+C	El módulo debe ser diseñado para la comodidad de los operarios
Costos	I+C	Mantener un presupuesto optimizado y garantizando la mejor calidad de los elementos.
Aspecto legal	I	Seguridad de las máquinas y gestión del medio ambiente
Instrumentación	I+C	El módulo deber poseer varios instrumentos de medida para observar los parámetros en la generación de energía.

Análisis funcional.

En este punto se asocia a las alternativas en el diseño del módulo didáctico, teniendo en cuenta varios puntos el que se debe enfocar para poder obtener el mejor producto según los requerimientos, en la Tabla 8 se puede apreciar las diferentes alternativas en la estructura principal, material, tubería entre otras las cuales son las principales en la construcción del módulo didáctico.

Tabla 8

Alternativas de construcción.

Parámetro General			
	ALT.1	ALT. 2	ALT. 3
Estructura			
Material	ASTM A36		
Perfil	40x40x2	50x50x2	50x50x3
tubería	PVC	Galvanizada	Flexible
Bomba	monofásica Centrifuga	Periferia	Trifásica Centrifuga
Turbina	Pelton	Turgo	Francis
Tanque	Vidrio	Fibra De Vidrio	Acero Inoxidable
Tolva	Fibra De Vidrio	Acero Inoxidable	Impresión 3d

Nota. En la tabla se muestra la alternativa de diseño seleccionada del módulo de la pico central hidroeléctrica y sus principales componentes.

En la Tabla 8, se utiliza el módulo con medidas de: alto de 1.50 m de alto, 1.20 m de largo y 0.60 m de profundidad con el fin de optimizar el espacio de uso dentro del laboratorio, para el circuito hidráulico se selecciona tubería PVC de tipo PN-16 de alta resistencia a la presión que ejerce el caudal que provee la bomba tipo centrífuga de alimentación trifásica, de la misma forma de selección el perfil de toda la estructura es de tipo ASTM 36 con medidas de: (40x40x2) para poder tener estabilidad, resistencia y sujeción de todo el conjunto del módulo de la pico central hidroeléctrica.

Con respecto al área estética se pretende mantener una simetría de tipo industrial con pintura color gris oscura de alto tránsito al horno y para la cubierta de la estructura, madera MDP/RH resistente a la humedad. Los tanques de reservorio y recirculación de agua son de fibra de vidrio de fácil extracción y mantenimiento para su habitual limpieza.

Diseño del sistema hidráulico.

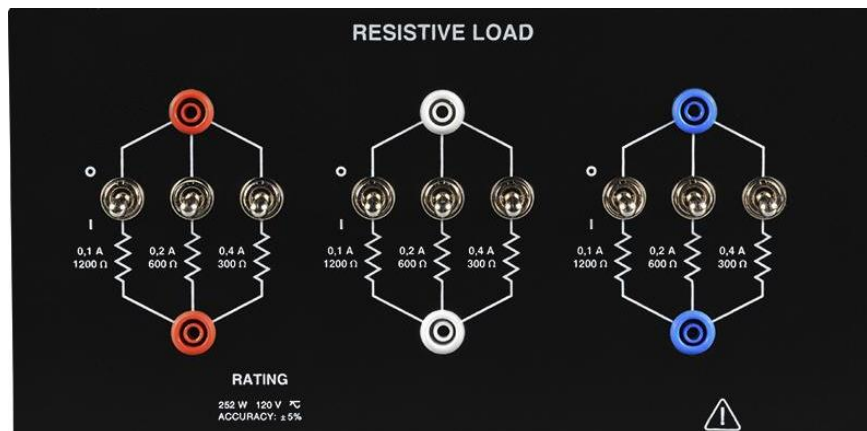
En este apartado se dimensiona la potencia del generador para el módulo didáctico, la potencia de la bomba hidráulica que moverá el sistema y las tuberías de entrada y de salida del sistema.

Dimensionamiento turbina-generador.

Para la selección de la turbina de generación tipo turgo se toma en consideración la carga a la cual será sometida el sistema, esta puede ser de tipo resistiva, capacitiva o inductiva, pero por fines de diseño se seleccionó el módulo resistivo, el cual existe en el laboratorio de energías renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas E.S.P.E sede Latacunga, con el fin de obtener una mejor eficiencia del sistema, ya que esta carga se caracteriza por brindarnos un factor de potencia 1, dejando a un lado las pérdidas que se pueden generar con los otros módulos de carga, en la Figura 19, se puede observar el banco de resistencias cuya potencia máxima es de 252 W.

Figura 19

Banco de resistencias



Nota. En la figura se observa el banco de carga resistiva. Tomado de (Festo, 2018)

A continuación, se muestra en la Tabla 9, los modelos de generadores que se pueden tomar como consideración para el diseño del módulo de la pico central hidroeléctrica.

Tabla 9

Modelos de generadores Zohan.

Modelo	Potencia	Altura	caudal	velocidad de rotación	Diámetro de tubo de instalación
	(W)	(m)	(m ³ /seg)	(rpm)	(mm)
CJ-300W	300	12-14	0.003-0.005	1500	50
CJ-500W	500	12-18	0.005-0.007	1500	50-75
CJ-750W	750	14-18	0.005-0.008	1500	75
CJ-1.5KW	1500	18-25	0.008-0.011	1500	125

Nota. En la tabla se presenta los modelos de Zonhan. Tomado de (Zonhan,2013).

Se emplea para una potencia de 300W, el cual se detalla en el Anexo B y se toman los siguientes datos proporcionados por el fabricante.

$$\text{Altura} = 12 - 14 \text{ m}$$

$$\text{Caudal} = 0,003 - 0,005 \frac{\text{m}^3}{\text{seg}}$$

$$\text{Tubería} = 50 \text{ mm}$$

$$\eta_{\text{Gen-tur}} = 60 \%$$

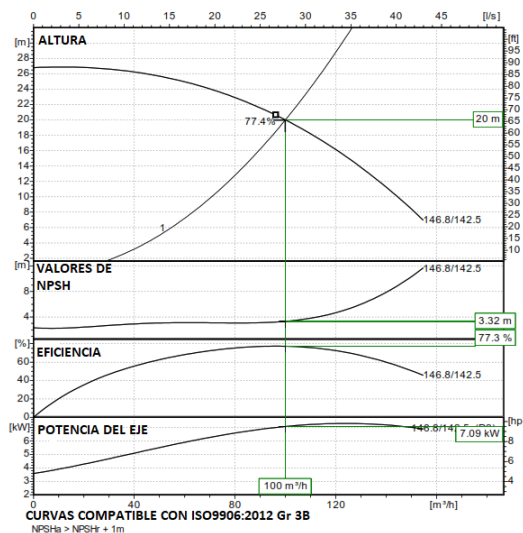
Para el dimensionamiento de la bomba se utiliza la Ecuación 5, para el cálculo de potencia de la bomba, teniendo en cuenta el rendimiento de la turbina.

$$P_{\text{Moto-Bomba}} = \frac{P_{\text{Gen}}}{746\text{W} * \eta_{\text{Gen-tur}} * \eta_{\text{Bomba}}} [\text{Hp}]$$

Según (Nuñez, 2020) las gráficas para bombas centrífugas son

Figura 20

Gráfica bomba centrífuga.



Nota. En la figura se observa las curvas de parámetros que toma la bomba. Tomado de (Nuñez, 2020)

El rendimiento de una bomba centrífuga se puede observar en la Figura 20, se encuentra entre 60% y 0%, se toma el valor del 40% como un valor de trabajo en condiciones normales.

$$\eta_{bomba} = 0,4$$

Se reemplaza los valores en la Ecuación 5, para la potencia de la Bomba.

$$P_{Moto-Bomba} = \frac{300}{0,6 * 0,4}$$

$$P_{Moto-Bomba} = 1250 \text{ W} \rightarrow 1,675 \text{ Hp}$$

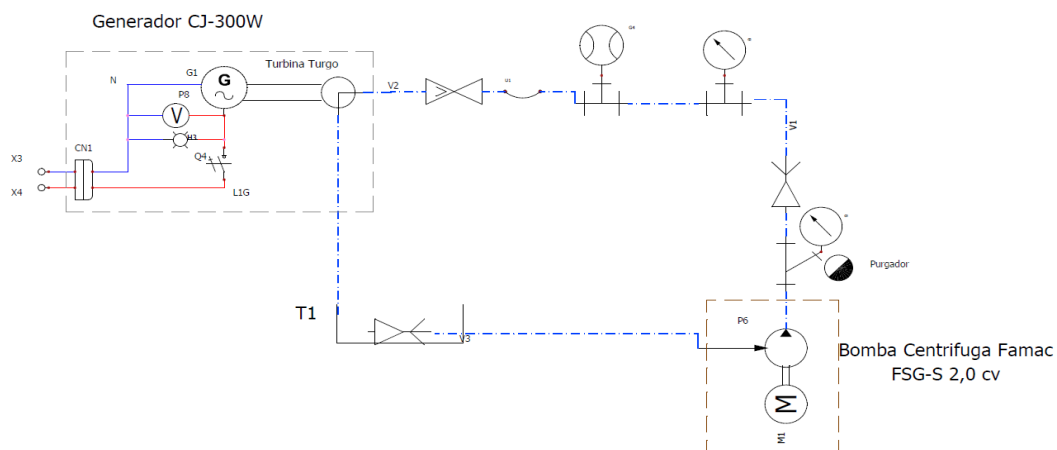
Se toma este valor como preliminar y se considera un valor comercial de $2Hp$ para la potencia de la bomba.

Calculo circuito hidráulico.

En este apartado se toma en cuenta el caudal máximo que admite la turbina para poder realizar el cálculo de los diámetros de entrada y salida de las tuberías, así como las pérdidas por componentes y en el trayecto del circuito, se toma en cuenta la sobrepresión que puede existir debido al cierre de la válvula.

Figura 21

Diagrama P&ID



Nota. En la figura se muestra el diagrama P&ID el cual es especificado en el anexo E.

Tubería de descarga. Para el cálculo de la tubería de descarga se toma en cuenta el caudal máximo que la turbina puede admitir.

$$Q_{max} = 0,005 \text{ m}^3/\text{s}$$

En la Tabla 3, se muestra las velocidades recomendadas para tuberías en línea de descarga, de la cual se obtiene los siguientes valores.

$$\text{Velocidad recomendada} = 1,8 \frac{\text{m}}{\text{seg}} - 2,9 \frac{\text{m}}{\text{seg}}$$

$$\text{Velocidad promedio} = 2,3 \frac{\text{m}}{\text{seg}}$$

De la Ecuación 1, se tiene el caudal

$$Q = v * A$$

El área de un círculo es.

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

Se despeja el diámetro.

$$D_{Des} = \sqrt{4 * \frac{Q}{V\pi}}$$

$$D_{Des} = \sqrt{4 * \frac{0,005 \text{ m}^3 \text{ seg}}{2,3 \frac{\text{m}}{\text{seg}} * \pi}}$$

$$D_{Des} = 0,05261 \text{ m}$$

El diámetro obtenido es de 52,61 mm, se aproxima a un valor comercial 57 mm o 53.6 mm (según la presión) aproximadamente 2" que se toma de la Tabla 10.

Tabla 10*Clasificación tuberías*

Unidades del SI				
Tubería clasificación de PVC a presión – Tamaños Seleccionados				
Diámetro exterior <i>OD</i> (mm)	Espesor de pared <i>t</i> (mm)	Diámetro interior <i>ID</i> (mm)	Área de flujo <i>A</i> (m ²)	Clasificación de presión <i>p</i> (bar)
40	3.0	34.0	$9.079 * 10^{-4}$	16
50	2.4	45.2	$1.605 * 10^{-3}$	10
50	3.7	42.6	$1.425 * 10^{-3}$	16
63	3.0	57.0	$2.552 * 10^{-3}$	10
63	4.7	53.,6	$2.256 * 10^{-3}$	16
75	3.6	67.8	$3.610 * 10^{-3}$	10
75	5.6	63.8	$3.197 * 10^{-3}$	16

Nota. En la tabla se muestra los diámetros de selección de la tubería del circuito hídrico.

Tomado de (Mott, 2015).

Se corrige la velocidad con el diámetro de tubería a usar 53.6 mm

$$V_{\text{corregida}} = \frac{Q}{\pi * D^2} * 4$$

$$V_{\text{corregida}} = \frac{0,005 * 4}{\pi * 0,0536^2}$$

$$V_{\text{corregida}} = 2,21 \frac{m}{seg}$$

Tubería de succión. En la tabla 3 se tiene las velocidades recomendadas para tuberías en línea de succión, de la cual se obtienen los siguientes valores.

$$velocidad \text{ recomendada} = 1,1 \frac{m}{seg} - 2 \frac{m}{seg}$$

$$velocidad = 1,8 \frac{m}{seg}$$

Se realiza el cálculo del diámetro de la tubería de la succión con la velocidad recomendada y el caudal máximo que admite el módulo.

$$D_{suc} = \sqrt{4 * \frac{Q}{V\pi}}$$

$$D_{suc} = \sqrt{4 * \frac{0,005}{1,8 * \pi}}$$

$$D_{suc} = 0,059 \text{ m}$$

$$D = 0,059 \text{ aproximando 2 in}$$

$$V_{corregida-s} = \frac{Q}{\pi * D^2} * 4$$

$$V_{corregida-s} = \frac{0,005 * 4}{\pi * 0,057^2} = 1,95 \frac{\text{m}}{\text{seg}}$$

Tabla 11

Resumen de los cálculos realizados.

Resumen de cálculos tuberías.		
Tubería de Descarga		
Diámetro de tubería	57 mm	PN10 – PN16
Velocidad de flujo	2,21m/s	
Tubería de Succión		
Diámetro de tubería	57 mm	PN10 – PN16
Velocidad de flujo	1,95 m/s	

Nota. En la tabla se observa el resumen de valores obtenidos de diámetro de la tubería de succión y la de descarga.

Perdidas en el circuito. En este apartado se toma en cuenta las pérdidas que pueden existir en el circuito hidráulico, como son las primarias que se ven reflejadas en el trayecto del circuito debido a la fricción que existe en el sistema, de igual manera las pérdidas por componentes y cálculo de la carga neta de succión positiva para evitar que la bomba cavite.

Perdidas primarias en la tubería de entrada. Usando el diagrama de Moody para obtener el factor de fricción se obtiene lo siguiente:

$$f = f\left(Re, \frac{D}{E}\right)$$

Donde:

Re : Número de Reynolds.

$\frac{D}{E}$: Relación entre el diámetro-rugosidad en la tubería.

f : Factor de fricción.

Ecuación 5, para obtener el número de Reynolds.

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

Tabla 12

Características del agua.

Unidades del SI [101 kPa (ABS)]				
Temperatura	Peso específico $\frac{kN}{m^3}$	Densidad kg/m^3	Viscosidad dinámica $\mu [kg/m * seg]$	Viscosidad cinemática
0	9.81	1000	$1.75 * 10^{-3}$	$1.75 * 10^{-6}$
5	9.81	1000	$1.52 * 10^{-3}$	$1.52 * 10^{-6}$
10	9.81	1000	$1.30 * 10^{-3}$	$1.30 * 10^{-6}$
15	9.81	1000	$1.15 * 10^{-3}$	$1.15 * 10^{-6}$
20	9.81	998	$1.02 * 10^{-3}$	$1.02 * 10^{-6}$
25	9.81	997	$8.91 * 10^{-4}$	$8.91 * 10^{-7}$

Nota. En la tabla se muestra las características del agua según su temperatura. Tomado de (Mott, 2015)

Tabla 13

Rugosidad de la tubería

Rugosidad de la tubería - valores de diseño		
Material	Rugosidad ϵ (m)	Rugosidad ϵ (ft)
Vidrio	Liso	Liso
Plástico	$3.0 * 10^{-7}$	$1.0 * 10^{-6}$
Tubo estirado, latón acero	$1.5 * 10^{-6}$	$5.0 * 10^{-6}$
Acero, comercial o soldado	$4.6 * 10^{-5}$	$1.5 * 10^{-4}$
Hierro galvanizado	$1.5 * 10^{-4}$	$5.0 * 10^{-4}$
Hierro dúctil-revestido	$1.2 * 10^{-4}$	$4.0 * 10^{-4}$
Hierro dúctil- sin revestir	$2.4 * 10^{-4}$	$8.0 * 10^{-4}$
Concreto, bien hecho	$1.2 * 10^{-4}$	$4.0 * 10^{-4}$
Acero remachado	$1.8 * 10^{-3}$	$6.0 * 10^{-3}$

Nota. En la tabla se muestra la rugosidad que presenta el interior de una tubería plástica.

Tomado de (Mott, 2015).

Utilizando los valores calculados anteriormente y apoyándonos en la Tabla 12 y 13, se obtiene el siguiente resumen de valor a utilizar.

$$\left\{ \begin{array}{l} \rho = 998 \text{ kg/m}^3 \\ v_{\text{tubería-entrada}} = 2,21 \text{ m/seg} \\ D = 57 \text{ mm} = 0,057\text{m} \\ \mu = 1,02 * 10^{-3} \text{ kg/m * seg} \\ \epsilon = 3 * 10^{-7} \text{ m} \end{array} \right.$$

Usando el diagrama de Moody nos dice que para obtener el valor en el eje y.

$$\frac{D}{\epsilon} = \frac{0,057\text{m}}{3 * 10^{-7}\text{m}}$$

$$\frac{D}{\epsilon} = 190000$$

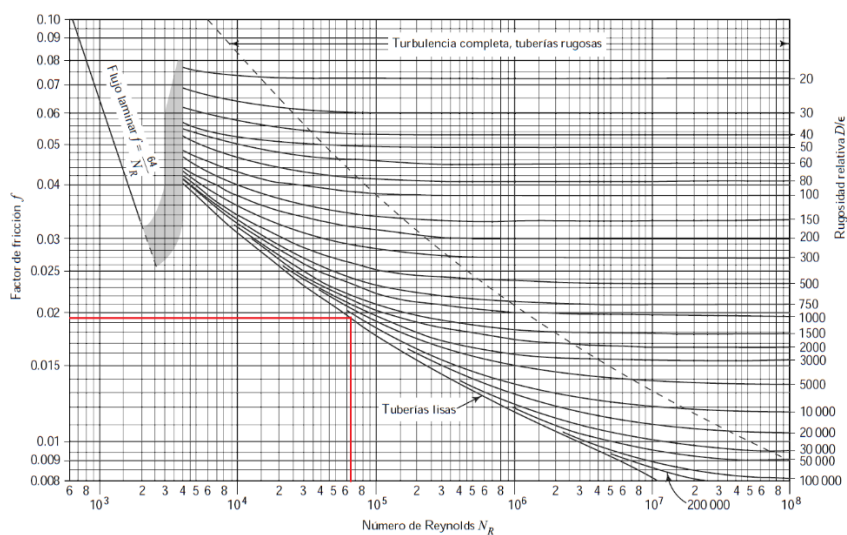
$$Re = \frac{998 \frac{kg}{m^3} * 1,175 \frac{m}{seg} * 0,057m}{1,02 * 10^{-3} \frac{kg}{m * seg}}$$

$$Re = 65530,044$$

$Re > 4000$ Flujo turbulento

Figura 22

Diagrama de Moody



Nota. En la figura se puede observar el valor, detallado en el Anexo C. Tomado de (Mott, 2015).

Con el diagrama de Moody se obtiene la fricción en las tuberías.

$$f = 0,0195$$

Se suma todo el recorrido de las tuberías para obtener la longitud total.

$$LT = 0,5 + 0,8$$

$$LT = 1,3 \text{ m}$$

Con la Ecuación 6, se obtiene las pérdidas primarias en el trayecto de la tubería

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

$$H_L = \frac{0,0195 * 1,3 * 2,21^2}{2 * 9,81m/seg^2 * 0,0536m}$$

$$H_L = 0,117 m$$

En la Ecuación 7, se obtiene las perdidas por componentes del circuito

$$h_L = \sum K \frac{V^2}{2g}$$

Tabla 14

Resistencia en válvulas y accesorios.

Resistencia en válvulas y accesorios expresada como la longitud equivalente en diámetros de tubería, Le/D	
Tipo	Longitud equivalente en diámetros de tubería Le/D
Válvula de globo - totalmente abierta	340
Válvula de ángulo - totalmente abierta	150
Válvula de compuerta - totalmente abierta	8
- abierta 3/4	35
- abierta 1/2	160
- abierta 1/4	900
Válvula de retención - tipo oscilante	100
Válvula de retención - tipo bola	150
Válvula de retención - totalmente abierta, 2-8 in	45
- 10 - 14 in	35
- 16 - 24 in	25
Válvula de pie - tipo disco de vástago	420
Válvula de pie - tipo disco de bisagras	75
Codo estándar de 90°	30
Codo de 90° y radio largo	20
Codo de 90° para calle	50
Codo estándar de 45°	16
Codo de 45° para calle	26
Doblez de retorno cerrado	50
te estándar- con flujo por la línea principal	20
-con flujo por la ramificación	60

Nota. En la tabla se observa la relación de fricción que existe con respecto a su longitud y diámetro interno de una tubería. Tomado de (Mott, 2015).

Para obtener la constante K se tiene la ecuación de la Tabla 14.

$$K = f * \frac{Le}{D}$$

Tabla 15

Componentes del circuito.

Cálculo de parámetro K				
Componentes	Le/D	Cantidad	f	KT
Tee	20	3	0,0195	1,17
Codo	30	1	0,0195	0,585
Válvula de Bola	340	1	0,0195	6,63
Válvula Check	150	1	0,0195	2,925

Nota. En la tabla se observa el parámetro K respectivo de cada accesorio del circuito hídrico.

$$h_L = (1,17 + 0,585 + 6,63 + 2,925) \left(\frac{2,21^2}{2 * (9,81)} \right)$$

$$h_L = 2,81 \text{ m}$$

Pérdidas totales del sistema.

$$H_T = H_L + h_L$$

$$H_T = 0,117 + 2,81 \text{ m}$$

$$H_T = 2,927 \text{ m}$$

Tabla 16

Resumen de las pérdidas en la tubería de descarga.

Resumen pérdidas en tubería de descarga		
Número de Reynolds	65530,044	Flujo Turbulento
Factor de Fricción	$f = 0,0195$	
Longitud Total	1,3 m	
Pérdidas en el trayecto	$H_L = 0,117 \text{ m}$	
Pérdidas por componentes	$h_L = 2,81 \text{ m}$	
Pérdidas totales.	$H_T = 2,927 \text{ m}$	

Nota. En la tabla se observa un resumen de los valores de pérdidas que se presentan en el circuito hídrico del módulo de la pico central hidroeléctrica.

Cálculo de altura neta positiva de aspiración.

A continuación, se calcula el NPSH para que la bomba seleccionada no tenga problemas de cavitación, en la Ecuación 10, se obtiene la altura neta positiva de aspiración disponible $NPSH_D$

$$NPSH_D = h_{sp} + h_s - h_L - h_{vp}$$

$$NPSH_D = h_{sp} - h_s - h_L - h_{vp}$$

Para este análisis se obtuvo el valor de la presión en la que se encuentra la ciudad de Latacunga, donde se realiza el funcionamiento del módulo de la pico central hidroeléctrica.

Tomado de rp5.ru.

$$PS = 10,48 \text{ Psi (Latacunga)}$$

$$Ps = 72,257 \text{ kPa}$$

Tabla 17

Presiones del agua.

Presión de vapor y carga de la presión de vapor para el agua.							
Temperatura °C	Presión de vapor KPa (ABS)	Peso específico (kN/m ³)	Carga de la presión de vapor (m)	Temperatura °F	Presión de vapor (Psia)	Peso específico (lb/ft ³)	Carga de la presión de vapor (ft)
0	0.6105	9.806	0.06226	32	0.08854	62.42	0.2043
5	0.8722	9.807	0.08894	40	0.1217	62.43	0.2807
10	1.228	9.804	0.1253	50	0.1781	62.41	0.4109
20	2.338	9.789	0.2388	60	0.2563	62.37	0.5917
30	4.243	9.765	0.4345	70	0.3631	62.30	0.8393

Nota. En la tabla se observa los datos de presión del agua. Tomado de (Mott, 2015).

$$\text{Para Temperatura} = 13^{\circ}\text{C}$$

$$PV_{10^{\circ}} = 0,1781063 \text{ Psi}$$

$$PV_{13^{\circ}} = ?$$

$$PV_{20^{\circ}} = 0,3390 \text{ Psi}$$

Se realiza una interpolación, para una temperatura de 13°C que es la temperatura media de la ciudad de Latacunga.

$$Pv = 0,178063 + \frac{(0,339 - 0,178062)}{20 - 10} * (13 - 10)$$

$$Pv = 0,2263 \text{ Psi}$$

$$Pv = 1,5602 \text{ kPa}$$

De la Ecuación 7, para pérdidas por componentes en la succión de la bomba se toma en cuenta los valores ya calculados para la tubería de succión y longitud de tubería utilizada de 0,24 m se tiene.

$$h_L = f \sum \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g}$$

$$h_L = (\text{válvula de pie})(\text{codo}) + (\text{Tubería}) + (\text{Entrada})$$

$$h_L = \left((0,0195) * (120) * \left(\frac{1,95^2}{2 * 9,81} \right) \right) + \left((0,0195) * (30) * \left(\frac{1,95^2}{2 * 9,81} \right) \right) + ((0,0195) *$$

$$\left(\frac{0,24}{0,057} \right) * \left(\left(\frac{1,95^2}{2 * 9,81} \right) \right) + \left(1 * \left(\frac{1,95^2}{2 * 9,81} \right) \right)$$

$$h_L = 0,776 \text{ m}$$

Se conoce que la carga de la presión estática es la relación entre la presión atmosférica y el peso específico del fluido, con lo cual se plantea la siguiente relación.

$$h_{sp} = \frac{P_{sp}}{y}$$

$$h_s = \text{Altura de Succión}$$

$$h_L = \text{Pérdidas Tubería}$$

Para la carga de presión de vapor del fluido h_{vp} se obtiene de la relación de la presión de vapor y el peso específico del fluido se representa de la siguiente manera.

$$h_{vp} = \frac{P_{vp}}{y}$$

De la Ecuación 3, se obtiene la presión en el tanque

$$P_{sp} = P_{at} + P_{manometrica\ del\ tanque}$$

Para la presión que existe en el tanque se tiene.

$$P_h = \rho * g * h \quad (15)$$

Donde:

P_h : Presión hidrostática.

ρ : Densidad del fluido.

g : Gravedad.

h : Altura del fluido.

Con la Ecuación 15, se tiene la presión del tanque y se reemplaza en la Ecuación 3.

$$P_{sp} = 72,257\ KPa + (\rho * g * h)$$

$$P_{sp} = 72,257\ kPa + \left(1000 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{seg^2} * 0,5m\right) * \frac{1}{1000\ Pa} kPa$$

$$P_{sp} = 77.162\ kPa$$

Peso específico

$$Y_{10^\circ} = 9,804 \frac{kN}{m^3}$$

$$Y_{13^\circ} = X$$

$$Y_{20^\circ} = 9,789 \frac{kN}{m^3}$$

Se realiza una Interpolación para una temperatura de 13 °C temperatura promedio de la ciudad de Latacunga.

$$Y_{13^\circ} = 9,804 + \left(\frac{9,789 - 9,804}{20 - 10}\right) * (13 - 10)$$

$$Y_{13^\circ} = 9,7995 \frac{kN}{m^3}$$

$$h_{sp} = \frac{77,162}{9,7995} kPa$$

$$h_{sp} = 7,88 m$$

$$h_s = 0,5 m$$

$$h_L = 0,776 m$$

$$h_{vp} = \frac{1,5602}{9,7995}$$

$$h_{vp} = 0,1592 m$$

$$NPSH_D = 7,88 + 0,5 - 0,776 - 0,1592$$

$$NPSH_D = 7,448 m$$

Se obtiene una altura neta positiva de aspiración disponible ($NPSH_D$) de 7,448 m para que la bomba no cavite este valor debe ser superior a la altura neta positiva de aspiración requerida $NPSH_R$ cumpliendo la Ecuación 8.

$$NPSH_D > 1.10 NPSH_R$$

$$NPSH_R < \frac{NPSH_D}{1.10}$$

$$NPSH_R < 6.77 m$$

Selección de la bomba.

Se toma las características calculadas de la turbina que se detallan a continuación, para la selección de la bomba.

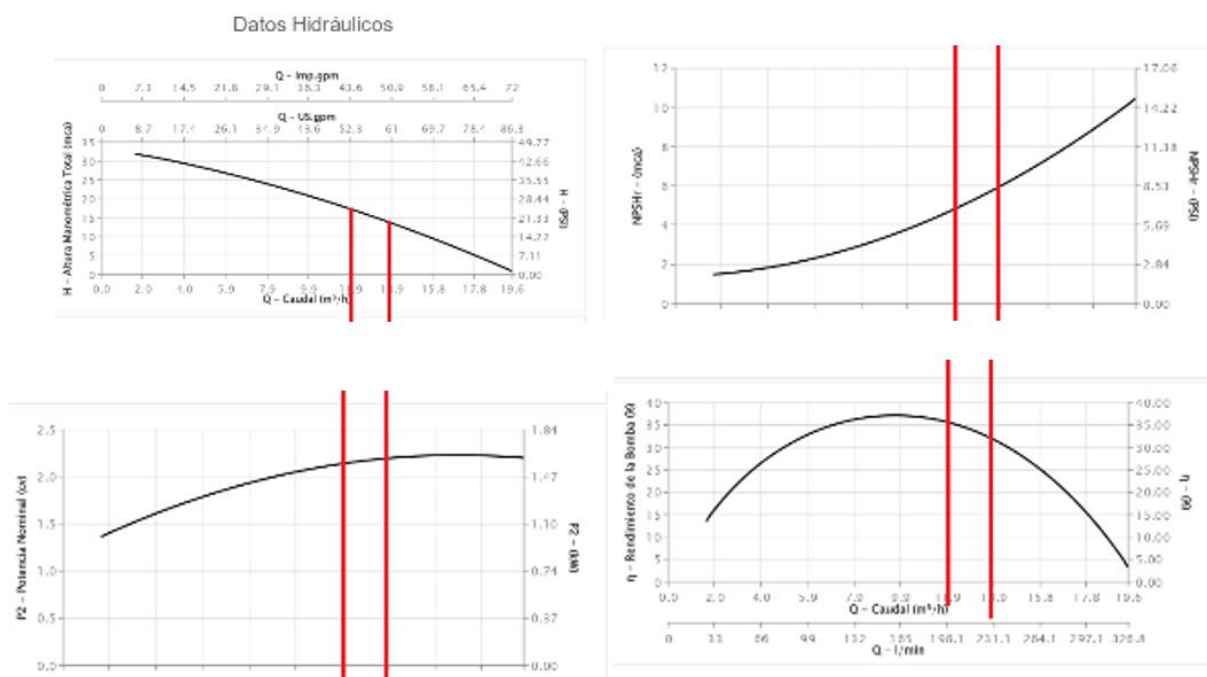
$$Q = 3 L/s - 5L/s$$

Nota. En la figura se observa los parámetros de selección de la bomba de 2Hp. Tomado del catálogo FAMAC.

En el catálogo del fabricante se obtiene las diferentes curvas para la instalación de la bomba.

Figura 24

Datos bomba seleccionada.



Nota. En la figura se observa el rango de trabajo en el cual se instala la bomba en el módulo de la pico central hidroeléctrica. Tomado (FAMAC, 2018).

Con los datos explicados en el Anexo D, parámetros hidráulicos de la Bomba representados gráficamente en la Figura 24 se tiene los rangos en los que se usa la bomba y el $NPSH_R$ se toma el valor máximo de uso de 6,093 m, comparándolo con el valor calculado con anterioridad al ser menor se establece que la bomba no cavita.

Instrumentación.

En este apartado se selecciona la instrumentación para el circuito hidráulico con las características que posee la bomba.

Manómetro. Se calcula la presión máxima que puede generar la bomba seleccionada en la Figura 23, se puede apreciar la máxima altura que puede generar la bomba que es 32m mediante la Ecuación 15.

$$P_h = \rho * g * h$$

$$P_h = 1000 \frac{kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{s^2} * 32 m$$

$$P_h = 313920 Pa$$

Figura 25

Manómetro Genebre.



Nota. En la figura se muestra el manómetro de glicerina. Tomado de (Genebre,2020).

Se selecciona para el diseño del módulo de la pico central hidroeléctrica el manómetro de glicerina representado en la Figura 25, debido a sus propiedades de estabilización, a las

vibraciones que puede estar sometido al estar expuesto a altos flujos de caudal que se presentan en el sistema para no tener datos erróneos de lecturas de medición.

Flujómetro. En este apartado se selecciona el flujómetro que se acople mejor al módulo didáctico de una pico central hidroeléctrica, tomado en cuenta que el generador CJ-300W tiene un caudal máximo de 5 l/s y la bomba Famac FSG de 2Hp tiene un caudal máximo de $19,5 \frac{m^3}{h} \rightarrow 325 \text{ l/min.}$

Figura 26

Flujómetro modelo 570



Nota. En la figura se muestra el flujómetro seleccionado, marca Rola-Chem modelo 530 Lpm. Tomado de (Rola-Chem,2022).

En la Figura 26, se puede visualizar el flujómetro seleccionado para una tubería de PVC de montaje superior y que alcanza a 530 Lpm como valor máximo.

Calculo capacidad del tanque mínimo.

En esta sección se calcula el mínimo de capacidad que debe tener el tanque del módulo para que funcione de forma óptima, se realiza mediante la herramienta de Excel para lograr los cálculos.

Tabla 18

Capacidad de los componentes del módulo.

Volumen en la succión				
Componente	Diametro [m]	Largo [m]	Cantidad	Volumen [L]
Tuberia	0,0536	0,28	1	0,631796771
Codo	0,057	0,1	1	0,25517581
Valvula de pie	0,0536	0,025	1	0,056410426
Bomba	0,2	0,06	1	1,8849552
Universales	0,0536	0,05	1	0,112820852
Volumen en la descarga				
Componente	Diametro [m]	Largo [m]		Volumen [L]
Valvula Check	0,0536	0,2	1	0,451283408
Y	0,0536	0,15	1	0,338462556
Tuberia	0,0536	0,15	1	0,338462556
Valvula de bola	0,0536	0,15	1	0,338462556
Universales	0,0536	0,05	5	0,112820852
Tee	0,057	0,12	1	0,306210972
Flujometro	0,015	0,26	1	0,045945783
Manguera flexible	0,05	0,5	1	0,9817475
Tuberia Flujometro	0,0536	0,18	1	0,406155067
Total		2,275		6,260710307

Nota. En la tabla se muestra la sumatoria total del volumen de sección que se presentan en todo el sistema.

Teniendo el volumen total del sistema en la Tabla 18, se calcula el tanque para el módulo, se debe tomar en cuenta que el sistema se encuentra en vacío, la altura que debe poseer para la válvula de pie pueda succionar.

$$V_{\text{Circuito-Hidraulico}} = 6,26 L$$

Tomando en cuenta un $F_s = 8$ de la Tabla 4 para que el uso del módulo sea constante sin riesgo a los equipos.

$$V_{\text{Tanque}} = V_{\text{Cir-Hi}} * F_s$$

$$V_{\text{Tanque}} = 6,26 L * 8$$

$$V_{\text{Tanque}} = 50,08 L$$

Golpe de ariete.

Tomando en cuenta los parámetros del sistema al tener una válvula para se considera el incremento de la presión debido al cierre de la válvula de bola.

Tabla 19

Módulo de elasticidad del PVC

Material	E (GPa)
PVC Rígido	2,4-2,75

Nota. En la tabla se muestra los valores del módulo de elasticidad del PVC. Tomado de (Tamburrino, 2016)

$$E = 2,75 \text{ Gpa} = 280421958,569 \text{ kg/m}^2$$

En la Ecuación 14, se obtiene la velocidad de propagación de la onda en el fluido.

$$C = \frac{9900}{\sqrt{48,3 + K * \frac{D}{e}}}$$

Para k se tiene

$$K = \frac{10^{10}}{E}$$

$$K = \frac{10^{10}}{280421958,569}$$

$$K = 35,66$$

$$C = \frac{9900}{\sqrt{48,3 + 35,66 * \frac{53,6}{4,7}}}$$

$$C = 464,13 \text{ m/s}$$

Considerando un tiempo de cierre de 5 s, para el periodo la Ecuación 11

$$T = \frac{2L}{C}$$

$$T = \frac{2 * 2,6}{464,13}$$

$$T = 0,011 \text{ s}$$

Considerando que $t > T$ se considera una maniobra lenta, entonces con la Ecuación 13, se determina la sobrepresión que tiene el sistema al realizar la maniobra.

$$ha = \frac{2LV}{gt}$$

$$ha = \frac{2 * 6,2 * 2,21}{9,81 * 5}$$

$$ha = 0,55 \text{ mca}$$

$$P = \rho * g * h$$

$$P = 1000 * 9,81 * 0,55$$

$$P = 5395,5 \text{ Pa} = 0,783 \text{ PSI}$$

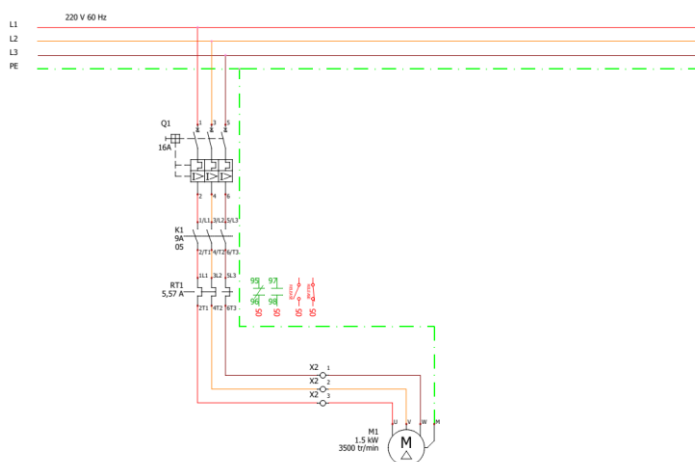
En el cálculo de golpe de ariete al considerar un cierre de 5s de la válvula de bola instalada se obtiene una sobrepresión de 0,55 metros de columna de agua (mca) o 0,0539 bares, el circuito hidráulico tiene una presión máxima de 1,7 bares con una altura de 17m que es lo máximo que llega a requerir el sistema con las perdidas consideradas y la tubería instalada tipo PN10 o PN16 que soportan 10 a 16 bares respectivamente y no existe ruptura de tubería o deformación de esta.

Diseño eléctrico

En la Figura 27 se puede ver el diagrama de fuerza que se compone de un interruptor termomagnético principal, un contactor y un relé térmico para poder controlar la bomba FSG-S de 2 HP produce el fluido en el circuito hidráulico.

Figura 27

Diagrama de fuerza



Nota. En la figura se observa el diagrama de fuerza del módulo didáctico de un pico central hidráulica.

El interruptor termo magnético Q1 es el encargado de activar el módulo didáctico de una pico central hidroeléctrica para su selección se toma en cuenta la corriente nominal de la bomba para su dimensionamiento.

Dimensionamiento del Interruptor termomagnético.

Siguiendo la norma IEC6089 las corrientes de no disparo para interruptores termomagnéticos es el 1,13 y la corriente de disparo es de 1,45

$$I_t = 1,45 * I_n$$

Donde:

I_t : es la corriente convencional de disparo.

I_n : es la corriente nominal de la bomba.

$$I_t = 1,45 * 5,57A$$

$$I_t = 8,07 A$$

Nota: este valor obtenido nos aproximaría a su valor comercial más cercano de 10 A, pero tomando en consideración la tabla.

Tabla 20

Selección de contactores y relés bimetálicos para motores.

Contactores y relés bimetálicos para motores					
Potencia nominal		Intensidad nominal Aprox. 1800rpm	Relé bimetálico	Interruptor Termomagnético	
HP	KW	A	Margen de Ajuste	A	A
1.20	0.90	4.00	3.50 – 5.00 A	10	10
2.00	1.50	7.00	5.50 – 8.00 A	16	16
3.00	2.20	9.80	9.00 – 12.50 A	20	20

Nota. En la tabla se observa un resumen de los parámetros de selección estandarizados para motores. Tomado de (SIEMENS,2015).

En la Figura 28, se selecciona el interruptor con los datos calculados y características de la bomba seleccionada.

Figura 28

Breaker seleccionado



3P

Breakers	
Corriente (In)	Curva C
6 A	EZ9F56306
10 A	EZ9F56310
16 A	EZ9F56316
20 A	EZ9F56320
25 A	EZ9F56325
32 A	EZ9F56332
40 A	EZ9F56340
50 A	EZ9F56350
63 A	EZ9F56363
Ancho en módulos de 9 mm	6

Nota. En la figura se observa el breaker seleccionado. Tomado (Schneider,2019)

El cálculo de accionamiento de la protección, curva tipo C para interruptor termomagnético seleccionado.

Se toma en cuenta la corriente de arranque de la bomba que son de 5 a 7 veces la corriente nominal.

$$I_{arr} = 7 * I_n$$

$$I_{arr} = 7 * 5,57$$

$$I_{arr} = 39 A$$

En la Figura 29, se muestra que en el eje de las de la corriente nominal se encuentra en múltiplos de la corriente.

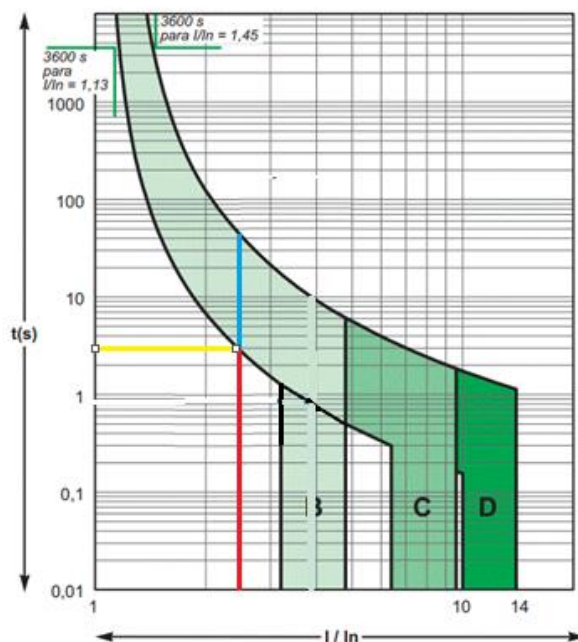
$$\frac{I_{arr}}{I_n} = \frac{39}{16}$$

$$\frac{I_{arr}}{I_n} = 2,43$$

Figura 29

Curva C de interruptor termomagnético.

Curvas B, C, D calibres de 6 a 63 A.



Nota. En la figura se muestra el tiempo de disparo en el arranque. Tomado (Schneider,2019)

En la Figura 29 el tiempo de disparo con la corriente de arranque de la bomba centrífuga seleccionada es de 3 a 40 s.

Para el dimensionamiento del relé térmico y contactor se toma en consideración la siguiente fórmula, que de acuerdo con la norma IEC 60898 la corriente de no disparo debe estar en el 13% más de la corriente nominal.

Dimensionamiento del contactor

Para dimensionar el contactor que controlara a la bomba centrífuga se debe tomar en cuenta la corriente nominal y la corriente de no disparo y el tipo de trabajo.

Figura 30

Contactor seleccionado.

Rating

Contactor type			MC-9b		MC-12b		MC-18b		MC-22b		
			kW	A	kW	A	kW	A	kW	A	
AC duty	AC3	200/240V	2.5	11	3.5	13	4.5	18	5.5	22	
		380/440V	4	9	5.5	12	7.5	18	11	22	
		500/550V	4	7	7.5	12	7.5	13	15	20	
		690V	4	5	7.5	9	7.5	9	15	18	
	AC4	200/240V	1.5	8	2.2	11	3.7	16	3.7	18	
		380/440V	2.2	6	4	9	4	11	5.5	13	
	AC1		-	25	-	25	-	32	-	40	
DC1 duty (L/R=1ms)	2-pole	24V	-	18	-	18	-	18	-	32	
		in series	48V	-	17	-	17	-	17	-	30
		110V	-	12	-	12	-	12	-	23	
	3-pole	24V	-	20	-	20	-	20	-	32	
		in series	48V	-	20	-	20	-	20	-	32
		110V	-	15	-	15	-	15	-	27	
DC 2,4 duty (L/R=15ms)	2-pole	24V	-	15	-	15	-	15	-	25	
		in series	48V	-	12	-	12	-	12	-	20
		110V	-	8	-	8	-	8	-	15	
	3-pole	24V	-	18	-	18	-	18	-	30	
		in series	48V	-	15	-	15	-	15	-	30
		110V	-	12	-	12	-	12	-	20	
Directly mountable Overload relay			MT-32								
Conductor size (solid, stranded)	AWG	16-10		16-8		14-8		14-8			
(the max. number of conducts: 2)	mm ²	1.5-4		1.5-10		2.5-10		2.5-10			
Conductor type			65/75°C Cu-wire only								

Nota. En la figura se muestra el contactor seleccionado. Tomado del catálogo (LSContactors,2021).


El contactor seleccionado en la Figura 30 es el MC-9b del tipo AC3 para trabajos de motores jaula de ardilla.

Dimensionamiento del relé térmico

El valor de 6,29 A se toma en cuenta para el dimensionamiento del relé térmico.

Figura 31

Relé térmico seleccionado



Setting range (A)	Ordering type			Contactor	Separate mounting unit
	Non-differential (3P-2 heater)	Non-differential (3P-3 heater)	Differential		
0.1–0.16	MT-32/2H0.14	MT-32/3H0.14	MT-32/3K0.14	MC-9b MC-12b MC-18b MC-22b MC-32a MC-40a	UZ-32
0.16–0.25	MT-32/2H0.21	MT-32/3H0.21	MT-32/3K0.21		
0.25–0.4	MT-32/2H0.33	MT-32/3H0.33	MT-32/3K0.33		
0.4–0.63	MT-32/2H0.52	MT-32/3H0.52	MT-32/3K0.52		
0.63–1	MT-32/2H0.82	MT-32/3H0.82	MT-32/3K0.82		
1–1.6	MT-32/2H1.3	MT-32/3H1.3	MT-32/3K1.3		
1.6–2.5	MT-32/2H2.1	MT-32/3H2.1	MT-32/3K2.1		
2.5–4	MT-32/2H3.3	MT-32/3H3.3	MT-32/3K3.3		
4–6	MT-32/2H5	MT-32/3H5	MT-32/3K5		
5–8	MT-32/2H6.5	MT-32/3H6.5	MT-32/3K6.5		
6–9	MT-32/2H7.5	MT-32/3H7.5	MT-32/3K7.5		
7–10	MT-32/2H8.5	MT-32/3H8.5	MT-32/3K8.5		
9–13	MT-32/2H11	MT-32/3H11	MT-32/3K11		
12–18	MT-32/2H15	MT-32/3H15	MT-32/3K15		
16–22	MT-32/2H19	MT-32/3H19	MT-32/3K19		
18–25	MT-32/2H21.5	MT-32/3H21.5	MT-32/3K21.5		
22–32	MT-32/2H27	MT-32/3H27	MT-32/3K27		
28–40	MT-32/2H34	MT-32/3H34	MT-32/3K34	UZ-32(34A)	

Nota. En la figura se muestra el relé térmico seleccionado con una regulación de 5-8 A.

Tomado de (LSContactors,2021)..

En la Figura 31 el relé térmico seleccionado MS-9b con terminales MT-32/3K que es compatible con el contactor MC-9b seleccionado anteriormente con una regulación de amperaje de 5-8 [A].

Dimensionamiento calibre de conductores.

Tomando en cuenta la corriente de sobrecarga del 1,45 de disparo de las protecciones y una corriente nominal de control en la Figura 32, se tiene los calibres de los conductores y el amperaje que soportan.

Figura 32

Calibre de conductores AWG para alimentación.

◀ Conductor de cobre flexible para 600 V. (Aislado con policloruro de vinilo PVC), ▶
resistente al calor y humedad.

CONDUCTOR			Espesor de Aislamiento (mm)	Diámetro Externo Aprox (mm)	Peso total Aprox (kg / km)	*Capacidad de Corriente (A)
CALIBRE (AWG o kcmil)	Sección Transversal (mm ²)	No. Hilos				
24	0.205	0.254	0.51	1.68	4.54
22	0.324	0.254	0.51	1.80	5.88
20	0.519	0.254	0.76	2.45	10.49
18	0.823	0.3	0.76	2.72	14.04	6
16	1.31	0.3	0.76	3.03	19.47	8
14	2.08	0.3	0.76	3.42	27.72	20
12	3.31	0.3	0.76	3.90	40.43	25
10	5.261	0.4	0.76	4.51	60.26	30
8	8.367	0.4	1.52	6.81	112.19	40
6	13.30	0.4	1.52	7.79	169.56	55

Nota. En la figura se muestra la selección de calibre de los conductores que se instalan en el tablero de control del módulo de la pico central hidroeléctrica. Tomado (Electrocables,2023).

Figura 33

Calibre de conductores recomendados para el sistema de control.

Wire type							Torque
	(mm ² /AWG)						
MC-18AF		1-6/18-10	1-6/18-10	1-6/18-10	1-10/18-8	up to 1.13/10	
MC-22AF		1-6/18-10	1-6/18-10	1-6/18-10	1-10/18-8	up to 2.25/20	
MC-40AF		1-6/18-10	2.5-10/14-8	2.5-10/14-8	1-10/18-8	up to 4/35	
MC-65AF		-	-	-	1-25/12-4	up to 4/35	
MC-100AF		-	-	-	1-25/12-4	up to 4/35	

Nota. En la figura se observa la selección del conductor para el sistema de control. Tomado (LSContactors,2021)..

Se seleccionó como calibre mínimo de conductor 14 AWG para la bomba y para el control el calibre mínimo es 18 AWG que es el calibre recomendado por el fabricante LS en la Figura 33.

Módulo multímetro para tablero

En este apartado se tomará en cuenta los datos de generación del generador para poder seleccionar dispositivos de medida, al tener una generación de 300W como máximo con un voltaje de 120 V se tiene una corriente máxima de 2,5 A en la figura 34 se puede ver el dispositivo seleccionado debido a las características que se tiene del generador.

Figura 34

Módulo de Multímetro para tablero.



Nota. En la figura se muestra el módulo digital de multímetro de 6 variables. Tomado de Crocsee.

En la figura 34 se puede ver el dispositivo que mide los parámetros eléctricos de generación del módulo de una pico central hidroeléctrica.

Tabla 21*Resumen del diseño eléctrico.*

Resumen diseño eléctrico	
Circuito de fuerza.	
Breaker	3P de 16 [A] EZ9F56316
Contactora	3P de 9 [A] MC-9b MT-32
relé térmico.	3P de 5-8 [A] MT-32/3h6.5
Circuito de control.	
Pulsadores	Chint NP2-ES542
Indicadores	Chint
Dispositivo de medida	CrocSee AC 80-260V 100A CRS-022B

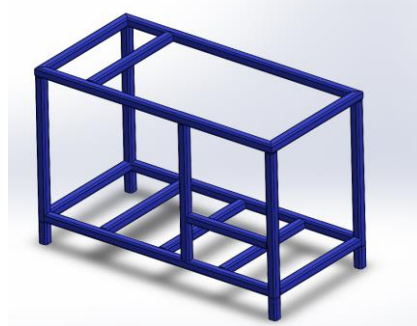
Nota: En la tabla se muestra el resumen todos los valores de selección de las protecciones eléctricas que forman parte del sistema de la pico central hidroeléctrica.

Diseño mecánico

En este apartado se analiza estructuralmente los materiales necesarios para la construcción del módulo de la pico central hidroeléctrica, teniendo en cuenta los parámetros de diseño para la realización de los cálculos requeridos.

Calculo estructura.

En la figura 35, se puede observar la estructura principal del módulo didáctico, su geometría, dimensiones y las partes que componen la construcción de la misma, las cuales son especifican en el Anexo F

Figura 35*Estructura principal*

Nota. En la figura se muestra la estructura de la mesa que soporta todos los elementos del módulo didáctico.

Determinación de cargas. Para el cálculo de las cargas que soporta la estructura se debe tener en cuenta todos los accesorios que conforman el módulo de la pila central hidroeléctrica, de igual manera se considera el peso que tendrá el tanque almacenador del recurso hídrico para obtener las diferentes masas que soporta la estructura metálica del módulo didáctico.

$$m_{gen-tur} = 11 \text{ kg}$$

$$m_{Bomba} = 18,5 \text{ kg}$$

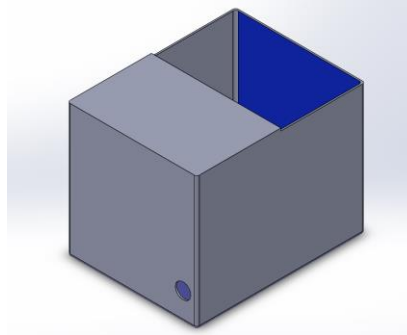
$$m_{tuberia} = 2 \text{ kg}$$

$$m_{accesorios} = 5,5 \text{ kg}$$

Dimensiones del tanque. En la Figura 36, se puede observar la geometría que tendrá el tanque, sus dimensiones se pueden observar en el Anexo G.

Figura 36

Geometría del tanque.



Nota. En la figura se puede observar el dimensionamiento del tanque almacenador de agua.

Dimensionamos el volumen máximo que puede contener el tanque para su cálculo.

$$\text{Largo interior} = 63,8 \text{ cm}$$

$$\text{profundidad interior} = 47,4 \text{ cm}$$

La altura que tiene la estructura para el tanque es de 50 cm, se toma en cuenta que no se debe llenar por completo por lo cual se considera como altura máxima 40 cm.

$$V = L * A * P$$

Donde:

L: Es el largo.

A: Es la altura.

P: Es la profundidad.

$$V = (0,638 * 0,4 * 0,474) m^3$$

$$V = 0,120 m^3$$

La densidad del agua en la Tabla 12 para una temperatura de 20 °C se despeja la masa de la siguiente fórmula.

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Donde:

ρ : Es la densidad.

m : Masa.

V : Volumen.

$$m = V * \rho$$

$$m = 0,1245 \text{ m}^3 * 998 \text{ kg/m}^3$$

$$m = 119,76 \text{ kg}$$

Se calcula el peso total que soporta la estructura con la siguiente formula.

$$W_T = \sum m_1 * g$$

$$W_T = m_{gen-tur} * g + m_{Bomba} * g + m_{tuberia} * g + m_{accesorios} * g + m_{tanque} * g$$

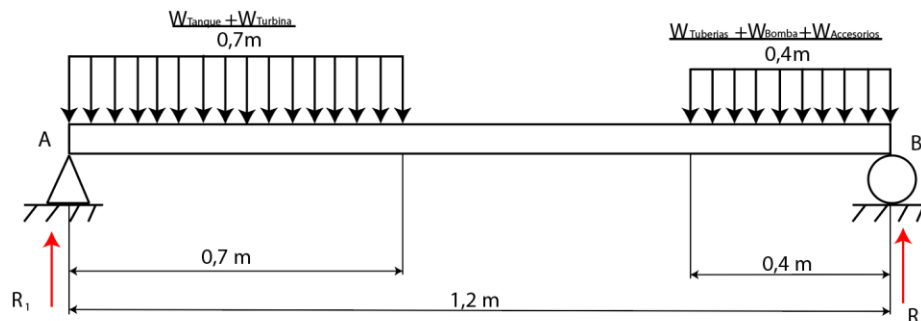
$$W_T = 9,81 * (11 + 18,5 + 2 + 5,5 + 119,76)$$

$$W_T = 1537,81 \text{ N}$$

Cálculo del perfil estructural base. Para el diagrama de fuerzas se toma como foco de esfuerzos a la parte inferior de la estructura debido a que sobre esta parte de la estructura sostendrá todo el peso del módulo.

Figura 37

Diagrama de fuerzas



Nota. En la figura se puede observar el diagrama de fuerzas que soporta la estructura del módulo de la pico central hidroeléctrica.

$$P_1 = \frac{W_{tanque} + W_{turbina}}{0,7 m}$$

$$P_1 = \frac{119,76 * 9,81 + 11 * 9,81}{0,7 m}$$

$$W_1 = 1832,5 N/m$$

$$P_2 = \frac{W_{Bomba} + W_{Tuberia} + W_{accesorios}}{0,4 m}$$

$$P_2 = \frac{18,5 * 9,81 + 2 * 9,81 + 5,5 * 9,81}{0,4}$$

$$W_2 = 637,65 N/m$$

Donde R_1 Reacción en el punto A, R_2 Reacción en el punto B, la carga total que soporta la estructura se considera de tipo distribuida cuya variable es W_1 con respecto al lado del tanque y W_2 en el lado de la bomba, se considera que R_1 y R_2 son puntos de sujeción.

En el diagrama de fuerzas se aplica sumatoria de momentos en el punto A para poder obtener las reacciones R_1 y R_2 y se toma las fuerzas como puntuales.

$$\sum M_A = 0$$

$$R_2 * 1,2 + P_1 * 0,35 + P_2 * 1 = 0$$

$$R_2 = \frac{P_1 * 0,35 + P_2 * 1}{1,2}$$

$$R_2 = \frac{P_1 * 0,35 + P_2 * 1}{1,2}$$

$$R_2 = \frac{1282,75 * 0,35 + 225,06 * 1}{1,2}$$

$$R_2 = 586,68 \text{ N}$$

Aplicando sumatoria de fuerzas con respecto al eje y se tiene:

$$\sum F_y = 0$$

$$R_1 + R_2 - P_1 - P_2 = 0$$

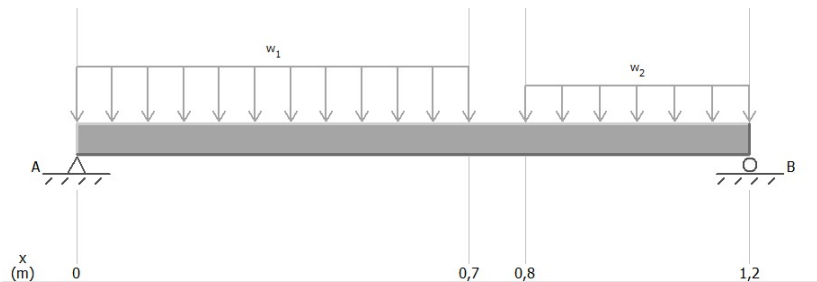
$$R_1 = P_1 + P_2 - R_2$$

$$R_1 = 1282,75 + 255,06 - 586,68$$

$$R_1 = 951,13 \text{ N}$$

Figura 38

Diagrama de cuerpo libre MDSolid.

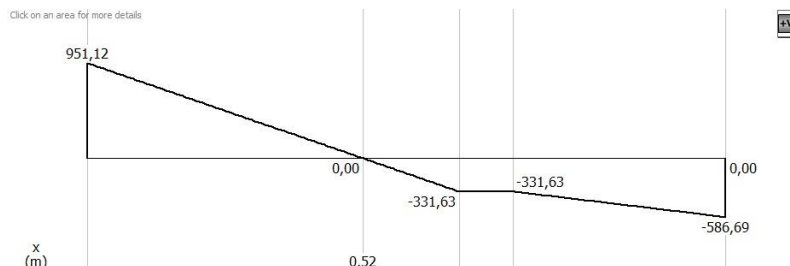


Nota. En la figura se observa el diagrama de cuerpo libre de cargas del sistema.

Con los datos anteriores se procederá a realizar el diagrama de fuerzas cortantes y momento flector.

Figura 39

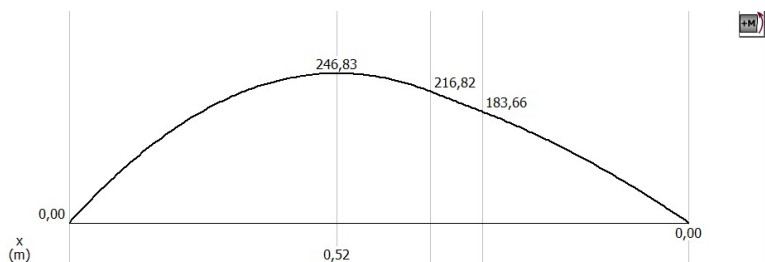
Diagrama de esfuerzos cortantes



Nota. En la figura se observa el diagrama de esfuerzos cortantes del sistema.

Figura 40

Diagrama de momento flector



Nota. En la figura se observa el diagrama de momento flector del sistema.

Como se visualiza en la Figura 40, el momento máximo se produce a una distancia 0.52 m medida desde el punto A, y su valor es:

$$M_{max} = 246,83 \text{ Nm}$$

Esfuerzo admisible. Para el cálculo de la estructura principal se necesita las características de material a utilizar se detallan en Tabla 22.

Tabla 22*Propiedades ASTM A36*

Material	Resistencia a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Elongación
ASTM	$S_{ut} = 400min$	$S_y = 250$	20%
A36	$S_{ut} = 500 max.$		

Nota. En la tabla se puede observar las propiedades del material de la estructura. Tomado de (Budynas & Nisbett, 2012)

Para el cálculo de flexión se tiene la ecuación del esfuerzo admisible:

$$\sigma_{adm} = \frac{S_y}{f_s}$$

La Norma ANSI-ASME recomienda un factor de seguridad igual a 2 (Budynas & Nisbett, 2012).

$$\sigma_{adm(t)} = \frac{250Mpa}{2} \rightarrow \sigma_{adm(t)} = 125Mpa$$

Siendo 250 MPa el esfuerzo de fluencia del acero ASTM A36 con la Ecuación 14, se despeja el módulo de sección.

$$W_{Requerido} = \frac{M_{max}}{\sigma_{Trabajo}}$$

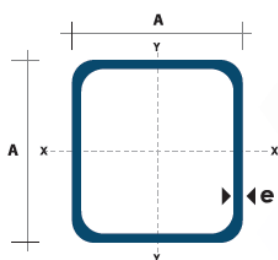
$$W_{Requerido} = \frac{246,83 Nm}{125 * 10^6 Pa}$$

$$W_{Requerido} = 1,97 * 10^{-6} m^3 \approx 1,97 cm^3$$

Con el módulo de sección determinado anteriormente es lo mínimo requerido para no sobrepasar el esfuerzo admisible del acero, se procede buscar un perfil cuadrado comercial:

Figura 41

Catálogo Dipac perfil Cuadrado



Dimensiones			Área	Ejes X-Xe Y-Y		
A mm	Espesor mm (e)	Peso Kg/m	Área cm ²	I cm ⁴	W cm ³	i cm ³
20	1,2	0,72	0,90	0,53	0,53	0,77
20	1,5	0,88	1,05	0,58	0,58	0,74
20	2,0	1,15	1,34	0,69	0,69	0,72
25	1,2	0,90	1,14	1,08	0,87	0,97
25	1,5	1,12	1,35	1,21	0,97	0,95
25	2,0	1,47	1,74	1,48	1,18	0,92
30	1,2	1,09	1,38	1,91	1,28	1,18
30	1,5	1,35	1,65	2,19	1,46	1,15
30	2,0	1,78	2,14	2,71	1,81	1,13
40	1,2	1,47	1,80	4,38	2,19	1,25
40	1,5	1,82	2,25	5,48	2,74	1,56
40	2,0	2,41	2,94	6,93	3,46	1,54
40	3,0	3,54	4,44	10,20	5,10	1,52
50	1,5	2,29	2,85	11,06	4,42	1,97
50	2,0	3,03	3,74	14,13	5,65	1,94
50	3,0	4,48	5,61	21,20	4,48	1,91
60	2,0	3,66	3,74	21,26	7,09	2,39
60	3,0	5,42	6,61	35,06	11,69	2,34
75	2,0	4,52	5,74	50,47	13,46	2,97
75	3,0	6,71	8,41	71,54	19,08	2,92
75	4,0	8,59	10,95	89,98	24,00	2,87
100	2,0	6,17	7,74	122,99	24,60	3,99
100	3,0	9,17	11,41	176,95	35,39	3,94
100	4,0	12,13	14,95	226,09	45,22	3,89
100	5,0	14,40	18,36	270,57	54,11	3,84

Nota. En la figura se puede observar las dimensiones del perfil cuadrado seleccionado.

Tomado de (Dipac, 2020).

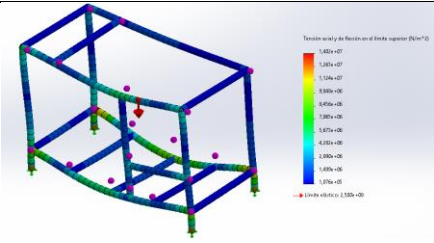
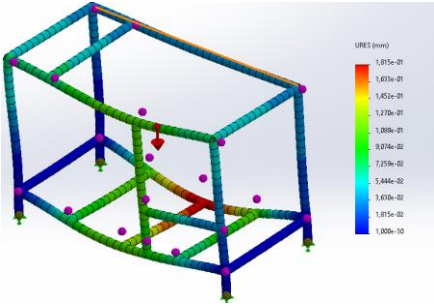
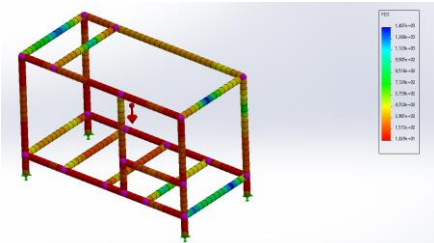
En los cálculos el módulo de sección mínimo es de $1,97 \text{ cm}^3$, Se selecciona al perfil de 40 mm y 2 mm de espesor

Verificación en software

En este apartado, con el uso del software de SolidWorks se realiza un análisis a la estructura principal que soportara el módulo didáctico de una pico central hidroeléctrica, tomando en cuenta el factor de seguridad con respecto a las características mecánicas del material.

Tabla 23

Resultados del análisis de la estructura principal.

Figura	Análisis	Resultado
	Tensión de Von Mises	$\sigma_{max} = 14,02 \text{ MPa}$
	Desplazamiento	$y_{max} = 0,1815 \text{ mm}$
	Factor de seguridad	$FOS_{min} = 18.28$

Nota. En la tabla se muestra los resultados de los análisis de la estructura principal.

En la Tabla 23, se muestra los resultados obtenidos en el análisis de la estructura principal mostrando que el desplazamiento máximo que tiene es de 0,1815 mm que visualmente no se aprecia y la tensión máxima es de 14,02 MPa la cual no sobrepasa los 250 MPa de resistencia a la fluencia que tiene el material, en los lugares críticos de la estructura el factor de seguridad es de 18,28 esto quiere decir que la estructura es completamente segura y la tensión máxima que se tenga en la estructura debido al peso de los diferentes componentes del módulo es mucho menor que la tensión máxima que soporta el material.

Capítulo IV

Construcción, montaje y pruebas

Después de finalizar la fase de diseño, en este capítulo se detalla la fabricación y ensamblaje del módulo de una pico central hidroeléctrica, identificado todos los componentes requeridos, dimensionado su tamaño y se exhiben las partes que se elaboran totalmente, se incluyen los diagramas del proceso de construcción haciendo referencia a su anexo correspondiente y sustentando con imágenes de su terminación final.

Construcción de la estructural principal.

La Figura 42, se muestra la estructura de soporte diseñada en SolidWorks y se puede observar su resultado ya soldada, perforada y pintada.

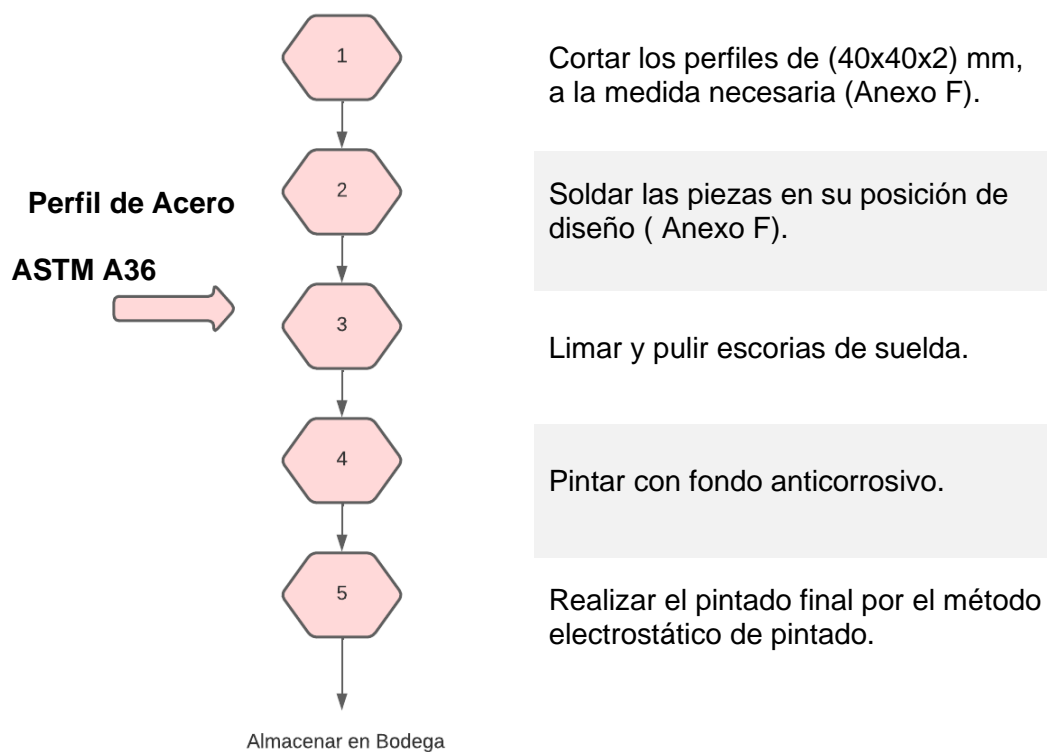
Figura 42

Estructura principal.



Nota. En la figura se muestra la estructura principal que soporta al sistema

Diagrama de proceso de la estructura de principal.

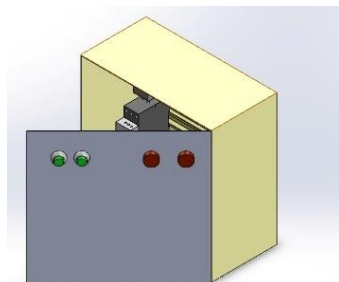


Tablero de control eléctrico.

En la Figura 43, se muestra el tablero de control eléctrico, su diseño en SolidWorks y su terminación final.

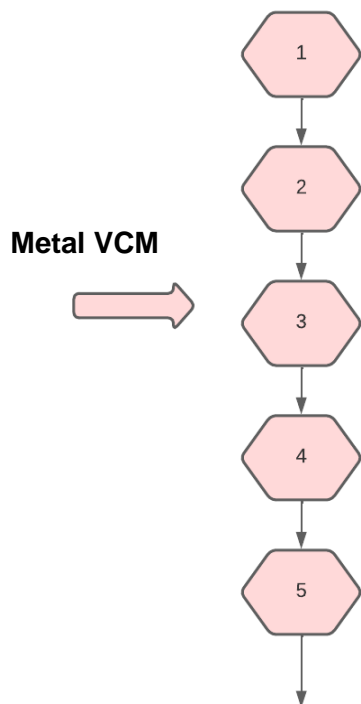
Figura 43

Tablero de control eléctrico.



Nota. En la figura se muestra el tablero de control eléctrico.

Diagrama del proceso de construcción del tablero de control eléctrico.



Se toma las medidas según el diseño de la estructura principal para que se integre a la estructura. (Anexo F).

Se compra un tablero de control de 40x40x20 cm de metal tipo VCM.

Se realiza perforaciones bajo la estructura para empotrar el tablero.

Con tornillo autoperforante de $\frac{1}{2}$ pulgada se empotra la caja a la estructura.

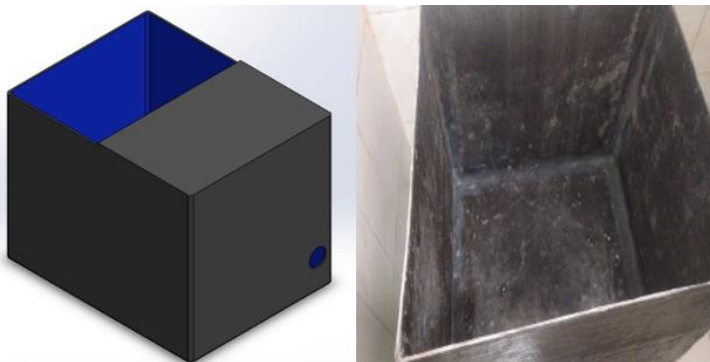
Se conecta dentro del tablero todos los accesorios y protecciones eléctricas con los planos del Anexo E.

Tanque almacenador de agua

En la Figura 44, se muestra la fabricación del tanque almacenador de agua, como su diseño en SolidWorks y su resultado terminado.

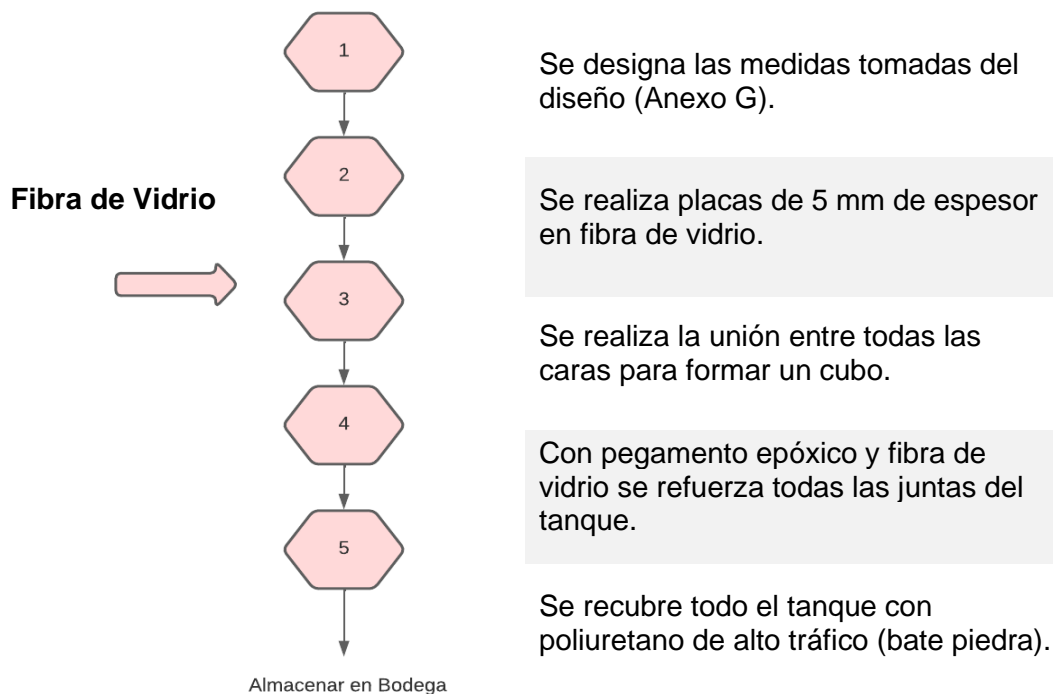
Figura 44

Tanque almacenador de agua.



Nota. En la figura se muestra el tanque almacenador de agua.

Diagrama del proceso de construcción del tanque almacenador de agua.

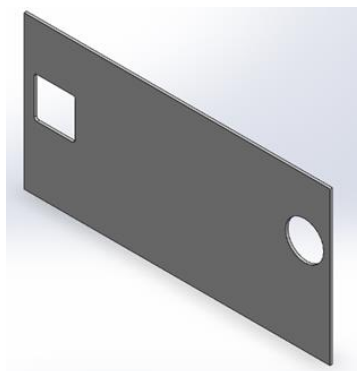


Tablero de soporte.

En la Figura 45, se muestra el tablero de soporte que cubre la estructura, su diseño en SolidWorks y su terminado final.

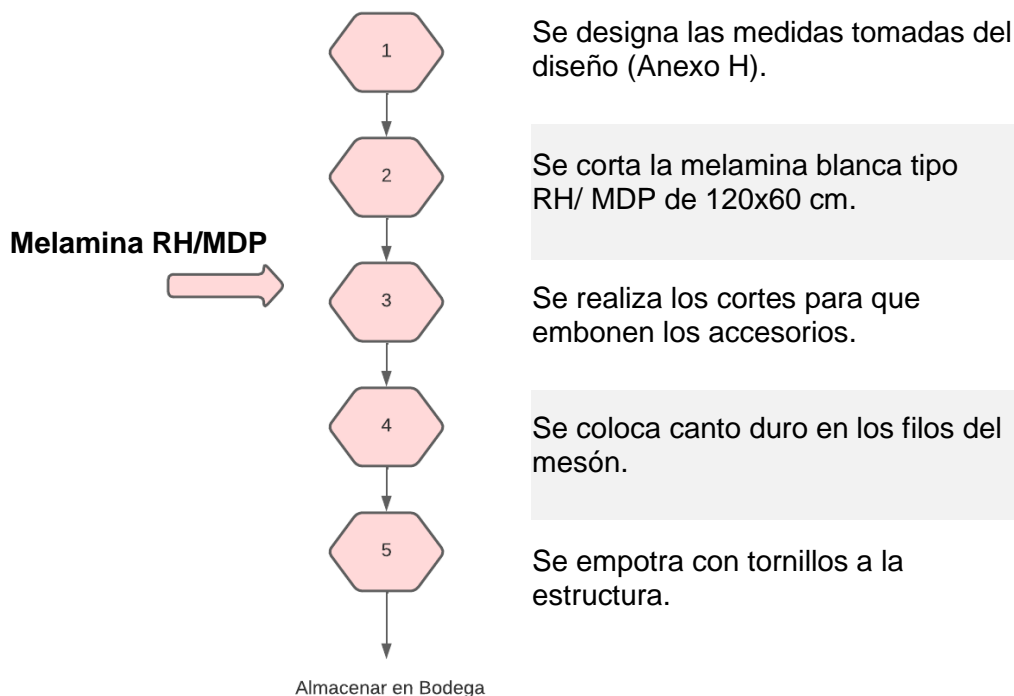
Figura 45

Tablero de soporte.



Nota. En la figura se muestra el tablero de soporte del módulo.

Diagrama de proceso de construcción del tablero de soporte.

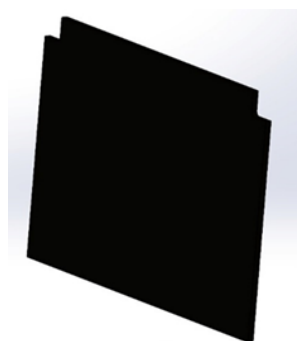


Base de la bomba de agua.

En la Figura 46, se muestra la base donde se asienta la bomba, su diseño en SolidWorks y su terminado final.

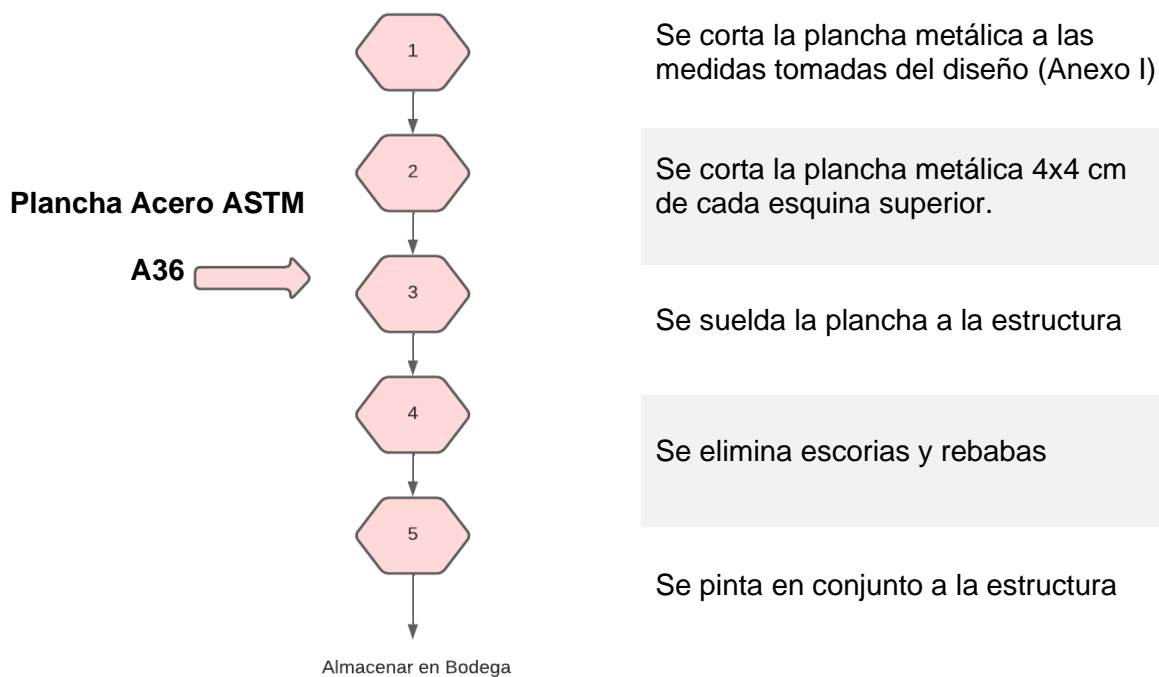
Figura 46

Base de la bomba de agua.



Nota. En la figura se muestra la base de la bomba de agua del módulo.

Diagrama del proceso de la construcción de la base de la bomba de agua.

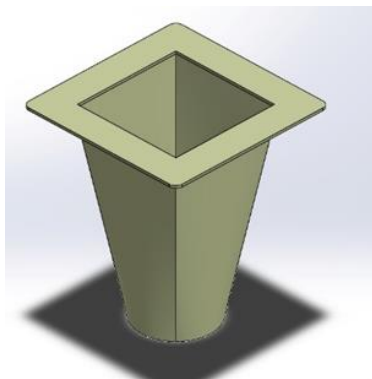


Ducto de descarga de agua.

En la Figura 47, se muestra el ducto de descarga de agua, su diseño en SolidWorks y su terminado final.

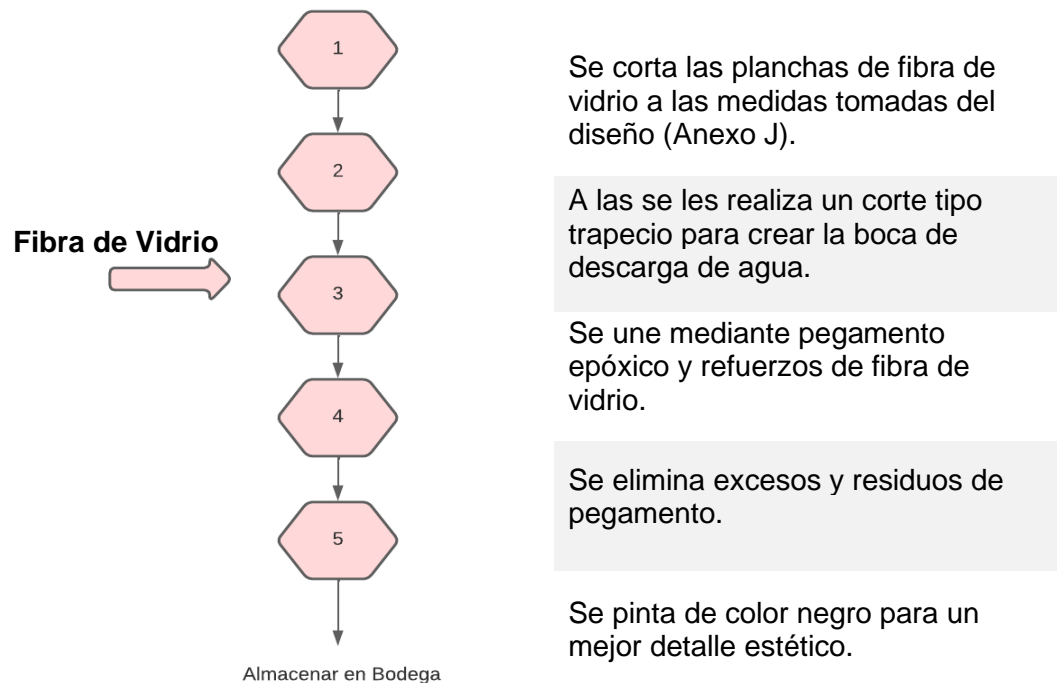
Figura 47

Ducto de descarga de agua.



Nota. En la figura se muestra el ducto de descarga de agua del módulo.

Diagrama del proceso de construcción del ducto de descarga de agua.

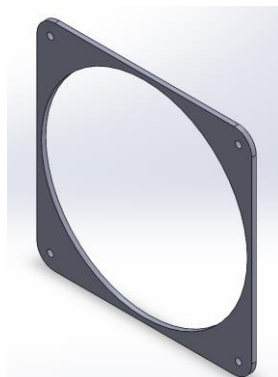


Empaque

En la Figura 48, se muestra el empaque aislador de agua de la base de la turbina, su diseño en SolidWorks y su terminación final.

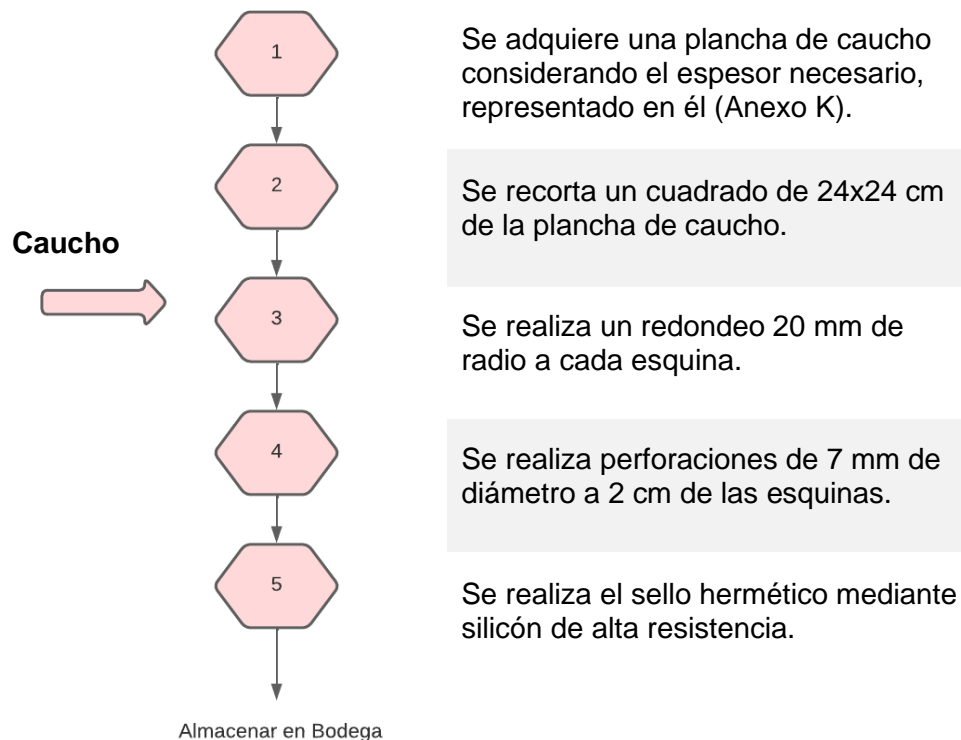
Figura 48

Empaque.



Nota. En la figura se muestra el empaque aislador de agua del módulo.

Diagrama del proceso de construcción del empaque aislador de agua.



Sistema de tuberías.

En la Figura 49, se muestra el sistema de tuberías, su diseño en SolidWorks y su terminación final.

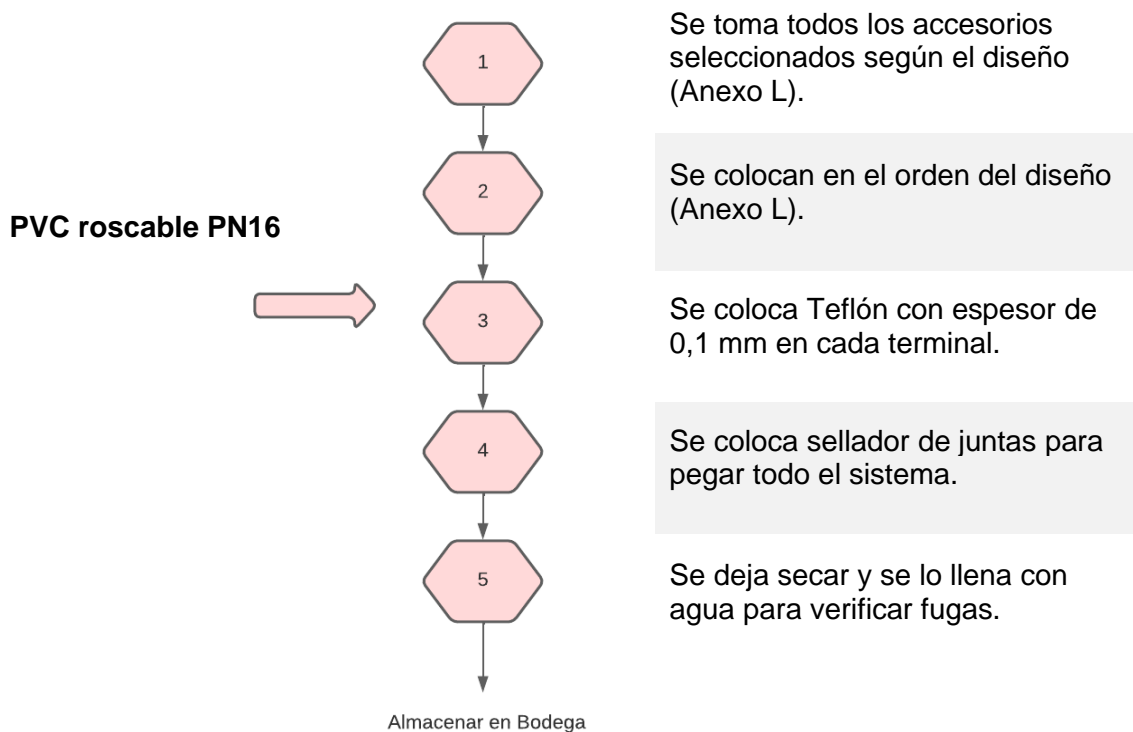
Figura 49

Sistema de tuberías.



Nota. En la figura se muestra el sistema de tuberías del módulo.

Diagrama del proceso de construcción del sistema de tuberías de PVC.

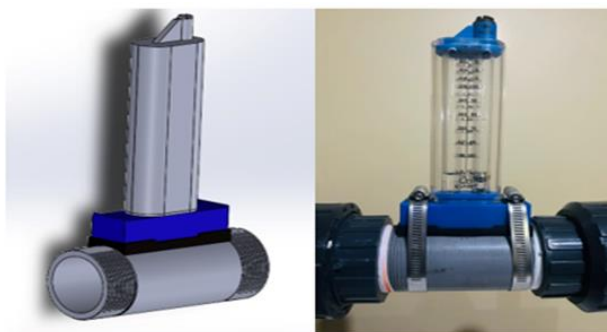


Base del flujómetro.

En la Figura 50, se muestra el ensamblaje del flujómetro sobre el sistema de tuberías, su diseño en SolidWorks y su terminación final.

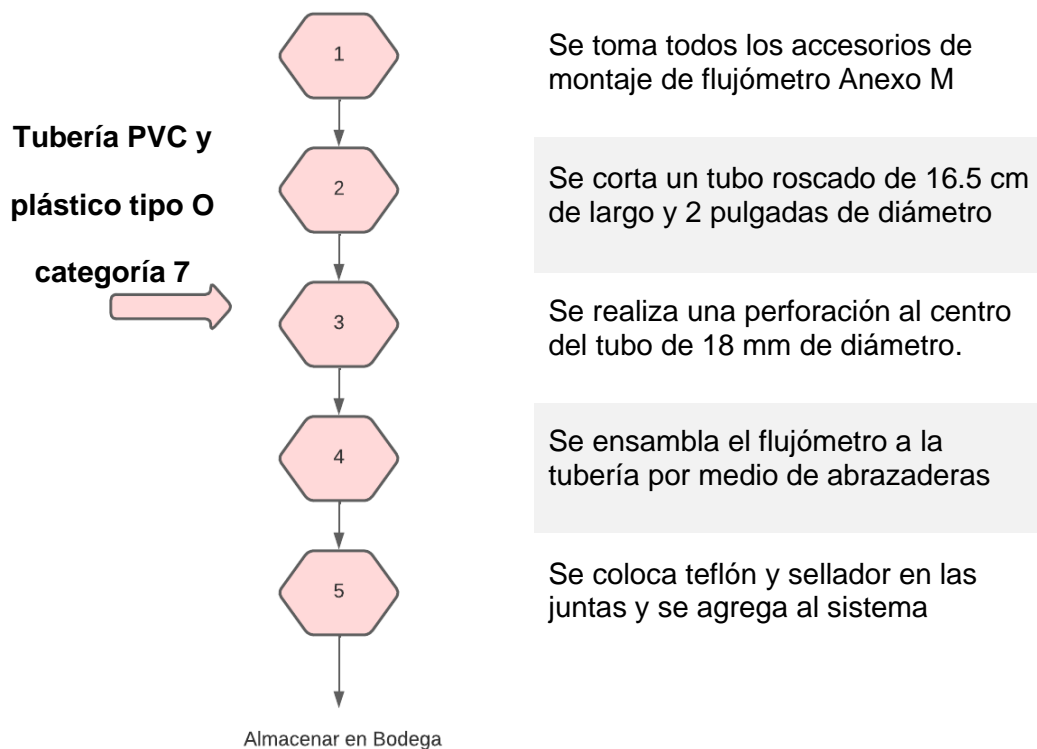
Figura 50

Base del flujómetro.



Nota. En la figura se muestra el montaje del flujómetro en su base.

Diagrama del proceso de construcción de la base del flujómetro.



Tubería flexible

En la Figura 51, se muestra la tubería flexible, su diseño en SolidWorks y su terminación final.

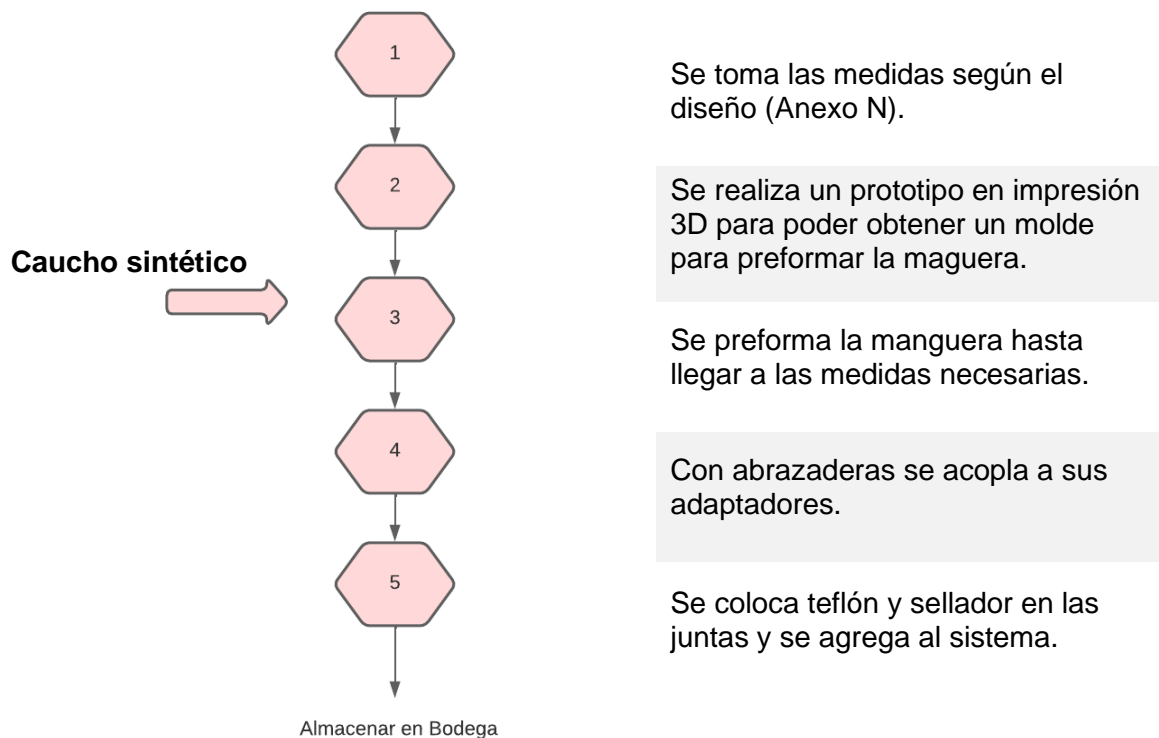
Figura 51

Tubería Flexible.



Nota. En la figura se muestra la tubería flexible del módulo.

Diagrama del proceso de construcción de la tubería flexible.

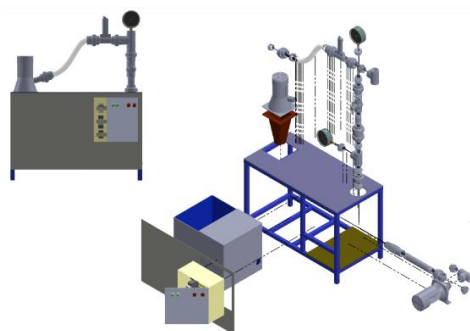


Montaje del sistema.

En la Figura 52, se muestra el montaje final del módulo de la pico central hidroeléctrica, su diseño en SolidWorks y su terminación final, representados en el Anexo O.

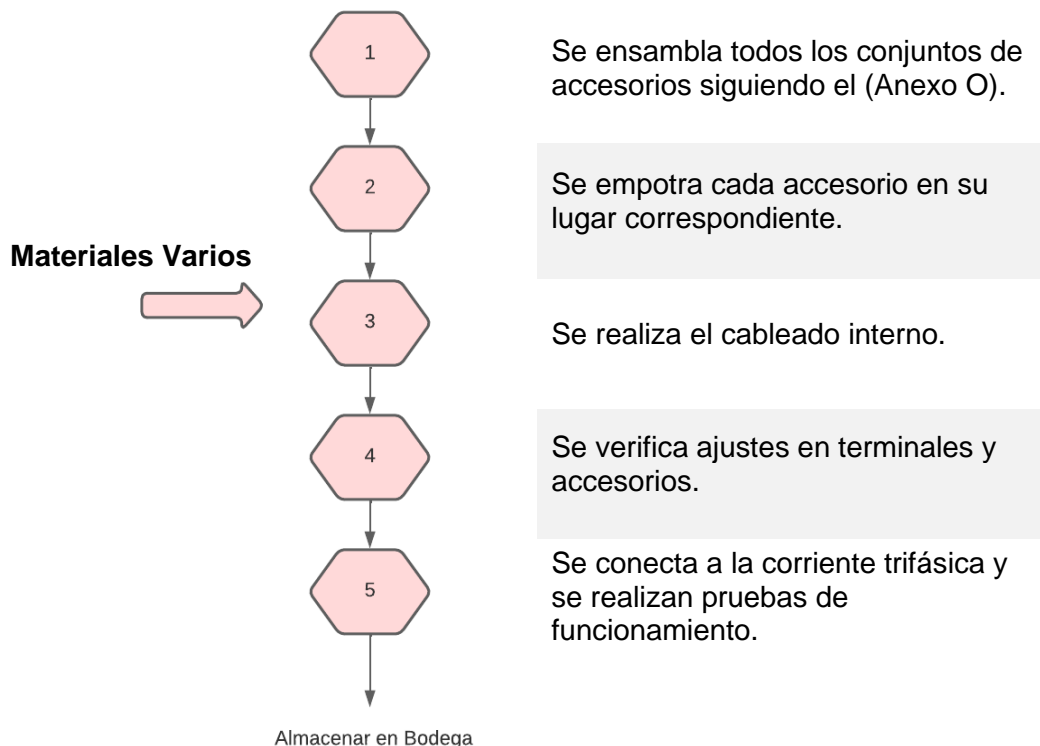
Figura 52

Montaje del sistema.



Nota. En la figura se muestra el montaje del sistema del módulo

Diagrama del proceso de montaje del sistema.



Resumen de materiales seleccionados.

En este apartado se realiza un desglose de los materiales utilizados en el módulo de la pico central hidroeléctrica, la Tabla 24, muestra en detalle cada uno de los materiales seleccionados, proporcionando información sobre sus especificaciones técnicas y los valores nominales correspondientes.

Es importante destacar que estos materiales han sido elegidos con el objetivo de garantizar un funcionamiento óptimo y eficiente del módulo de la pico central hidroeléctrica, cada componente ha sido evaluado en función de su idoneidad para el sistema hidráulico, eléctrico y mecánico, teniendo en cuenta factores como resistencia, durabilidad y compatibilidad.

Tabla 24

Resumen de materiales seleccionados.

NÚM.	DETALLE	CARACTERÍSTICAS
1	Generador micro hidráulico	CJ-300, H (12-14) m, Q (3-5) lt/seg.
2	Bomba	FAMAC FSG, 220v, 3 ϕ , 60 Hz.
3	Tubería	Tubería PVC roscable tipo PN16.
4	Perfil Estructural	Acero ASTM A36 (40x40x2) mm.
5	Placa Soporte	Acero ASTM A36 (40x60x6) mm.
6	Flujómetro	Rola-Chem 5-8 litros/segundo.
7	Manómetros	Ginebre, (0-100) Psi/ Glicerina.
8	Multímetro Digital	Croc See AC (80-260)V, 100A.
9	Manguera Flexible	2 pulgadas flexible termoformada.
10	Tablero De Control	Beaucoup (40X40X20) mm
11	Mesón	Melamina de 30 mm
12	Cable De Poder	Calibre 14 tipo Sucre, 20A
13	Cable De Accesorios	Calibre 18 tipo flexible, 6A
14	Interruptor Termomagnético	Schneider, C10
15	Contactador	Ls Ccontactors, MC-9b TIPO aC3
16	Relé Térmico	Ls Ccontactors Ms-9b / MT-32/3K
17	Luces Piloto	220 V, verde, rojo.
18	Reservorio De Agua	Fibra de vidrio (65x50x50) cm capacidad nominal 120lts.
19	Rieles Din	DIN A-100 de acero laminado
20	Regulador De Nivel	Camsco flotador KF-06

Nota. En la tabla se muestra el resumen de materiales seleccionados para el módulo.

Pruebas de funcionamiento.

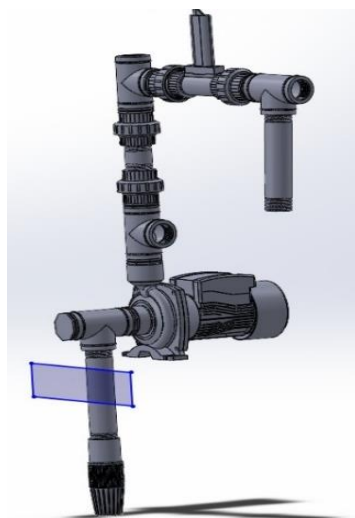
En este apartado se describen las pruebas que se han llevado a cabo a los diferentes componentes seleccionados que forman el módulo de la pico central hidroeléctrica, con el objetivo de verificar su correcto funcionamiento, se realizan pruebas en los equipos adquiridos para comprobar que cumplen con las especificaciones técnicas requeridas y asegurar su capacidad para integrarse adecuadamente en el módulo didáctico. De esta manera, se garantiza que pueda ser utilizado de manera eficiente y efectiva en la enseñanza y aprendizaje de los principios fundamentales de la generación de energía hidroeléctrica.

Pruebas de funcionamiento de la bomba centrífuga

En la Figura 53, se observa el esquema realizado en SolidWorks para realizar las pruebas de funcionamiento de la bomba centrífuga seleccionada.

Figura 53

Prueba de funcionamiento de la bomba centrífuga



Nota. En la figura se muestra la prueba realizada de la bomba centrífuga y el esquema en SolidWorks.

Para las pruebas de funcionamiento se utiliza los elementos del circuito hidráulico, así como los elementos de instrumentación como son, el flujómetro y el manómetro para poder obtener los parámetros de funcionamiento de la bomba centrífuga, los elementos usados en la prueba se detallan en la Tabla 25.

Tabla 25

Componentes usados para la prueba de funcionamiento de la bomba centrífuga.

Componente	Cantidad
Bomba Centrífuga	1
Flujómetro	1
Manómetro	1
Tee PVC	3
Universales	3
Tubo en Yee	1
Tapón	1
Codo 90°	1
Válvula de pie	1
Tubo PVC de 28 cm	2
Tanque de 60 litros	1
Estructura	1
Teflón	1

Nota. En la tabla se muestra los diferentes componentes que se utiliza para realizar la prueba de funcionamiento de la bomba centrífuga.

Para el accionamiento de la bomba centrífuga se conecta la bomba a la red trifásica de 220 V a 60 Hz, para obtener la secuencia correcta de las fases de la bomba se realiza impulsos pequeños de arranque a la bomba y así obtener la dirección de giro la cual es detallada en la carcasa de esta.

Para el accionamiento del circuito hidráulico se debe revisar que el nivel de agua en el tanque sea mayor que la posición de la válvula de pie, purgar la bomba en el tramo de la tubería Yee con el objetivo de que no existan burbujas de aire en el sistema.

Tabla 26

Parámetros obtenidos en la prueba de funcionamiento de la bomba centrífuga.

Prueba de funcionamiento de la bomba centrífuga.		
Voltaje	Corriente	Sentido
220 V	5,7 A	Antihorario
Flujómetro	Manómetro	Succión
303 LPM	1 PSI	Negativa

Nota. En la tabla se muestra los parámetros obtenidos en la prueba de funcionamiento de la bomba centrífuga.

Pruebas de succión con la bomba centrífuga. En este apartado se toma en cuenta las diferentes formas de succión que se pueden instalar en la estructura principal como son la succión positiva y la succión negativa. Al realizar la prueba se debe tomar en consideración los parámetros eléctricos de la bomba centrífuga como sus valores nominales, para ello se tiene la siguiente tabla comparativa.

Tabla 27

Parámetros Obtenidos en Pruebas

Pruebas Succión		
Tipo de succión	Voltaje	Corriente
Positiva	220 V	5,5 A
Negativa	215 V	5,8 A

Nota. En la tabla se muestra los diferentes parámetros eléctricos obtenidos en las diferentes pruebas de succión de la bomba centrífuga.

En la Tabla 27, se tiene los parámetros eléctricos de la bomba en los distintos métodos de succión

Figura 54

Tipos de succión



Nota. En la figura se representa los tipos de succión recomendadas para bombas centrífugas, Tomado de (pumpsbomas, 2015).

En el caso de la succión negativa, la posición de la bomba con relación al recurso hidráulico requiere un mayor esfuerzo para generar succión, ya que va en contra de la gravedad y esto disminuye el desempeño y eficiencia de la bomba. Sin embargo, esta succión tiene ventajas, como la reducción de componentes y pérdidas, así como la prevención de la cavitación en la bomba.

La succión positiva, al estar conectada al nivel inferior del tanque, nos brinda la ventaja de lograr una succión más directa. Al estar en esta posición, la presión generada dentro del tanque ayuda a facilitar el proceso de succión, evitando la formación de burbujas de aire en el

sistema. Esto es crucial, ya que la presencia de burbujas de aire podría llevar a la cavitación, un fenómeno que puede dañar seriamente a la bomba.

Otra de las ventajas de la succión positiva es el número de accesorios que se emplean en su conexión ya que, al necesitar menos implementos se reducen las pérdidas producidas por número de elemento, de igual manera se puede ocultar de mejor forma la toma de succión dentro del módulo de la pico central hidroeléctrica y mantener una mejor estética.

Pruebas de funcionamiento del generador microhidráulico.

En este apartado se detallan las pruebas de funcionamiento realizadas en el generador microhidráulico con los diferentes tipos de succión, para poder obtener la mejor opción de generación para el módulo de la pico central hidroeléctrica.

Pruebas de funcionamiento con carga. Para las pruebas realizadas al generador microhidráulico se utiliza un banco de resistencias tomado del laboratorio con una potencia máxima de 252 W a 120 V, las pruebas con la succión positiva se representan en la siguiente tabla.

Tabla 28

Datos del generador microhidráulico con succión positiva.

Pruebas del generador con succión positiva					
Voltaje [V]	Corriente [A]	Frecuencia [Hz]	Potencia [W]	Caudal [Q]	Presión [Psi]
115	1.6	50	184	265	17

Nota. En la tabla se muestra los valores obtenidos en las pruebas realizadas al generador microhidráulico con succión positiva.

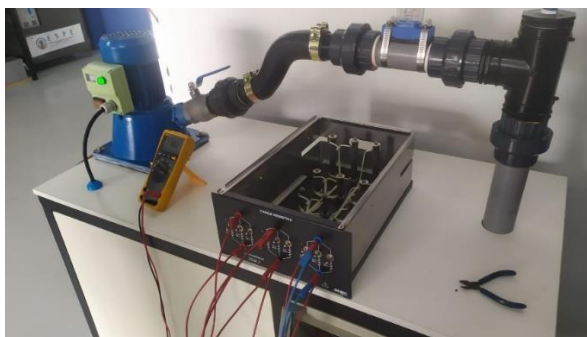
En la Tabla 28, se tiene los datos del generador microhidráulico con una succión positiva se tiene valores de 184 W de potencia con una carga de 1.6 amperios y esta potencia es la adecuada para poder usar en el laboratorio conectado al banco de resistencias.

Prueba de funcionamiento del módulo didáctico.

En este apartado se realizan las pruebas de funcionamiento del módulo didáctico como se utiliza en una práctica normal de laboratorio estando en funcionamiento alrededor de una hora.

Figura 55

Conexión del banco de resistencias.



Nota. En la figura se muestra la conexión realizada del banco de resistencias al módulo didáctico.

Al conectar el módulo didáctico a cargas resistivas se da valores de 400 Ω a 57 Ω para poder observar su comportamiento, al colocar el primer valor de 400 Ω se puede observar que la frecuencia del generador microhidráulico no presenta cambios, a comparación del voltaje el cual presenta una caída de 119 V a 115,2 V y una potencia de generación de 34,5 W.

Mediante la variación paulatina de cargas se puede observar que al llegar a la resistencia de 85,71 Ω el módulo didáctico presenta su valor más alto de generación de voltaje

de 118,8 V y una potencia de generación de 164 W, lo que le permite entregar una frecuencia de 50 Hz.

La potencia máxima que el módulo puede generar se ve reflejada al momento de estar expuesto a una resistencia de 75 Ω la cual genera 186 W a 50 Hz y 118 V.

La instrumentación del circuito hidráulico en toda la generación se mantiene sin presentar cambios, teniendo un caudal de 290 L/min o 4,833 L/s, el manómetro tiene una presión de 18 PSI esto transformado a metros de columna de agua es 12,65 m, estos parámetros hidráulicos se encuentra en el rango óptimo de funcionamiento del módulo didáctico de la pico central hidroeléctrica.

En la Tabla 29, se observa los datos obtenidos en la práctica realizada al módulo didáctico de una pico central hidroeléctrica, teniendo como carga a un banco de resistencias, el cual posee una máxima potencia 252 W.

Tabla 29

Datos obtenidos de la prueba realizada.

Resistencia [Ω]	Corriente [A]	Voltaje [V]	Frecuencia [Hz]	Potencia [W]	Caudal [L/min]	Presión [PSI]	IL motor [A]
∞	0	119	50	0	290	18	5,50
400,00	0,299	115,2	50,00	34,5	290	18,00	5,50
200,00	0,579	115,6	50,00	67	290	18,00	5,50
171,42	0,672	115,60	50,00	77,70	290	18,00	5,50
150,00	0,767	115,80	50,00	88,9	290	18,00	5,50
133,30	0,860	116,20	50,00	100	290	18,00	5,50
120,00	0,960	116,60	50,00	112	290	18,00	5,50
100,10	1,150	117,30	50,00	135	290	18,00	5,50
85,71	1,380	118,80	50,00	164	290	18,00	5,50
75,00	1,576	118,00	50,00	186,00	290	18,00	5,50
66,67	1,625	112,00	47,00	182,00	290	18,00	5,50
60,00	1,752	105,00	45,00	184,00	290	18,00	5,50
57,14	1,784	102,00	43,00	182,00	290	18,00	5,50

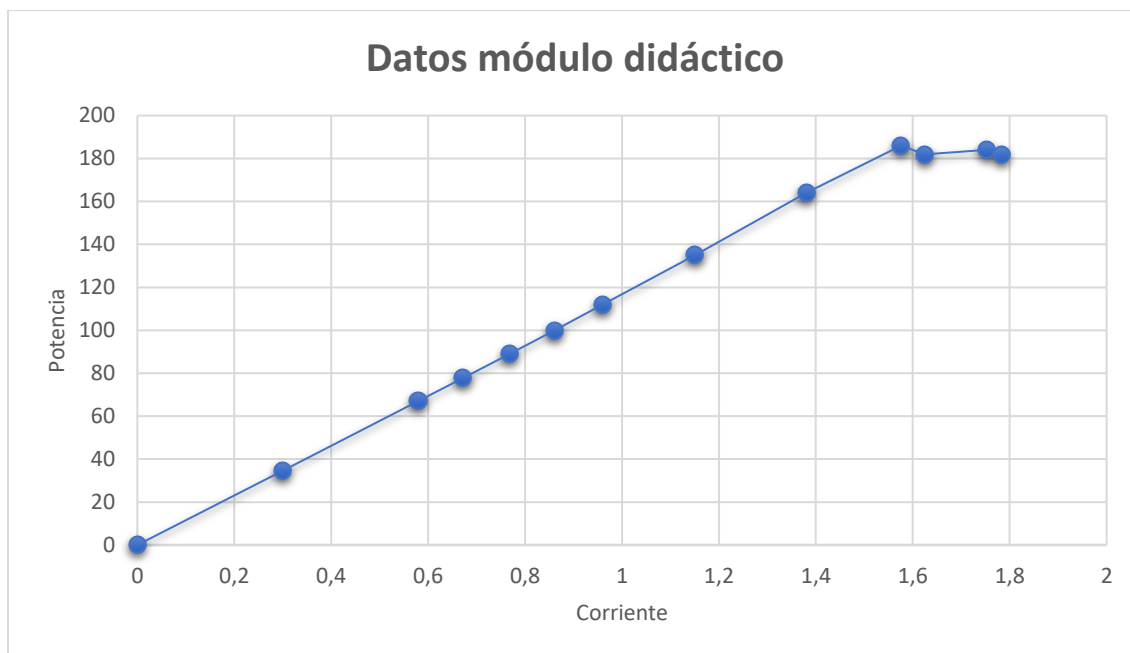
Nota. En la tabla se muestra los datos obtenidos en la prueba realizada.

Análisis de resultados.

En este apartado se analiza los datos obtenido en las pruebas realizadas del módulo didáctico de una pico central hidroeléctrica, en el laboratorio de energías renovables de la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE sede Latacunga.

Figura 56

Gráfica Potencia - Corriente.



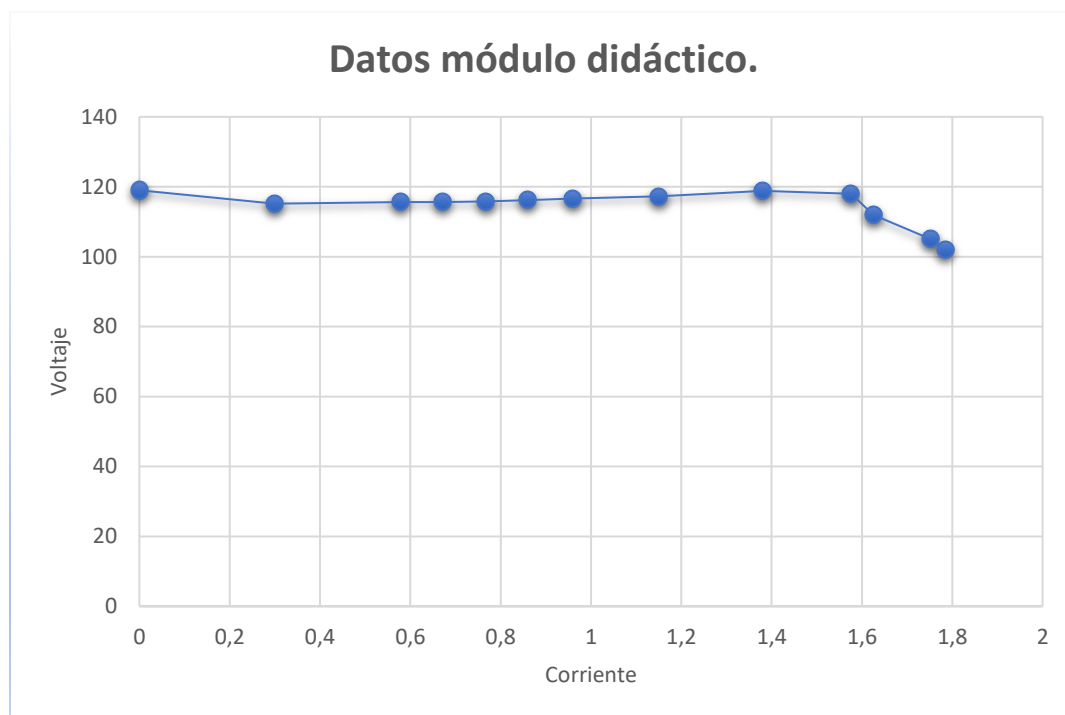
Nota. En la Figura se muestra la gráfica potencia vs corriente realizado con los datos obtenidos de las pruebas del módulo didáctico.

En la Figura 56, se puede observar la gráfica potencia vs corriente, se colocó una carga máxima de 57,14 $[\Omega]$ teniendo una potencia de 182 W, el punto más alto de generación con carga resistiva es de 75 $[\Omega]$ con una potencia de 186 W, a partir de esta carga el generador al colocar una carga de 66,67 $[\Omega]$ existe caída en los parámetros del generador, pero la potencia

se empieza a estabilizar debido a que la bomba está entregando la potencia máxima que puede suministrar a la turbina.

Figura 57

Gráfica Voltaje Corriente.



Nota. En la Figura se muestra la gráfica voltaje vs corriente realizado con los datos obtenidos de las pruebas del módulo didáctico.

En la Figura 57, se puede observar en la gráfica voltaje vs corriente se tiene que el voltaje entregado por el generador microhidráulico con carga no presenta una caída de voltaje excesivo hasta llegar a colocar una carga de $66,67 \Omega$ con una corriente de $1,625 \text{ A}$ el voltaje disminuye hasta 112 V y la frecuencia de 47 Hz , la potencia máxima que el generador microhidráulico puede entregar es de 186 W antes de que los parámetros eléctricos disminuyan.

Datos de generación con cargas altas

En la Tabla 29, se observa que a partir de la resistencia de carga de 66.67 Ω la frecuencia disminuye pues se ha sobrepasado su potencia máxima de generación y su voltaje en la carga también disminuye. Algunos parámetros de operación en forma detallada se encuentran en el manual del usuario que encuentra en el Anexo B.

Tabla 30

Comparación de parámetros hidráulicos del generador.

Comparación de parámetros hidráulicos		
Parámetros	Altura [mca]	Caudal [l/s]
Parámetros hidráulico obtenido en las pruebas realizadas.	12,65	4,833
Parámetros hidráulico-máximos de funcionamiento del generador	14	5

En la Tabla 30, se observa la comparación entre los parámetros hidráulicos, adquiridos en las pruebas realizadas y los parámetros máximos de funcionamiento proporcionado por el fabricante en el manual del generador microhidráulico, se tiene que la altura realizada en las pruebas de 12,65 mca y no llega a los 14 mca que requiere como máximo el generador microhidráulico, el caudal máxima en las pruebas es de 4,5 l/s que es inferior al caudal máximo que admite el generador de 5 l/s, con la Ecuación 2, se calcula la potencia hidráulica que posee el circuito al realizar las pruebas y con los parámetros máximos que admite el generador.

$$P_h = \rho * g * h * Q$$

Potencia hidráulica con los parámetros de las pruebas realizadas.

$$P_h = 1000 \frac{kg}{m^3} * 9,81 \frac{m}{s^2} * 12,65 * 0,00483 m^3/s$$

$$P_h = 599,38 \text{ W}$$

Potencia hidráulica con los parámetros máximos del funcionamiento del generador microhidráulico.

$$P_h = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} * 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} * 14 * 0,005 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$P_h = 686.7 \text{ W}$$

Las potencias hidráulicas en la generación son de 599,38 W y con los parámetros máximos es de 686,7 W, los valores de la potencia hidráulica en las pruebas son muy cercanas a las de generación con los parámetros máximos de funcionamiento del generador microhidráulico, lo que significa que se tiene una muy buena reacción de generación con respecto a su valor nominal.

Capítulo V

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

Se realizó el diseño y construcción de un módulo didáctico de una pico central hidroeléctrica abastecida desde un reservorio de agua, el vector energético es impulsado por una bomba centrífuga trifásica, la cual permite operar el generador microhidráulico obteniendo una potencia adecuada para su uso en el laboratorio, para la obtención de las distintas variables que influyen en la generación de energía eléctrica, se incorporó instrumentos de medida como un caudalímetro, manómetro y dispositivos para la medida de magnitudes eléctricas.

Se diseñó el circuito hidráulico para el módulo didáctico de una pico central hidroeléctrica, con una potencia máxima de generación de 300 W para uso en laboratorios, se utiliza una bomba centrífuga de 2 Hp para la alimentación del recurso hidráulico al circuito, con tuberías de PVC de 2" en las secciones de succión y descarga, Se emplean accesorios PN10 y PN16, y el trayecto máximo es de 1,3 m con una fricción de 0,0195 y pérdidas en el circuito hidráulico de 2,92 m.

Se realizó el cálculo de la altura neta positiva de aspiración disponible en el circuito hidráulico considerando las condiciones de presión y temperatura de la ciudad de Latacunga, obteniendo una fricción en la tubería de succión de 0,776 m se tiene una carga positiva neta disponible de 7,448 m, con las curvas de funcionamiento de la bomba seleccionada se tiene que la altura neta positiva de aspiración requerida por la bomba es de 6.093 m, siendo menor al valor disponible en el circuito hidráulico, concluyendo que la bomba no cavita.

Se realizó los cálculos de diseño de la estructura principal, la cual soporta el módulo didáctico y a todos sus accesorios, dando como resultado un peso máximo de 1537,81 N, un

momento máximo de 246,83 Nm y un módulo de sección de $1,97 \text{ cm}^3$. De la obtención de estos valores se realizó la selección del perfil de 40*40*2 mm estructural, dándonos como resultado un esfuerzo máximo sobre la estructura de 14,02 MPa y un desplazamiento de 0,1815 mm. La estructura tiene un factor de seguridad de 18,28 siendo seguro para el uso en los laboratorios.

Se implementó instrumentación para cuantificar las variables de caudal y de presión, para lo cual se utilizó un rotámetro adaptable a tubería de 2" que posee un rango desde 151 L/min hasta 530 L/min, se utilizó un manómetro de glicerina con rango máximo de 90 Psi para el módulo y considerando que la presión máxima que puede entregar la bomba es de 45 Psi.

Se implementó medidor de variables eléctricas para mostrar los datos del generador microhidráulico como voltaje, intensidad, frecuencia, potencia, factor de potencia y medidor de energía, este medidor facilita la obtención de los datos del generador microhidráulico.

Para la operación de módulo didáctico se implementó un sistema de mando a 3 hilos el cual consta de un interruptor termomagnético principal con capacidad de hasta 16 A, un contactor tipo AC3 de 9 A y una protección térmica con regulación de 5-8 A. Un sensor de nivel eléctrico permite el paso de energía al módulo evitando que este arranque en caso de no poseer nivel necesario de agua en el reservorio. Las luces piloto cumplen la función de indicar el estado en el que se encuentra el módulo para poder ponerlo en funcionamiento.

Se realizaron prácticas de operación en el módulo didáctico de una pico central hidroeléctrica obteniendo una frecuencia constante de 50 Hz sin conectarlo a una carga externa, una vez colocado el módulo de cargas resistivas genera con normalidad, hasta llegar a su máxima potencia de 186 W y un caudal de 290 L/min a presión de 18 PSI o su equivalente a 12,65 mca. De esta manera se obtiene una potencia hidráulica de 599 W.

Recomendaciones

Utilizar el manual de operación del módulo didáctico de una pico central hidroeléctrica que se encuentra en el Anexo P, donde se detalla la instalación, funcionamiento y operación correcta del módulo para que no exista inconvenientes en su funcionamiento o posibles accidentes dentro del laboratorio.

Se recomienda antes de utilizar el módulo didáctico de una pico central hidroeléctrica verificar que exista agua en el tanque reservorio de agua al nivel recomendado, de igual forma que esté purgada la bomba de agua, verificar que las uniones universales estén correctamente ajustadas a sus acoples ya que al no existir esta revisión se puede generar fugas de agua por todo el sistema.

Al realizar el mantenimiento del módulo didáctico se debe tener las herramientas necesarias para tubería y accesorios PN16 de 2", el despiece del módulo didáctico, así como los planos respectivos para que no exista problemas en el funcionamiento.

Verificar al momento de realizar una práctica que dentro del tanque del módulo didáctico no exista basuras o partículas debido a que pueden dañar la bomba centrífuga o romper los álabes de la turbina y el módulo se ve afectado.

Al terminar cada práctica de laboratorio se recomienda realizar una limpieza del tanque, extrayendo el agua por la tubería de descarga, tener cuidado al desmontar el tanque en la tubería de succión debido a que debe contener agua por la válvula de pie.

Para realizar las prácticas en el laboratorio debe seguir la guía de laboratorio del módulo didáctico de una pico central hidroeléctrica en el Anexo Q.

El sistema fue implementado con una bomba trifásica, para que a futuro se pueda realizar el estudio de variación de caudal empleando un variador de frecuencia, el cual brinda mayor flexibilidad y control en el funcionamiento del sistema.

Bibliografía.

- Benavides, H. (2019, mayo 8). ¿En Ecuador dónde se concentra la mayor demanda de agua? ¿Es realmente en el sector agrícola? *Dialoguemos*. <https://dialoguemos.ec/2019/05/en-ecuador-donde-se-concentra-la-mayor-demanda-de-agua-es-realmente-en-el-sector-agricola/>
- Budynas, R., & Nisbett, K. (2012). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley, 9na Edición—Richard G. Budynas* (Novena). Mc Graw Hill.
https://www.academia.edu/33910807/Dise%C3%B1o_en_ingenier%C3%ADa_mec%C3%A1nica_de_Shigley_9na_Edici%C3%B3n_Richard_G_Budynas
- Canyon, H. (2014). *Guía de Hidroeléctricas* [Blog]. Canyon Hydro.
https://www.canyonhydro.com/guide_sp/HydroGuide03_sp.html
- Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2006). MECÁNICA DE FLUIDOS Fundamentos y aplicaciones. En V. Campos Olguín (Trad.), *MECÁNICA DE FLUIDOS: Vol. I* (Primera, p. 997). The McGraw-Hill.
- Ceupe, I. (2017). *Turbinas de acción*. Ceupe. <https://www.ceupe.com/blog/turbinas-de-accion.html>
- Dipac. (2020). *Productos de acero*.
- Electromotores. (2020, mayo 7). *ELECTROMOTORES | Rebobinado de Rotor de Polos Salientes* [Blog]. Electromotores. <https://electromotores.com/blog/rebobinado-de-rotor-de-polos-salientes>
- Elprofesor. (2012). *Medidores de Flujo—Instrumentación*.
http://webdelprofesor.ula.ve/ingenieria/djean/index_archivos/INST_Flujo/medidoresflujovolumetrico/toberadeflujo.html
- Engineering, T. (2023, abril 3). *Factor de Seguridad I SafetyCulture*. SafetyCulture.
<https://safetyculture.com/es/temas/factor-de-seguridad/>

- Espitia, S. S. (2013). *Diseño de una pequeña central hidroeléctrica a escala laboratorio utilizando aguas lluvias del bloque A de la Universidad Libre, sede Bosque Popular*.
<http://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/11325>
- Fernández, P. (2015). *TURBINAS HIDRÁULICAS*. DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA Y ENERGETICA UNIVERSIDAD DE CANTABRIA.
http://www.ing.una.py/pdf_material_apoyo/turbinas-hidraulicas.pdf
- González, F., Zamudio, E., & García, C. (2015). *Demostración y análisis del golpe de ariete por el método de los promedios aritméticos*. 11.
<http://dx.doi.org/10.14483/udistrital.jour.tecnura.2015.SE1.a12>
- González, M. P. (2009). *Turbinas de Reacción*.
https://ocw.ehu.eus/pluginfile.php/40262/mod_resource/content/1/maquinas_fluidos/tema-7-turbinas-de-reaccion.pdf
- González, S. M., Carvajal, L. C., & Martínez, G. L. (2011). Pico Centrales Hidroeléctricas (pCH): Una alternativa energética en zonas no interconectadas de Colombia. *Letras ConCiencia Tecnológica*, 10, Article 10.
- Hauser, K. S. M. (2011). *Caracterización de Turbina Hidráulica Tipo Turgo para Microgeneración*. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104103>
- Illidge, J. M., Velasco, J. L. C., Velasco, A. J. C., & Piehadrait, C. A. R. (2020). Diseño y simulación de un sistema pico-hydro para la generación de energía eléctrica en zonas rurales, mediante un software de mecánica de fluidos computacional. *Revista UIS Ingenierías*, 19(1), 155–170.
- Ingenieria, F. (2018). *Golpe de Ariete*. ingenieriadefluidos.
<https://www.ingenieriadefluidos.com/golpe-de-ariete>
- Landa, F. J., & Llanganate, L. E. (2009). *Diseño y construcción de una pico central hidroeléctrica utilizando una turbina Michell bancki para generación eléctrica en el sector*

- de las Carmelitas del Cantón Tena*. [BachelorThesis, LATACUNGA / ESPE / 2009].
<http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/3637>
- Maher, P., & Smith, N. (2001). *Un Manual Práctico para Instalaciones de hasta 5 kW en Terrenos de Pendientes Fuertes*. Dokumen. <https://dokumen.tips/documents/pico-hydro-power-pico-hidro-potencia-para-aldeas-un-manual-practico-para.html?page=13>
- Mott, R. L. (2015). Mecánica de Fluidos. En *Mecánica de Fluidos* (VII, 1–VII, pp. 120–123). PEARSON.
- Nelson, S. I. (2016, julio 11). Energía hidráulica, la primera renovable. *Eadic*.
<https://eadic.com/blog/entrada/energia-hidraulica-la-primera-renovable/>
- Nuñez, R. (2020, junio 26). *Como leer la curva de rendimiento de una bomba* [Blog]. North Ridge Pumps. https://www.northridgepumps.com/article-261_como-leer-la-curva-de-rendimiento-de-una-bomba
- Olivares, S. (2012, diciembre 4). *Placa orificio y boquilla de flujo*. prezi.com.
https://prezi.com/_gycfsvziv4-/placa-orificio-y-boquilla-de-flujo/
- Potter, M. C., Wiggert, D. C., & Ramadar, B. (2015). *MECÁNICA DE FLUÍDOS* (J. H. Romo, Trad.; Cuarta). CENGAGE Learning.
https://www.academia.edu/43519179/MEC%C3%81NICA_DE_FLU%C3%8DDOS
- Ramos, J. D., & Carrillo, C. M. (2019). *Diseño y construcción de un generador de flujo radial de imanes permanentes de neodimio con estator de polos salientes* [BachelorThesis, Universidad Técnica de Ambato. Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, Carrera de Ingeniería Mecánica]. <https://repositorio.uta.edu.ec:8443/jspui/handle/123456789/30154>
- Rodríguez, M. A. (2015). *MÁQUINAS SÍNCRONAS*. UNIVERSIDAD DE CANTABRIA.
<https://personales.unican.es/rodrigma/PDFs/Maquina%20sincrona%20aislada.pdf>
- Roman, J. L. (2017, noviembre 28). *MANÓMETRO | Qué es, como funciona, tipos y aplicaciones*. <https://como-funciona.co/un-manometro/>

- Rosetta. (2017, diciembre 1). *Caudalímetros tipo Venturi o Tubos Venturi*. Rosetta.
<https://rosetta-technology.com/es/blog/novedades/lineas-de-productos/tubo-venturi>
- Rotad. (2018). *Rotámetros*. <https://rotametros.mx/>
- Sandoval, W. R. (2018). *Diseño de obras Hidrotécnicas* (1a ed., Vol. 1). David Cabrera Reinoso, B.A. <https://www.udocz.com/apuntes/56003/disenio-de-obras-hidrotecnicas-washingtonn-sandoval-erazo>
- Santillán, R., & David, M. (2016). *Análisis y aplicación de un generador de imanes permanentes para un sistema de energía eólica* [UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA].
<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/13147/1/UPS-GT001716.pdf>
- Tamburrino, A. (2016). *MODULO DE YOUNG Y COEFICIENTE DE POISSON PARA DISTINTOS MATERIALES*.
- Velatia. (2020, septiembre 10). Energía hidroeléctrica ¿Qué es y cómo funciona? *Velatia*.
<https://www.velatia.com/es/blog/que-es-y-como-funciona-la-energia-hidroelectrica/>
- Villajulca, J. C. (2009, septiembre 27). Caudal - Flujo: Medidores de área variable.
Instrumentacion y Automatizacion Industrial. <https://instrumentacionycontrol.net/caudal-flujo-medidores-de-area-variable/>
- Wika. (2019). *Tubo Venturi—FLC-VT-BAR, FLC-VT-WS - WIKA México*.
http://www.wika.com.mx:1234/publish/flc_vt_bar_flc_vt_ws_es_es.aspx

Anexos