



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE ELECTRICIDAD

ANÁLISIS TÉCNICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO PARA LA
GENERACIÓN DE ENERGÍA EN LA PICO CENTRAL HIDRÁULICA
INSTALADA EN LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA CAMPUS
PAUTE

Trabajo de titulación previo a la obtención del
título de Ingeniero Eléctrico

AUTORES: MANUEL ANDRÉS MEJÍA MORALES
BYRON XAVIER GUILLIN MORALES

TUTOR: ING. FREDDY FERNANDO CAMPOVERDE ARMIJOS

Cuenca - Ecuador
2025

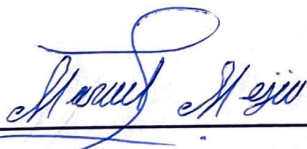
**CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL
TRABAJO DE
TITULACIÓN**

Nosotros, Manuel Andrés Mejía Morales con documento de identificación N^o 0104826979 y Byron Xavier Guillin Morales con documento de identificación N^o 1720668969; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

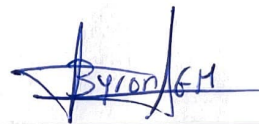
Cuenca, 26 de julio del 2025

Atentamente,



Manuel Andrés Mejía Morales

0104826979



Byron Xavier Guillin Morales

1720668969

**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL
TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, Manuel Andrés Mejía Morales con documento de identificación N° 0104826979 y Byron Xavier Guillin Morales con documento de identificación N° 1720668969, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del Proyecto técnico: “Análisis técnico de un sistema de bombeo para la generación de energía en la pico central hidráulica instalada en la Universidad Politécnica Salesiana campus Paute”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.


En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 26 de julio del 2025

Atentamente,



Manuel Andrés Mejía Morales
0104826979



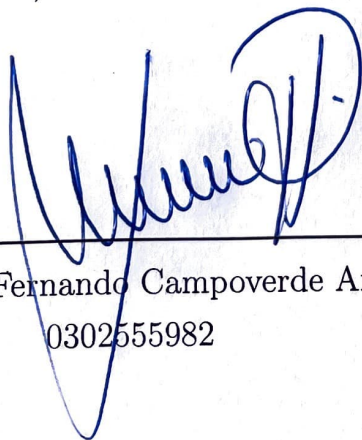
Byron Xavier Guillin Morales
1720668969

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Freddy Fernando Campoverde Armijos con documento de identificación N° 0302555982, docente de la Universidad Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS TÉCNICO DE UN SISTEMA DE BOMBEO PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA EN LA PICO CENTRAL HIDRÁULICA INSTALADA EN LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA CAMPUS PAUTE, realizado por Manuel Andrés Mejía Morales con documento de identificación N° 0104826979 y por Byron Xavier Guillin Morales con documento de identificación N° 1720668969, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Proyecto técnico que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 26 de julio del 2025

Atentamente,



Ing. Freddy Fernando Campoverde Armijos

0302555982

DEDICATORIA

A mi madre Blanca, por su amor incondicional, su entrega y su fuerza constante en cada etapa de mi formación. Gracias por estar siempre a mi lado, alentándome con ternura en los momentos difíciles y celebrando conmigo cada logro. Este trabajo es para ti, con todo mi amor.

A mi padre Manuel, por su apoyo inquebrantable y por cada uno de los sacrificios que hizo para ayudarme a alcanzar mis metas. Gracias por ser ejemplo de esfuerzo, compromiso y dedicación. Este logro también es tuyo.

A mi familia, por estar siempre presente en cada etapa de mi vida. A Soledad, por su ejemplo de fortaleza, y por ser un pilar que me ha impulsado a seguir adelante. A Jesica, por su constante compañía, sus consejos y su apoyo, que me brindaron motivación y confianza a lo largo de este proceso. A mis hermanas y mis primos, por su afecto, su ánimo y la alegría que me ofrecieron en todo momento.

Manuel Andrés Mejía Morales

DEDICATORIA

A mi madre Teresa, quien ha sido mi pilar más firme a lo largo de mi formación académica y en mi vida personal. Su apoyo incondicional, su fortaleza frente a cada adversidad y sus palabras de aliento, incluso en los momentos más difíciles, me impulsaron a seguir adelante.

A mi tía Luz, quien también me inculcó buenos valores y a saber valorar todo en esta vida, porque nada es gratis, las cuales aplique en mi vida cotidiana, ganándome así el respeto y la confianza de todos.

A mi padre Ángel, quien a pesar de la distancia, siempre mostró interés y apoyo en el transcurso de mi vida, con sus consejos sinceros y su forma directa de ver la vida me ayudaron a crecer con responsabilidad tanto en lo personal como en lo académico.

A mi hermano y a mis primos, por el apoyo constante y por afrontar juntos cada adversidad, sabiendo siempre apoyarnos sin esperar nada a cambio, también por esa cercanía que siempre mantuvimos, la cual fue un impulso muy valioso en este camino.

Byron Xavier Guillin Morales

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, deseo expresar agradecimiento a mi familia, en especial a mi madre Blanca y a mi padre Manuel. Su apoyo incondicional ha sido la luz que ha iluminado mi camino en los momentos más difíciles, lo que me ha permitido avanzar en cada etapa de mi formación académica. Reconozco con gratitud los innumerables sacrificios que han realizado para brindarme las oportunidades que hoy me permiten alcanzar mis metas. Gracias por ser mi soporte, por sus consejos llenos de sabiduría y por infundirme la fuerza y la motivación necesarias para superar cada desafío. Este logro es tan suyo como mío, y es un reflejo de la educación y la dedicación que siempre me han inculcado.

Agradezco a mi tutor de tesis, por su guía experta, paciencia y dedicación a lo largo de todo el proceso. Su apoyo profesional y sus valiosas observaciones fueron fundamentales para el desarrollo y la culminación exitosa de este trabajo. Más allá de lo académico, valoro profundamente el respeto y la consideración con los que siempre se dirigió, creando un ambiente de confianza y motivación que enriqueció mi aprendizaje y crecimiento personal.

Manuel Andrés Mejía Morales

AGRADECIMIENTO

En primer lugar agradezco a mi madre, por todo su esfuerzo y sus innumerables sacrificios que me permitieron avanzar con firmeza en este camino académico. Su cariño y dedicación diaria fueron el motor que me impulsó a seguir adelante y cumplir cada una de mis metas, a mi tía por compartir junto a mi madre la responsabilidad de formarnos con principios y disciplina. También a toda mi familia, por cada momento compartido y su apoyo incondicional en cada circunstancia de la vida, un sincero agradecimiento.

Agradezco de manera especial a mi tutor de tesis, por su constante apoyo académico y disposición para orientarnos en cada etapa, con sus correcciones acertadas las cuales fueron fundamentales para mejorar y avanzar con claridad. Logrando llegar a esta instancia tan anhelada. Gracias por su guía y todos sus consejos.

Byron Xavier Guillin Morales

RESUMEN

Este proyecto, titulado "Análisis Técnico de un Sistema de Bombeo para la Generación de Energía en la Pico Central Hidráulica Instalada en la Universidad Politécnica Salesiana, Campus Paute", se enfoca en el diseño de un sistema de bombeo para mejorar el funcionamiento de la pico central hidráulica.

Primero, se analizan las características hidráulicas y mecánicas del sistema para determinar el caudal y la presión necesarios. Con esta información, se diseña el sistema de bombeo considerando las condiciones técnicas, ambientales y económicas.

El diseño se valida mediante cálculos, asegurando su funcionalidad. Además, se realiza un análisis técnico y económico para evaluar su viabilidad y los beneficios que aportaría a la pico central hidráulica.

El proyecto busca aprovechar recursos locales para mejorar la generación de energía de forma sostenible.

Palabras clave: Sistema de bombeo, Pico central hidráulica, Generación de energía, Caudal, Presión, Diseño técnico, Análisis técnico-económico, Sostenibilidad.

ÍNDICE

1	PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO	2
1.1	Antecedentes	2
1.2	Justificación	4
1.3	Objetivos	5
1.3.1	Objetivo General	5
1.3.2	Objetivos Específicos	5
1.4	Ubicación del Proyecto de la Pico Central	5
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE BOMBEO HIDRÁULICO Y GENERACIÓN FOTOVOLTAICA	7
2.1	Sistema de almacenamiento hidroeléctrico por bombeo (PHS)	7
2.2	Clasificación de los sistemas de almacenamiento hidroeléctrico por bombeo según la Ubicación de los Reservorios	8
2.2.1	Centrales de almacenamiento por bombeo convencionales	8
2.2.2	Centrales de almacenamiento por bombeo subterráneas	8
2.2.3	Centrales de almacenamiento por bombeo con Agua de Mar	9
2.2.4	Uso de Energías Renovables para Alimentar el Sistema de Bombeo en una Central Hidroeléctrica Reversible	10
2.3	Servicios complementarios de las centrales por almacenamiento por bombeo	10
2.3.1	Regulación de Frecuencia	10
2.3.2	Balance de Carga	10
2.3.3	Reservas de Emergencia	11
2.3.4	Servicios de Voltaje	11
2.4	Dimensionamiento del sistema de bombeo	11
2.4.1	Cálculo del caudal	11
2.4.2	Cálculo de la Potencia de la Bomba para el Sistema de Bombeo	12
2.5	Dimensionamiento del Reservorio Inferior	15
2.6	Energía Renovable	16
2.7	Tipos de Energías Renovables	16
2.7.1	Energía Hidráulica	17
2.7.2	Energía Solar	17

2.8	Radiación Solar	18
2.9	Producción de Electricidad a partir de la Energía Solar fotovoltaico por radiación	19
2.9.1	Partes del sistema fotovoltaico	19
2.9.2	Partes que conforman el panel solar	20
2.9.3	Tipos de celdas solares	21
2.9.4	Radiación solar en Ecuador	22
2.10	Dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico	23
2.10.1	Diseño de la estructura para los paneles fotovoltaicos	25
2.10.1.1	Dimensiones de la Estructura	25
3	DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE BOMBEO Y EL SISTEMA FOTOVOLTAICO	27
3.1	Sistema de Bombeo	27
3.1.1	Cálculo del caudal de agua	27
3.1.2	Resolución de los cálculos de la potencia de la bomba hidráulica	28
3.2	Dimensionamiento del Reservorio Inferior	32
3.3	Cálculo para el dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico . . .	35
3.3.1	Revisión de las horas solar pico del sistema	35
3.3.2	Dimensionamiento del sistema	36
3.3.3	Dimensiones de la Estructura	40
3.3.4	Ubicación de la estructura fotovoltaica	42
4	ANÁLISIS DE RESULTADOS	44
4.1	Introducción	44
4.2	Validación del sistema de bombeo	44
4.3	Análisis de Escenarios para la Implementación del Sistema de Bombeo	51
4.3.1	Implementación de un Reservorio de Captación en una Ubicación Estratégica en Altura para el Máximo Aprovechamiento del Caudal de Salida en la Pico Central Hidráulica	51
4.3.2	Diseño de un Sistema de Bombeo con Reservorio de Almace- namiento para la Reducción del Caudal de Operación	54
4.3.3	Análisis de eficiencia	57
4.3.4	Sostenibilidad Ambiental	58
4.3.5	Evaluación Comparativa del Desempeño de una Picocentral con y sin Bombeo: Ventajas y Desventajas	59
4.4	Análisis Técnico	60
4.4.1	Enfoque en la Norma ISO 9001	60
4.4.2	Enfoque en recurso hídrico	61

4.4.3	Pruebas con carga al Generador	63
4.5	Análisis Económico	66
4.5.1	Costos de construcción	66
4.5.2	Costo de Mantenimiento	68
4.5.3	Calculo de retribución de acuerdo a lo generado	69
5	Conclusiones y recomendaciones	72
5.1	Conclusiones	72
5.2	Recomendaciones	73
	Anexos	75

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1	Ubicación del Proyecto de la Pico Central [?].	6
2.1	Centrales reversibles [?].	7
2.2	Centrales PHS Convencionales [?].	8
2.3	Centrales PHS Subterráneas [?].	9
2.4	Centrales PHS con Agua de Mar [?].	9
2.5	Ejemplos de Energías Renovables [?].	16
2.6	Central Hidroeléctrica Manduriacu [?].	17
2.7	Planta Fotovoltaica en la isla Isabela [?].	18
2.8	Tipos de radiación solar (Autor).	18
2.9	Esquema de intalación fotovoltaica (Autor).	20
2.10	Partes de un panel solar [?].	21
2.11	Tipos de celdas solares [?].	22
2.12	Irradiación normal directa del Ecuador [?].	22
3.1	Diagrama del sistema de bombeo (AutoCAD).	28
3.2	Característica de funcionamiento de la bomba [?].	31
3.3	Dimensiones del reservorio de vista frontal (AutoCAD).	33
3.4	Dimensiones del reservorio de vista superior (AutoCAD).	34
3.5	Características técnicas del panel solar [?].	36
3.6	Características técnicas del inversor [?].	38
3.7	Características técnicas del controlador [?].	39
3.8	Características técnicas de las baterías [?].	40
3.9	Diseño en 2D de una estructura fotovoltaica fija, con dimensiones claramente acotadas de ancho y profundidad (AutoCAD).	40
3.10	Diseño en 3D de una estructura fotovoltaica fija (AutoCAD).	41
3.11	Diseño de estructura fotovoltaica fija con vistas frontal, posterior y lateral, que incluye dimensiones detalladas (AutoCAD).	42
3.12	Ubicación para la estructura fotovoltaica (Autor).	43
4.1	Parámetros de entrada.	45
4.2	Tubería de succión.	45
4.3	Tubería de descarga.	46

4.4	Parámetros de salida.	46
4.5	Simulación en el software Aspen HYSYS.	47
4.6	Resultados.	47
4.7	Representación de componentes - etapa preliminar.	47
4.8	Datos de entrada en el reservorio.	48
4.9	Datos de entrada en la tubería en el primer tramo.	48
4.10	Datos de entrada en la bomba.	49
4.11	Datos de la curva característica de operación de la bomba.	49
4.12	Datos de entrada en la tubería en el segundo tramo.	50
4.13	Datos de entrada en la punto de descarga.	50
4.14	Simulación en el software EPANET.	51
4.15	Primer escenario del sistema de bombeo (AutoCAD).	52
4.16	Segundo escenario del sistema de bombeo (AutoCAD).	55
4.17	Flujograma del Proceso Técnico de Implementación y Evaluación conforme la normativa ISO 9001 (Autor).	60
4.18	Levantamiento de la laguna (Autor).	61
5.1	Imágenes de las mediciones de caudal de agua.	75
5.2	Imágenes de la instalación de la tubería.	76
5.3	Imágenes del proceso de medición realizado con carga al generador.	77

Índice de tablas

3.1	Tiempo de llenado del recipiente (Autor).	27
3.2	Valores de K en la línea de succión (Autor).	30
3.3	Valores de K en la línea de descarga (Autor).	30
3.4	Listado de Accesorios de Reservorio (Autor).	34
3.5	Irradiación Global en Paute, Azuay 2023 para diferentes ángulos (PVGIS).	35
4.1	Tiempo de llenado del recipiente (Autor).	52
4.2	Datos de entrada (Autor).	53
4.3	Valores de K en la línea de succión (Autor).	53
4.4	Valores de K en la línea de descarga (Autor).	53
4.5	Resultados (Autor).	54
4.6	Datos de entrada (Autor).	55
4.7	Valores de K en la línea de succión (Autor).	56
4.8	Valores de K en la línea de descarga (Autor).	56
4.9	Resultados (Autor).	56
4.10	Dimensiones del reservorio de almacenamiento (Autor).	57
4.11	Eficiencia del sistema de bombeo (Autor).	57
4.12	Relación energía generada y energía consumida (Autor).	58
4.13	Comparación técnica entre pico central con sistema de bombeo fotovoltaico y sin sistema de bombeo (Autor).	59
4.14	Tipos de Cargas y Consumo de Energía (Autor)	63
4.15	Mediciones en Vacío (Autor)	64
4.16	Mediciones con una carga de 1200 W y con 9 vueltas a la válvula (Autor).	64
4.17	Mediciones con diferentes cargas y con 9 vueltas a la válvula (Autor).	65
4.18	Mediciones con diferentes cargas sumando 2800 W y con 18 vueltas a la válvula (Autor).	65
4.19	Mediciones con diferentes cargas sumando 4000 W y con 27 vueltas a la válvula (Autor).	65
4.20	Mediciones con diferentes cargas sumando 5200 W y con 27 vueltas a la válvula (Autor).	66

4.21 Mediciones con diferentes cargas sumando 5200 W y con 36 vueltas a la válvula (Autor).	66
4.22 Sistema de bombeo (Autor).	67
4.23 Sistema fotovoltaico (Autor).	67
4.24 Estructura paneles solares (Autor).	67
4.25 Reservorio 6,36 m^3 (Autor).	68
4.26 Análisis de mantenimiento anual (Autor).	68
4.27 Análisis de mantenimiento cada 10 años (Autor).	69
4.28 Flujo de Beneficio y Costo (Autor).	71
5.1 Áreas del Trabajo de Grado	82

INTRODUCCIÓN

Esta tesis trata sobre el análisis técnico de un sistema de bombeo para la generación de energía en la pico central hidráulica instalada en la Universidad Politécnica Salesiana, Campus Paute. El objetivo principal de este trabajo es diseñar un sistema de bombeo que permita aprovechar los recursos hídricos locales para generar energía renovable de forma constante, reduciendo la dependencia de fuentes externas y los costos de suministro eléctrico. La implementación de este sistema es clave para asegurar un funcionamiento continuo de la pico central hidráulica, especialmente en períodos de baja demanda de agua. Además, este sistema contribuirá con la iluminación de las áreas verdes del campus, proporcionando un suministro energético más confiable. Este proyecto se basa en estudios previos que incluyen el diseño de una micro central hidroeléctrica de almacenamiento por bombeo y un análisis técnico-económico del recurso hídrico. Estos antecedentes refuerzan la viabilidad y relevancia de la propuesta actual para la generación de energía renovable en pequeña escala. El documento está estructurado en cinco capítulos:

Capítulo 1: Planificación del Proyecto

Capítulo 2: Fundamentos sobre sistemas de almacenamiento por bombeo, sistemas fotovoltaicos y ecuaciones.

Capítulo 3: Cálculos para la selección de la bomba y determinación de las pérdidas del sistema, dimensionamiento del sistema fotovoltaico.

Capítulo 4: Validación del sistema de bombeo mediante simulaciones, análisis técnico-económico y sostenibilidad.

Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO 1

PLANTEAMIENTO DEL PROYECTO

1.1 Antecedentes

En la actualidad la creciente demanda de energía, impulsada por el aumento de la población y el desarrollo económico, ha generado una fuerte presión sobre los recursos hídricos. En el cantón Paute, muchas comunidades rurales enfrentan la escasez de agua y la falta de acceso a redes eléctricas convencionales. Las pico centrales hidráulicas representan una solución sostenible al aprovechar pequeños cuerpos de agua para generar electricidad. Sin embargo, la variabilidad en la disponibilidad de agua, afectada por factores estacionales y climáticos, puede limitar su operación continua. Un sistema de bombeo asegurará un suministro constante de agua hacia la turbina, lo que permitirá una generación de energía más estable, al tiempo que promueve un uso responsable de los recursos hídricos en la zona.

Las primeras instalaciones de almacenamiento por bombeo hidroeléctrico (PHES) se localizaron en las zonas alpinas de Suiza y Austria, donde la geografía y la disponibilidad de recursos hídricos eran propicias para este tipo de tecnología [?].

Estas primeras plantas PHES, que eran gestionadas por empresas estatales de servicios públicos, se establecieron para proporcionar energía en momentos de alta demanda. Esto permitió que las plantas de energía de base operaran de manera más eficiente, asegurando el equilibrio del sistema, la estabilidad de la frecuencia y facilitando los arranques en condiciones de apagón. Entre la década de 1960 y finales de la década de 1980, se produjo un desarrollo notable de estas instalaciones, impulsado principalmente por la expansión de la energía nuclear, cuya elevada inercia era equilibrada por la flexibilidad que ofrecían las plantas PHES [?].

Los ingenieros responsables del diseño de turbinas-bombas para el esquema con-

vencional Yang Yang, implementado en 2006 en Corea, optaron por un sistema de bombeo de dos etapas con el fin de incrementar la eficiencia y optimizar el rendimiento dinámico [?].

La norma ISO 50001 [?] proporciona un esquema para la gestión de la energía en diversas organizaciones, incluidas las centrales hidroeléctricas. Su finalidad es facilitar la mejora de la eficiencia energética, lo que conlleva una reducción en el consumo de energía y en los costos operativos, al tiempo que se busca disminuir el impacto ambiental. Esta norma aboga por un enfoque organizado para gestionar la energía, que abarca desde la planificación hasta el seguimiento de los resultados y la mejora continua de los procesos. Al adoptar esta norma, las centrales hidroeléctricas pueden mejorar su funcionamiento, cumplir con las normativas ambientales y contribuir al desarrollo sostenible.

La Central Hidroeléctrica Yanbaru [?], construida en 1997 en Okinawa, Japón, es un ejemplo destacado de central de bombeo que combina la generación de electricidad con una gestión eficiente del agua, con una capacidad de 30 megavatios. Funciona con dos embalses: uno superior que tiene una capacidad de 564,000 m³ y el océano Pacífico, que actúa como el embalse inferior. Durante períodos de baja demanda eléctrica, se utiliza la energía de fuentes renovables para bombear agua del embalse superior hacia el océano, almacenando así energía en forma de agua elevada y ayudando a equilibrar el sistema eléctrico. Aunque la central operó de manera efectiva hasta 2010, en 2014 se decidió cerrarla debido a la baja demanda de electricidad en la isla. A pesar de su potencial, la falta de necesidad de generación de energía llevó a esta decisión. Este sistema de bombeo y generación muestra cómo la tecnología puede ser utilizada en la producción de energía de manera sostenible.

La Central Hidroeléctrica Salto de Chira [?], ubicada en España, utiliza tecnología de bombeo y consta de dos embalses: el embalse superior, que tiene una capacidad de 5.64 hm³, y el embalse de Soria, que actúa como embalse inferior con una capacidad de 32.3 hm³. Esta central tiene una capacidad de generación de 200 MW y satisface el 36 % de la demanda eléctrica de la isla durante las horas de mayor consumo. Además, el desnivel entre ambos embalses es de 310 metros, lo que permite una eficiente generación de energía a través del sistema de bombeo.

En 2022, se propone el diseño de un sistema de micro central hidroeléctrica de almacenamiento por bombeo que generará menos de 5 kW de energía eléctrica [?], promoviendo nuevas alternativas para la generación de energía. Este tipo de instalación utiliza el agua como recurso renovable, reduce la dependencia de fuentes fósiles.

Además, tiene un impacto ambiental menor que las grandes plantas hidroeléctricas, ya que requiere menos espacio y se integra mejor en el entorno natural, lo que ayuda a conservar la biodiversidad.

Un estudio de 2023 analizó la posibilidad de adaptar la central hidroeléctrica de pasada Los Molles en una central de bombeo [?], aprovechando el uso de la infraestructura existente. Esta adaptación permitiría que la planta funcione tanto en su modo tradicional, generando electricidad al aprovechar los caudales disponibles, como en modo de bombeo cuando las necesidades del sistema eléctrico lo requieran. El estudio también evalúa diferentes opciones de equipos de generación, incluyendo turbinas reversibles y no reversibles, junto con las estaciones o equipos necesarios para el bombeo.

En un proyecto realizado en la Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, se plantea el diseño y modelado de una pico central hidráulica de 5 kW para el Campus Paute [?]. Además, en 2023, se realizó un análisis técnico-económico del recurso hídrico aplicado a esta pico central [?]. Este análisis recopiló información sobre el caudal y el volumen del embalse, cuantificó la capacidad de generación de energía y evaluó el costo de la energía producida.

1.2 Justificación

Este proyecto se enfoca en el diseño de un sistema de bombeo para la pico central hidráulica instalada en la Universidad Politécnica Salesiana Campus Paute, que permitirá aprovechar los recursos hídricos locales para generar energía renovable en pequeña escala. La iniciativa busca beneficiar a la comunidad mediante una fuente de energía limpia y constante, que ayude a reducir la dependencia de fuentes externas y el costo del suministro eléctrico, promoviendo además un modelo de desarrollo sostenible. La implementación de una pico central hidráulica con bombeo es fundamental para asegurar el uso adecuado del agua de la laguna que se encuentra en la Unidad Educativa Agronómico Salesiano, permitiendo que la central mantenga su funcionamiento aún en períodos de baja demanda de agua. De esta forma, el sistema podrá abastecer el sistema de iluminación de las áreas verdes de la institución educativa.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un sistema de bombeo que convierta la pico central hidráulica instalada en la Universidad Politécnica Salesiana Campus Paute en una pico central de bombeo, asegurando un suministro continuo de agua hacia la turbina para garantizar la producción de energía eléctrica.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Realizar un análisis de las características hidráulicas y mecánicas del sistema de la pico central hidráulica instalada en la zona, determinando el caudal y la presión necesarios para el sistema de bombeo.
2. Diseñar el sistema de bombeo para la pico central hidráulica, considerando los requerimientos técnicos, las condiciones ambientales del entorno y los aspectos técnicos y económicos que influyen en su viabilidad.
3. Validar el funcionamiento del sistema de bombeo mediante simulaciones.
4. Realizar un análisis técnico-económico del sistema de bombeo diseñado, evaluando la factibilidad y los beneficios de su implementación en el entorno de la pico central hidráulica.

1.4 Ubicación del Proyecto de la Pico Central

El proyecto está situado en el cantón Paute, ubicado en la provincia del Azuay, en la región austral del Ecuador. Con una altitud de aproximadamente 2300 metros sobre el nivel del mar, al encontrarse su zona urbana en un valle mantiene una temperatura que oscila entre los 16° y 20° C. El cantón Paute tiene una buena cobertura de sistema hídrico proveniente de quebradas y caudes de agua mayores, en este lugar se encuentra un reservorio de agua que se utiliza para diversos fines que benefician directamente a la Unidad Educativa Agronómico Salesiano. Se planea aprovechar el agua de este reservorio para accionar una turbina, la cual se encuentra

a aproximadamente 85 metros de distancia entre el reservorio y la instalación donde se ubican la turbina y el generador eléctrico.

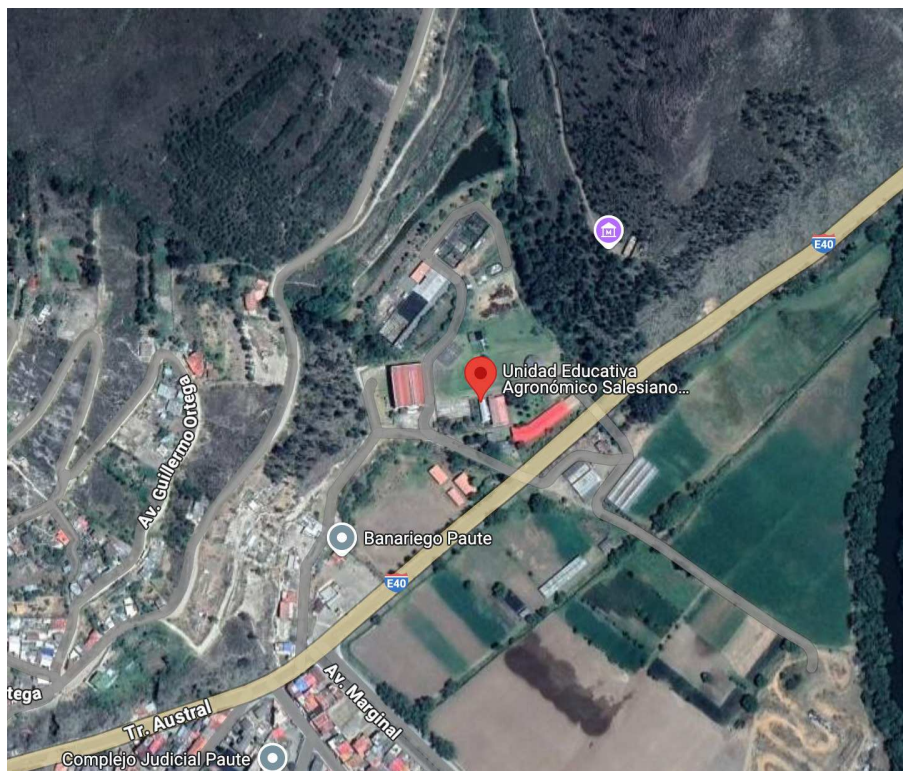


Figura 1.1: Ubicación del Proyecto de la Pico Central [?].

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS DE BOMBEO HIDRÁULICO Y GENERACIÓN FOTOVOLTAICA

2.1 Sistema de almacenamiento hidroeléctrico por bombeo (PHS)

El Sistema (PHS) es una metodología de generación hidroeléctrica que integra estanques de almacenamiento ubicados aguas arriba y abajo de las turbinas. Este enfoque permite un ciclo de recirculación del agua, facilitado por bombas que elevan el agua al estanque superior. Se presenta como una alternativa efectiva de almacenamiento energético al captar excedentes de energía durante períodos de baja demanda y precios reducidos. Posteriormente, el agua almacenada se libera en períodos de alta demanda y precios elevados, optimizando la producción energética y contribuyendo a la estabilidad del sistema eléctrico [?].

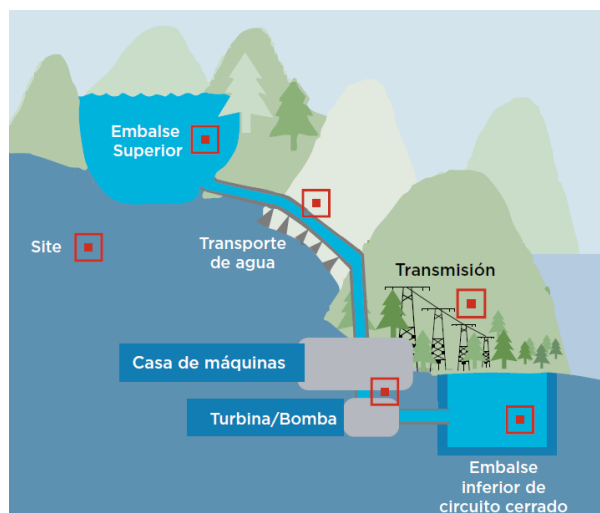


Figura 2.1: Centrales reversibles [?].

2.2 Clasificación de los sistemas de almacenamiento hidroeléctrico por bombeo según la Ubicación de los Reservorios

2.2.1 Centrales de almacenamiento por bombeo convencionales

En este tipo de instalaciones, los reservorios, tanto el inferior como el superior, se sitúan en la superficie del terreno. Estos reservorios pueden formarse a partir de un lago o un cauce natural presente en la región del proyecto, o bien, a través de la construcción de una presa que genere un embalse artificial. Este embalse permite la acumulación de agua, lo que facilita los ciclos de bombeo y generación requeridos. Además, el cuarto de máquinas y el circuito hidráulico pueden ubicarse por encima o por debajo de la superficie terrestre [?].

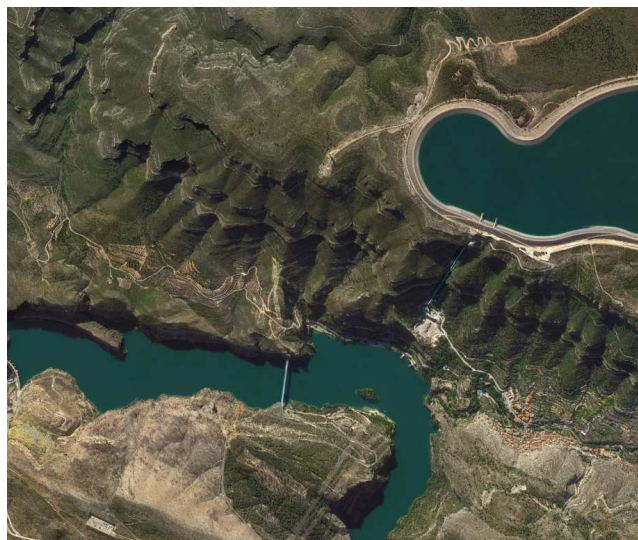


Figura 2.2: Centrales PHS Convencionales [?].

2.2.2 Centrales de almacenamiento por bombeo subterráneas

En este tipo de instalaciones, el reservorio inferior se localiza en un sistema de cavidades excavadas en el subsuelo o en un acuífero subterráneo. Por otro lado, el reservorio superior se sitúa en la superficie terrestre y puede ser construido de manera similar a como se realiza en las centrales PHS convencionales. En este caso, la casa de máquinas y el circuito hidráulico deben estar ubicados bajo la superficie del terreno [?].



Figura 2.3: Centrales PHS Subterráneas [?].

2.2.3 Centrales de almacenamiento por bombeo con Agua de Mar

Las centrales PHS con agua de mar son un tipo innovador de sistema de almacenamiento por bombeo que utiliza el océano como reservorio inferior. Este enfoque permite la conversión de energía potencial en energía eléctrica, aprovechando las variaciones en la demanda energética. Durante períodos de baja demanda, el sistema bombea agua desde el océano hacia un reservorio superior, utilizando energía excedente o de menor costo [?].



Figura 2.4: Centrales PHS con Agua de Mar [?].

2.2.4 Uso de Energías Renovables para Alimentar el Sistema de Bombeo en una Central Hidroeléctrica Reversible

Con el objetivo de reducir los costos de operación, se elige el uso de fuentes de energía renovable para alimentar el sistema de bombeo. Una de las opciones más utilizadas es el sistema solar fotovoltaico. Un ejemplo de esto es el Proyecto Espejo de Tarapacá, una central reversible de 300 MW ubicada a unos 100 km al sur de Iquique, que funciona con agua de mar. Este proyecto aprovecha la energía solar para bombear agua a un embalse durante las horas de baja demanda eléctrica, y luego utiliza esa agua para generar electricidad cuando la demanda es más alta. De esta manera, se almacena energía durante el día y se libera cuando más se necesita.

2.3 Servicios complementarios de las centrales por almacenamiento por bombeo

Las Centrales de Almacenamiento por Bombeo (PHS) va más allá de su función básica de almacenar y liberar energía. Estas centrales con este tipo de sistema proporciona una variedad de servicios adicionales que son esenciales para el funcionamiento óptimo de las redes eléctricas. Entre estos servicios se incluyen:

2.3.1 Regulación de Frecuencia

El sistema de almacenamiento por bombeo puede ajustar la generación de energía de manera dinámica para mantener la frecuencia de la red dentro de parámetros predefinidos. Esta función es esencial para la estabilidad del sistema eléctrico, ya que pequeñas variaciones pueden afectar el rendimiento de los dispositivos [?].

2.3.2 Balance de Carga

En momentos de alta demanda, el sistema de almacenamiento por bombeo puede liberar la energía que ha acumulado, contribuyendo a equilibrar la oferta y la demanda en tiempo real. Esta capacidad es clave en redes con muchas fuentes renovables intermitentes, como solar y eólica [?].

2.3.3 Reservas de Emergencia

Estos sistemas pueden funcionar como reservas rápidas, ofreciendo energía adicional en caso de emergencias o fallos en la red. Esto contribuye a aumentar la resiliencia del sistema eléctrico [?].

2.3.4 Servicios de Voltaje

Puede ayudar a regular el voltaje en la red, garantizando que se mantenga dentro de los niveles óptimos para el correcto funcionamiento de los dispositivos eléctricos [?].

2.4 Dimensionamiento del sistema de bombeo

2.4.1 Cálculo del caudal

Para determinar el caudal de salida de la pico central de generación hidráulica se utilizará el método volumétrico, una técnica que permite calcular la cantidad de agua que circula en un cierto periodo de tiempo. Este procedimiento es ideal en casos donde el flujo de agua puede ser recolectado, como en tuberías, canales o puntos de descarga accesibles. Consiste en llenar un recipiente de volumen conocido, como un tanque o balde, y medir el tiempo que tarda en llenarse. Con esos datos, se obtiene el caudal dividiendo el volumen acumulado entre el tiempo registrado.

$$Q = \frac{V}{t} \quad (2.1)$$

Donde:

V : Volumen del recipiente [m^3]

Q: Caudal de agua [$\frac{m^3}{s}$]

t : tiempo de llenado del recipiente [seg]

2.4.2 Cálculo de la Potencia de la Bomba para el Sistema de Bombeo

Para determinar el diámetro de la tubería en el sistema de bombeo, se considera el caudal y la velocidad del flujo. Para este cálculo, se utiliza la siguiente ecuación:

$$D = \sqrt{\frac{4 * Q}{\pi * v}} \quad (2.2)$$

Donde:

D: Diámetro de la tubería [mm]

Q: Caudal de agua [$\frac{m^3}{s}$]

v: Velocidad del fluido en la tubería [m/s, ft/s]

Para el cálculo de la potencia de la bomba hidráulica adecuada para el sistema de bombeo partimos de la ecuación de Bernoulli:

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + h_A = \frac{P_3}{\gamma} + Z_3 + \frac{V_3^2}{2g} + h_T \quad (2.3)$$

Donde:

P_1 y P_3 : Presiones atmosféricas [Pa]

γ : Peso específico del fluido [$\frac{lb}{ft^3}$]

g: Gravedad [$\frac{m}{s^2}$, $\frac{ft}{s^2}$]

Z_1 y Z_3 : Altura de referencia del líquido en reservorio superior e inferior [m, in, ft]

V_1 y V_3 : Velocidad del fluido en la carga y descarga [$\frac{m}{s}$, $\frac{ft}{s}$]

h_a : Altura dinámica total que necesita la bomba para el fluido [m]

h_T : Pérdidas por tubería y accesorios [m]

Para determinar el tipo de flujo usamos el numero de Reynolds, mediante la siguiente ecuación:

$$N_R = \frac{\rho * V * D}{\mu} \quad (2.4)$$

Donde:

N_R : Número de Reynolds

ρ : Densidad del fluido en $[\frac{Kg}{m^3}]$

V : Velocidad media del fluido en [m/s]

D : Diámetro interno de la tubería [m]

μ : Viscosidad dinámica del fluido en [Pa*s]

Para la velocidad media utilizamos la ecuación de la física:

$$V = \sqrt{2 * g * H} \quad (2.5)$$

Donde:

V : Velocidad.

g : Gravedad.

H : Altura.

Para calcular las pérdidas por longitud de la tubería, es necesario calcular el coeficiente de fricción mediante la ecuación de Swamee:

$$f = \frac{0.25}{(\log(\frac{1}{3.7 * \frac{d}{\epsilon}}) + (\frac{5.74}{N_R(0.9)}))^2} \quad (2.6)$$

Donde:

f : Coeficiente de fricción

N_R : Número de Reynolds

D: Diámetro de la tubería

ϵ : Rugosidad

Definimos la ecuación de Darcy-Weisbach para las pérdidas de energía en tuberías:

$$h_{tuberia} = f \frac{l}{d} \frac{v^2}{2g} \quad (2.7)$$

El sistema consta de accesorios lo cual genera pérdidas de energía, para calcular estas perdidas usamos la siguiente ecuación:

$$h_{accesorios} = K \frac{v^2}{2g} \quad (2.8)$$

Donde:

f: Factor de fricción [adimensional]

l: Longitud de la tubería [m]

d: Diámetro de la tubería [m]

g: Aceleración de la gravedad [$\frac{m}{s^2}$]

k: Coeficiente de accesorios [adimensional]

v: Velocidad del fluido en la tubería [m/s, ft/s]

Para calcular la altura dinámica total definimos un punto de referencia en el sistema de bombeo y eliminamos variables de la ecuación de Bernoulli (2.2), eliminamos la variable P1 y P2 ya que estos dos puntos se encuentran bajo presión atmosférica, de igual forma la velocidad en el punto 1 (V1) es igual a la velocidad en el Punto 2 (V3), por lo que nos queda la siguiente ecuación:

$$h_A = (Z_3 - Z_1) + h_T \quad (2.9)$$

Perdidas por tubería y accesorios:

$$h_T = f \frac{L}{D} \frac{v_2^2}{2g} + \Sigma K_c \frac{v_2^2}{2g} + K_v \frac{v_2^2}{2g} \quad (2.10)$$

$$h_T = \frac{v_2^2}{2g} \left[f \frac{L}{d} + \Sigma(K_c + K_v) \right] \quad (2.11)$$

Potencia de la bomba:

$$P_B = \frac{\gamma * h_A * Q}{n_B} \quad (2.12)$$

n_B : Eficiencia de la bomba.

2.5 Dimensionamiento del Reservorio Inferior

Al diseñar el reservorio de captación, hay que tener en cuenta que este reservorio no estará destinado a almacenar agua, sino que su función principal es recibir el caudal de agua y dejar que fluya de forma continua hacia el sistema de bombeo. Por eso, el tamaño del reservorio debe ser suficiente para manejar el agua que llega sin que se acumule ni se desborde. También es fundamental que el nivel del agua se mantenga estable, lo que significa que la cantidad de agua que entra debe ser igual a la que sale. Además, las dimensiones del reservorio deben garantizar un funcionamiento seguro y sin pérdidas innecesarias, como por evaporación o filtraciones.

Aunque el reservorio no almacena agua, es importante considerar un tiempo mínimo de retención, que corresponde al periodo durante el cual el agua permanece en el reservorio, para esto usaremos la ecuación (2.1) presentada anteriormente.

Se dimensionará un reservorio cúbico, ya que se requiere dimensiones reducidas, se establecerá la altura y se calculará el largo y ancho.

$$V = L * A * h \quad (2.13)$$

Donde:

V : volumen del reservorio [m^3]

L : Largo del reservorio [m]

A : Ancho del reservorio [m]

h : Altura del reservorio [m]

Considerando que el largo y el ancho tienen la misma medida, se obtiene la siguiente ecuación.

$$L = A = \sqrt{\frac{V}{h}} \quad (2.14)$$

2.6 Energía Renovable

La energía renovable, frecuentemente referida como energía alternativa, se origina de recursos naturales que no se agotan a medida que se utilizan. Las principales fuentes de energía renovable incluyen la solar, eólica, mareomotriz, que proviene de las olas del mar, y la biomasa, que utiliza materia orgánica para generar energía. Estas fuentes son valiosas no solo por su capacidad de regenerarse naturalmente con el tiempo, sino también por su potencial para reducir la dependencia de combustibles fósiles. Además, tienen un bajo impacto ambiental, ya que no contribuyen significativamente a la contaminación ni al cambio climático [?].



Figura 2.5: Ejemplos de Energías Renovables [?].

2.7 Tipos de Energías Renovables

A lo largo del tiempo, se han desarrollado diversas energías renovables, cada una con características específicas que las hacen adecuadas para diferentes propósitos. Estas fuentes de energía son esenciales para avanzar hacia una matriz energética más

sostenible, ya que contribuyen a los objetivos mundiales de disminución de emisiones y protección del medio ambiente.

2.7.1 Energía Hidráulica

La energía hidráulica utiliza el flujo del agua, especialmente en ríos y embalses, para generar electricidad mediante turbinas hidráulicas. Aprovecha la energía cinética y potencial del agua en movimiento, ya sea por descensos pronunciados o por el flujo en ríos [?].



Figura 2.6: Central Hidroeléctrica Manduriacu [?].

2.7.2 Energía Solar

La energía solar es una de las fuentes renovables más populares y se basa en la luz y el calor del sol [?]. Se clasifica en dos tipos principales:

- La energía solar fotovoltaica, que convierte la luz solar en electricidad mediante paneles solares.
- La energía solar térmica, que utiliza el calor del sol para calentar agua o generar electricidad a través de turbinas de vapor, empleando colectores térmicos que absorben y concentran el calor.



Figura 2.7: Planta Fotovoltaica en la isla Isabela [?].

2.8 Radiación Solar

La radiación solar se refiere a la energía que el sol emite y que puede impactar diversas superficies, siempre que no haya materiales que obstruyan su captación [?]. Está compuesta por ondas electromagnéticas, pero no toda la radiación solar llega a la Tierra de la misma manera, lo que da lugar a tres tipos:

- Radiación directa: Son los rayos solares que alcanzan la superficie terrestre sin impedimentos, atravesando la atmósfera.
- Radiación difusa: Se refiere a los rayos solares que se dispersan o son bloqueados por gases en la atmósfera, como las nubes.
- Radiación reflejada: Consiste en los rayos solares que rebotan tras impactar en superficies como el suelo o los techos de las edificaciones.

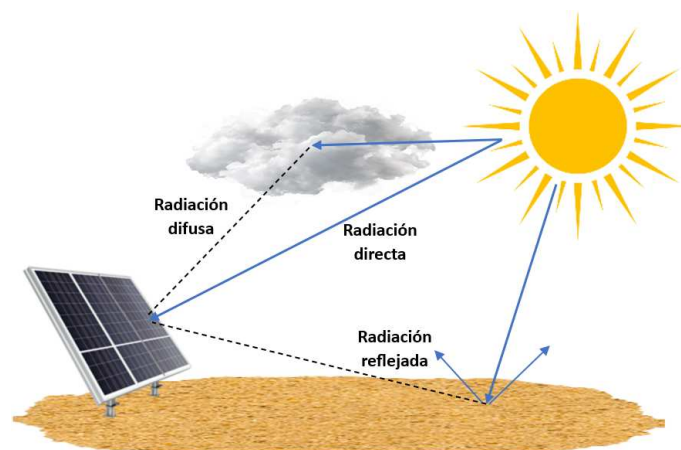


Figura 2.8: Tipos de radiación solar (Autor).

2.9 Producción de Electricidad a partir de la Energía Solar fotovoltaico por radiación

La producción de electricidad a partir de la energía solar es una alternativa sostenible en la búsqueda de fuentes renovables. Este proceso utiliza tecnologías fotovoltaicas como son las celdas solares, que convierten la luz solar en energía eléctrica mediante el efecto fotovoltaico. Estas celdas solares son fabricadas con materiales semiconductores, como el silicio, que pueden liberar electrones al ser expuestas a la luz, específicamente son unos pequeños cuadrados oscuros que están interconectados entre sí, dentro del panel solar para alcanzar un voltaje adecuado [?].

2.9.1 Partes del sistema fotovoltaico

Un sistema fotovoltaico es un conjunto de dispositivos interconectados diseñados para captar y convertir la energía solar en electricidad aprovechable. Este sistema se compone de diversos elementos, cada uno con un papel específico que contribuye al rendimiento óptimo y a la eficiencia del proceso de conversión de energía [?]. Seguidamente, se presentará un análisis detallado de los componentes fundamentales que integran un sistema fotovoltaico:

- Generador solar, integrado por un conjunto de paneles fotovoltaicos, que captura la radiación solar y la convierte en corriente continua de baja tensión (12 o 24 V).
- Acumulador, que almacena la energía generada por el sistema, permitiendo el uso de electricidad incluso durante la noche o en días nublados.
- Regulador de carga, que protege al acumulador de sobrecargas y descargas excesivas, previniendo daños irreversibles y garantizando que el sistema opere de manera óptima.
- Inversor, que convierte la corriente continua de 12 o 24 V del acumulador en corriente alterna de 230 V.

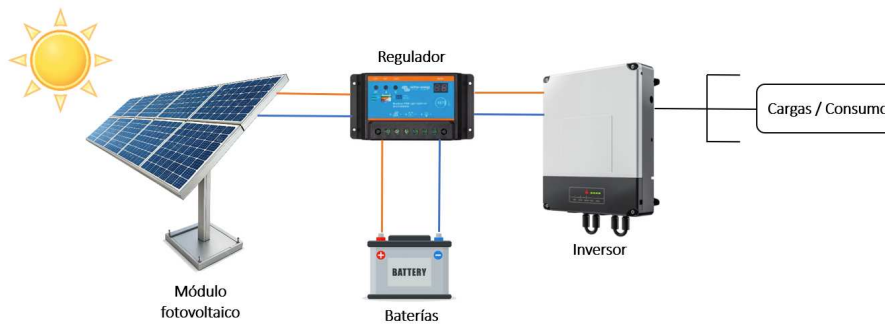


Figura 2.9: Esquema de intalación fotovoltaica (Autor).

2.9.2 Partes que conforman el panel solar

Los paneles solares constituyen elementos cruciales en el proceso de conversión de energía solar en energía eléctrica, compuestos por diversos componentes que trabajan en conjunto. Estos elementos no solo facilitan la recolección y transformación de la radiación solar, sino que también garantizan la integridad y eficiencia operativa del sistema [?]. A continuación, se describen las partes esenciales que conforman un panel solar:

- **Celdas solares:** Son componentes clave de los paneles solares, hechas de silicio, que convierten la luz solar en energía eléctrica mediante el movimiento de electrones. Múltiples células se conectan en serie para aumentar la producción energética.
- **Capa antirreflejante:** Esta delgada película se aplica sobre las células solares para minimizar la luz reflejada y maximizar la absorción de luz, mejorando así la eficiencia en la generación de energía eléctrica.
- **Marco y vidrio:** El marco proporciona soporte y estabilidad al panel, mientras que el vidrio protege las células solares de las condiciones ambientales y permite la entrada de luz solar, siendo resistente a climas severos.
- **Cables y conectores:** Son elementos eléctricos que conectan los paneles solares al sistema eléctrico de un edificio. Deben ser resistentes y capaces de manejar grandes flujos de energía, además de soportar condiciones climáticas adversas.



Figura 2.10: Partes de un panel solar [?].

2.9.3 Tipos de celdas solares

Se presentan diferentes tipos de celdas solares, cada una con características específicas que determinan su eficiencia y aplicaciones [?]. A continuación, se explican los tipos más comunes de celdas solares:

- Celdas monocristalino: Fabricadas con silicio puro, son las más eficientes, alcanzando hasta el 22 por ciento. Su costo de producción es elevado debido al complejo proceso requerido para obtener un solo cristal de silicio.
- Celdas policristalino: Estas celdas están compuestas por fragmentos de silicio que se fusionan para crear una placa. Su eficiencia es ligeramente inferior, entre el 15 y el 17 por ciento .
- Celdas de capa delgada: Utilizan materiales semiconductores como el telururo de cadmio y el seleniuro de cobre indio galio para formar películas delgadas. Éstas ofrecen mayor flexibilidad y pueden adaptarse a diversas formas y superficies.

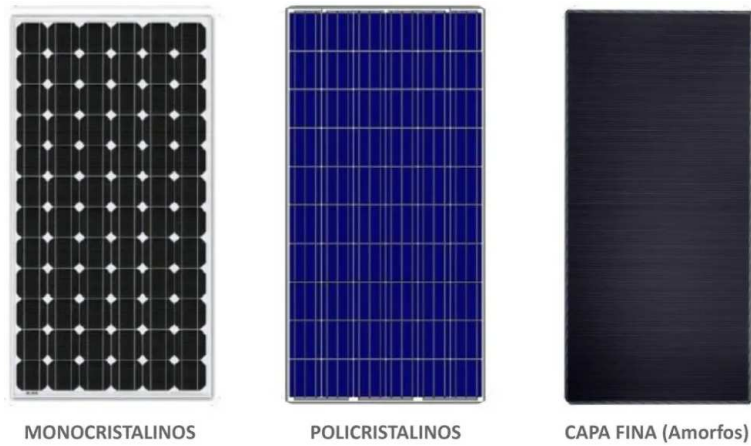


Figura 2.11: Tipos de celdas solares [?].

2.9.4 Radiación solar en Ecuador

Ecuador se encuentra en la zona ecuatorial, lo que le permite recibir una significativa cantidad de radiación solar a lo largo del año. Esta favorable ubicación geográfica proporciona un gran potencial para la producción de energía solar. Según datos del Atlas Solar Mundial, donde la radiación solar varía entre 3.0 y 4.0 kWh/m²/día.

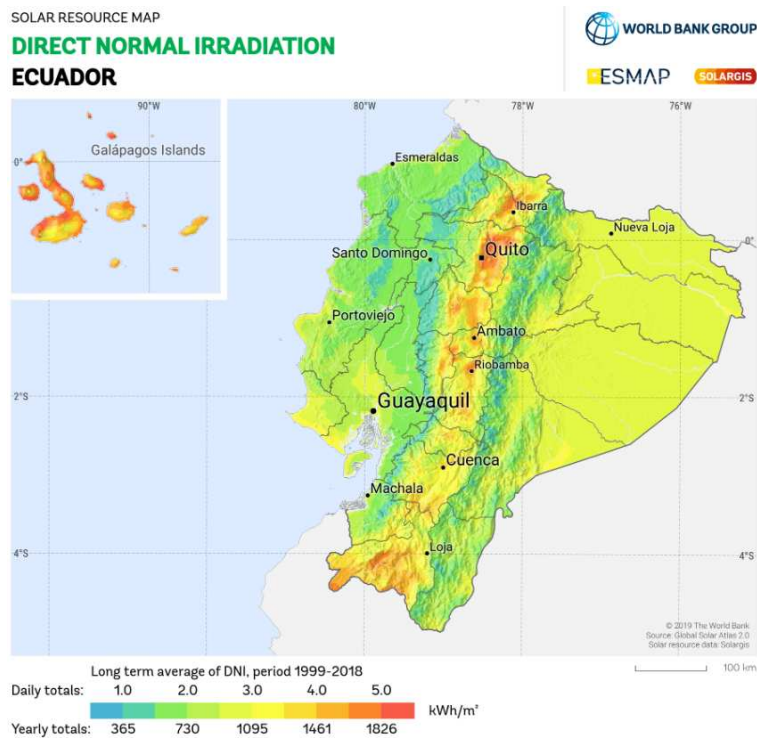


Figura 2.12: Irradiación normal directa del Ecuador [?].

2.10 Dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico

El Sistema de Bombeo será alimentado por un sistema fotovoltaico por el cual tomamos en cuenta las siguientes ecuaciones. El consumo energético del sistema, se determina la potencia en vatios (W) y el uso diario de cada dispositivo en horas, utilizando la siguiente fórmula:

$$E_{mc} = W * h \quad (2.15)$$

Donde:

E_{mc} : Consumo de energía diaria [kWh/día]

W: Potencia del equipo [W]

h: horas de operación al día

Para el cálculo del número de paneles solares requeridos en el sistema, usamos la siguiente ecuación:

$$n_{panel} = \frac{E_{mc}}{P_{panel} * \eta_{campo} * HSP} \quad (2.16)$$

Donde:

n_{panel} : Número de Paneles [unidad]

E_{mc} : Consumo de energía diaria [kWh/día]

P_{panel} : Potencia nominal del panel fotovoltaico [kW]

η_{campo} : Rendimiento del campo fotovoltaico (valor adimensional entre 0,75 y 0,85)

HSP: Radiación solar diaria promedio [$kWh/m^2/dia$]

Se realiza el cálculo de número de paneles en serie y paralelo, para esto se con-

sidera las siguientes expresiones:

$$n_{serie} = \frac{V_s}{V_{mp}} \quad (2.17)$$

Donde:

V_s : Voltaje del Sistema [V]

V_{mp} : Voltaje a máxima potencia del panel [V]

$$n_{parelelo} = \frac{n_{panel}}{n_{serie}} \quad (2.18)$$

Para el dimensionamiento del inversor se considera la siguiente expresión:

$$P_{inversor} \geq P_{demanda,maxima} \quad (2.19)$$

Para el cálculo del controlador se utiliza la siguiente ecuación.

$$I_n = I_{SC} * n_{panel} \quad (2.20)$$

Donde:

I_{sc} : Corriente de cortocircuito del panel [A]

n_{panel} : número de paneles en paralelo

Para el cálculo del dimensionamiento de las baterías se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$C_{sb} = \frac{E_{mc}}{V_{sb}E_{iv}} \quad (2.21)$$

Donde:

C_{sb} : Capacidad del sistema de baterías [Ah]

E_{mc} : Consumo total [Wh]

V_{sb} : Voltaje del sistema de baterías [V]

E_{iv} : Eficiencia del inversor

$$B_p = \frac{C_{sb} D_{aut}}{C_b M_{pd}} \quad (2.22)$$

Donde:

B_p : Baterías a ser instaladas en paralelo

C_{sb} : Capacidad del sistema de baterías [Ah]

D_{aut} : Días de autonomía

C_b : Capacidad de baterías [Ah]

M_{pd} : Profundidad de descarga [%]

2.10.1 Diseño de la estructura para los paneles fotovoltaicos

La estructura debe ser sólida y diseñada para soportar de manera eficiente el peso de los paneles solares, garantizando una alta resistencia ante diversas condiciones climáticas. Al utilizar acero galvanizado, nos ofrece una excelente durabilidad y resistencia a la corrosión, también proporciona una relación costo-beneficio favorable. Este material ayuda a minimizar la necesidad de mantenimiento y reduciendo costos a largo plazo.

2.10.1.1 Dimensiones de la Estructura

- Ancho y Profundidad

Cálculo del Ancho Total: Para la instalación de 7 paneles, cada uno con una longitud de 1303 mm, el ancho total se determina como:

$$\text{Ancho total} = n \times L \quad (2.23)$$

Donde:

n: número de paneles.

L: medida del ancho del panel solar.

Cálculo de la Profundidad: Considerando que se utilizarán 2 filas de paneles, la profundidad total de la estructura se puede expresar como:

$$\text{Profundidad} = 2 \times D \quad (2.24)$$

Donde:

D: medida del largo del panel solar.

- Altura

Altura del borde más bajo: La altura mínima debe ser suficiente para el ángulo de inclinación. Un valor común podría ser:

$$H_b = 1200 \text{ mm} = 1.2 \text{ m} \quad (2.25)$$

Donde:

H_b : Altura en el extremo opuesto de la inclinación.

Altura del borde más alto: Para determinar la altura del borde más alto considerando 2 filas de paneles (4.768 mm de profundidad), se utiliza la fórmula de la tangente:

$$H_a = H_b + (L \times \tan(\theta)) \quad (2.26)$$

Donde:

H_b : La altura mínima del soporte, 1200 mm.

H_a : La altura en el extremo opuesto de la inclinación.

(θ) : Ángulo de inclinación, 15 grados.

L: Longitud de la base, que es la profundidad entre las 2 filas de los paneles.

Altura del borde Intermedio: La altura del borde intermedio se calcula usando la siguiente ecuación:

$$H_i = H_b + (d \times \tan(\theta)) \quad (2.27)$$

Donde:

d: es la distancia horizontal desde el borde bajo hasta el punto intermedio.

CAPÍTULO 3

DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE BOMBEO Y EL SISTEMA FOTOVOLTAICO

3.1 Sistema de Bombeo

3.1.1 Cálculo del caudal de agua

Para calcular el caudal, se utilizó un recipiente con una capacidad de 20 litros y se midió el tiempo que tardaba en llenarse. Se realizaron 10 pruebas para obtener un tiempo promedio.

Tabla 3.1: Tiempo de llenado del recipiente (Autor).

Pruebas	Tiempo (seg)
1	0,91
2	0,98
3	0,9
4	0,96
5	0,98
6	0,9
7	0,97
8	0,9
9	0,98
10	0,96
Tiempo Promedio	0,944

$$Q_e = \frac{20}{0,994} = 21,19 \frac{l}{seg} = 0,02119 \frac{m^3}{seg}$$

Obtenemos que el caudal de agua es de $0,02119m^3/s$, el cual usaremos para el calculo del sistema de bombeo.

3.1.2 Resolución de los cálculos de la potencia de la bomba hidráulica

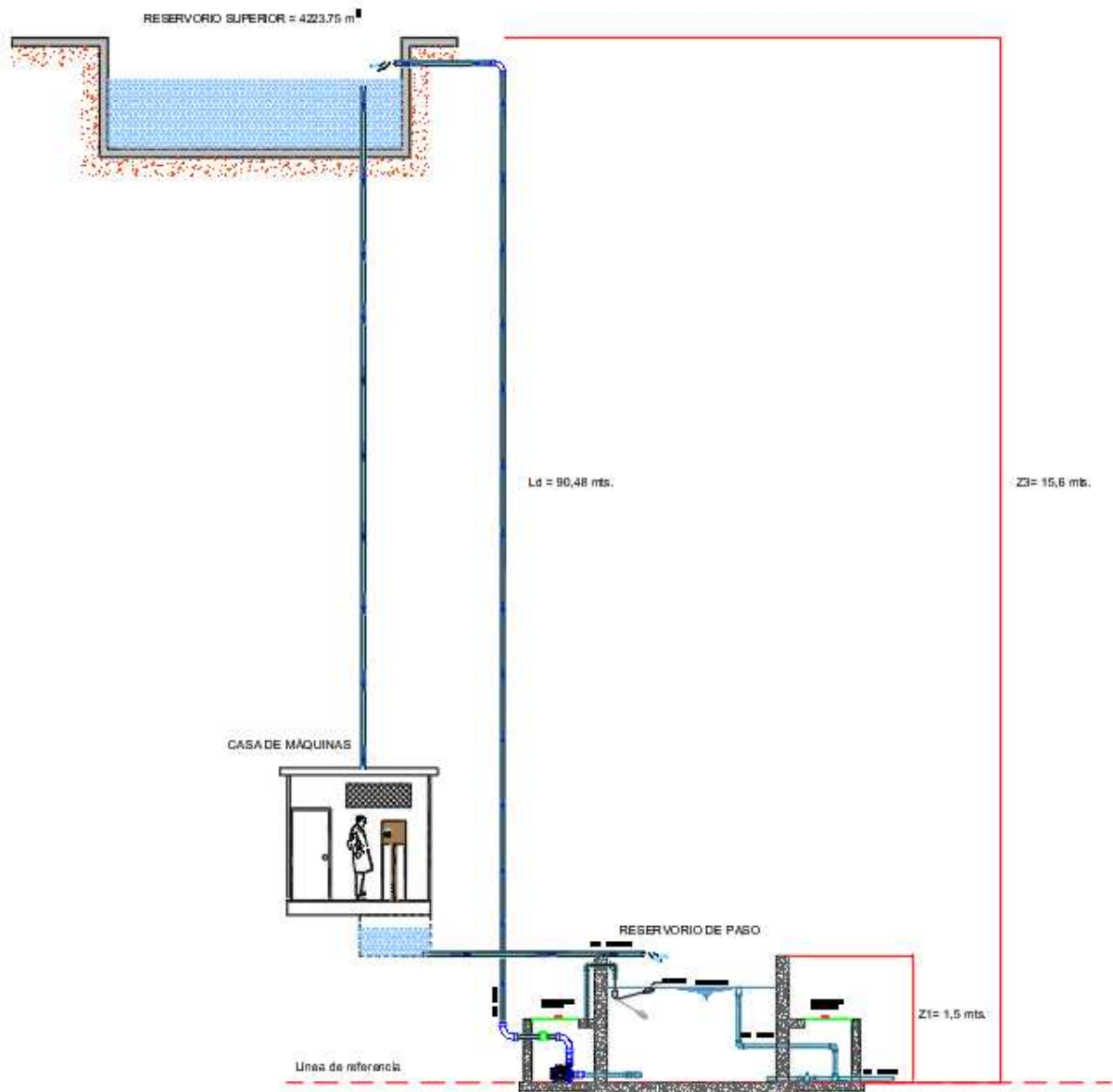


Figura 3.1: Diagrama del sistema de bombeo (AutoCAD).

De acuerdo con la NEC 11, la velocidad recomendada para el flujo en tuberías de agua oscila entre 0.6 m/s y 2 m/s. En este diseño, se ha obtenido una velocidad de 1.1 m/s, la cual se encuentra dentro del rango establecido. Este valor garantiza un flujo adecuado sin riesgo de sedimentación ni impactos negativos en la tubería.

Ecuación general de la energía:

$$\frac{P_1}{\gamma} + Z_1 + \frac{V_1^2}{2g} + h_A = \frac{P_3}{\gamma} + Z_3 + \frac{V_3^2}{2g} + h_T$$

Datos generales:

$$Q_s = 0.02119 \left[\frac{m^3}{s} \right] \text{ Caudal de agua a bombear.}$$

$$V = 1,1 \text{ m/s Velocidad del agua.}$$

$$D = 0,156 \text{ m Diámetro de tubería.}$$

$$A = 0,0191 \text{ m}^2 \text{ Área transversal de la tubería.}$$

$$\rho = 1000 \left[\frac{Kg}{m^3} \right] \text{ Densidad del agua.}$$

$$\gamma = 9810 \text{ Peso específico del fluido } \left[\frac{N}{m^3} \right]$$

$$Z_1 = 1,5 \text{ m.}$$

$$Z_3 = 15,6 \text{ m.}$$

$$L_d = 90,48 \text{ m Longitud de tubería tramo de descarga.}$$

$$L_s = 1,5 \text{ m Longitud de tubería tramo de succión.}$$

$$g = 9,81 \left[\frac{m}{s^2} \right] \text{ Gravedad.}$$

$$\mu = 1,007 \left[\frac{m^2}{s} \right] \text{ Viscosidad cinemática.}$$

$$\epsilon = 0,0015 \text{ Rugosidad.}$$

$$N_R = \frac{1000 * 1,1 * 0.156}{1.007} = 171415,587$$

$$f = \frac{0.25}{\left(\log \left(\frac{1}{3.7 * \frac{0.156}{0.0015}} \right) + \left(\frac{5.74}{171415,587 * (0.9)} \right) \right)^2} = 0.03735784$$

Pérdidas por tubería y accesorios:

Tabla 3.2: Valores de K en la línea de succión (Autor).

Accesorio	Cantidad	K_{unidad}	$K_{parcial}$
Válvula Check	1	2,5	2,5
K_{total}			2,5

Tabla 3.3: Valores de K en la línea de descarga (Autor).

Accesorio	Cantidad	K_{unidad}	$K_{parcial}$
Válvula Check	2	2,5	5
Codo 45°	3	0,42	1,26
K_{total}			5,26

$$h_T = \frac{1,1^2}{2 * 9.81} \left[(0.03735784 \frac{(90,48 + 1,5)}{0.156}) + (2,5 + 6,26) \right] = 1,8934m$$

Altura dinámica total que necesita la bomba para el fluido:

$$h_A = (15.6 - 1,5) + 1,8933 = 15,99m$$

Potencia Hidráulica:

$$P_h = 9810 * 15,99 * 0,02119 = 3,325kW$$

Potencia de la bomba:

$$P_B = \frac{9810 * 15,99 * 0,02119}{0.75} = 4,433kW$$

La eficiencia de la bomba la obtenemos de su hoja de característica de funcionamiento, que se presenta en la Figura 3.2.

**e-NSC SERIES
OPERATING CHARACTERISTICS | AT 60 Hz, 4 POLES**

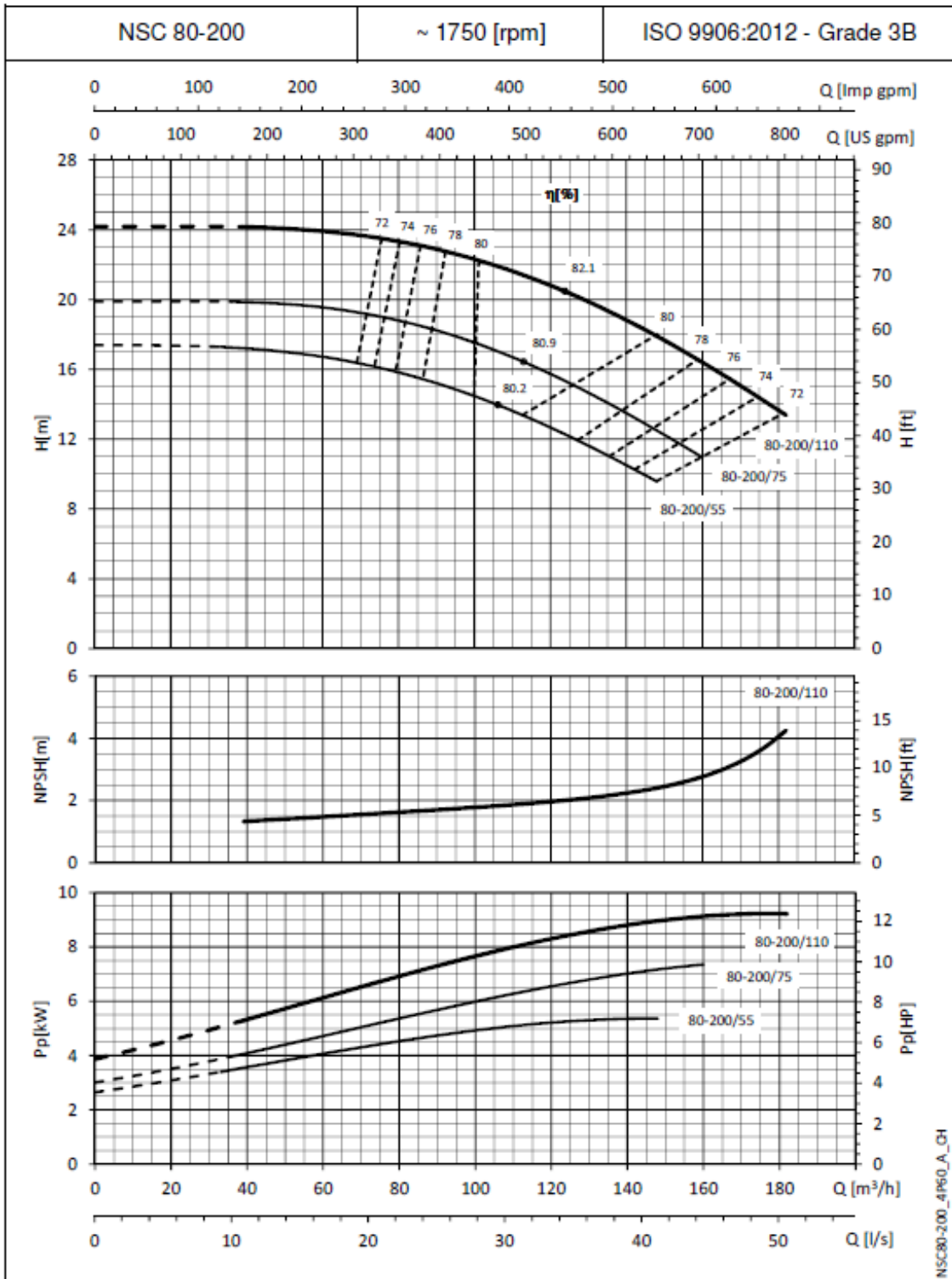


Figura 3.2: Característica de funcionamiento de la bomba [?].

- Eficiencia del sistema de bombeo

Para determinar la eficiencia de bombeo, compararemos la potencia hidráulica entregada al agua con la potencia eléctrica consumida por la bomba. En este caso usaremos una bomba de 5,5KW.

$$\eta = \frac{P_{hidráulica}}{P_{eléctrica}} * 100$$

$$\eta = \frac{3,325kW}{5,5kW} * 100$$

$$\eta = 60,45\%$$

3.2 Dimensionamiento del Reservorio Inferior

Para el dimensionamiento consideramos el tiempo mínimo de retención que para un reservorio de captación suele ser corto en este caso usaremos 5 min.

$$t = 5min$$

$$t = 5 * 60 = 300s$$

Determinamos el volumen del reservorio.

$$V = Q * t$$

$$V = 0,02119m^3/s * 300s$$

$$V = 6,36m^3$$

Calculamos las dimensiones del reservorio.

$$h = 1,5m$$

$$L = A = \sqrt{\frac{V}{h}}$$

$$L = A = \sqrt{\frac{6,36m^3}{1m}}$$

$$L = A = \sqrt{4,24}$$

$$L = A \approx 2,06m$$

El reservorio tendrá las siguientes medidas.

$$h = 1,5m$$

$$L = A = 2,06m$$

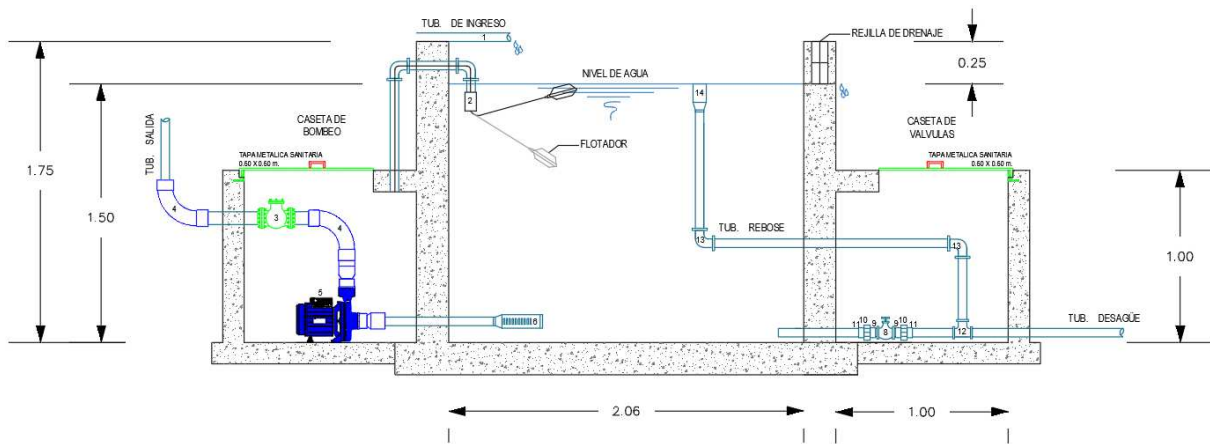


Figura 3.3: Dimensiones del reservorio de vista frontal (AutoCAD).

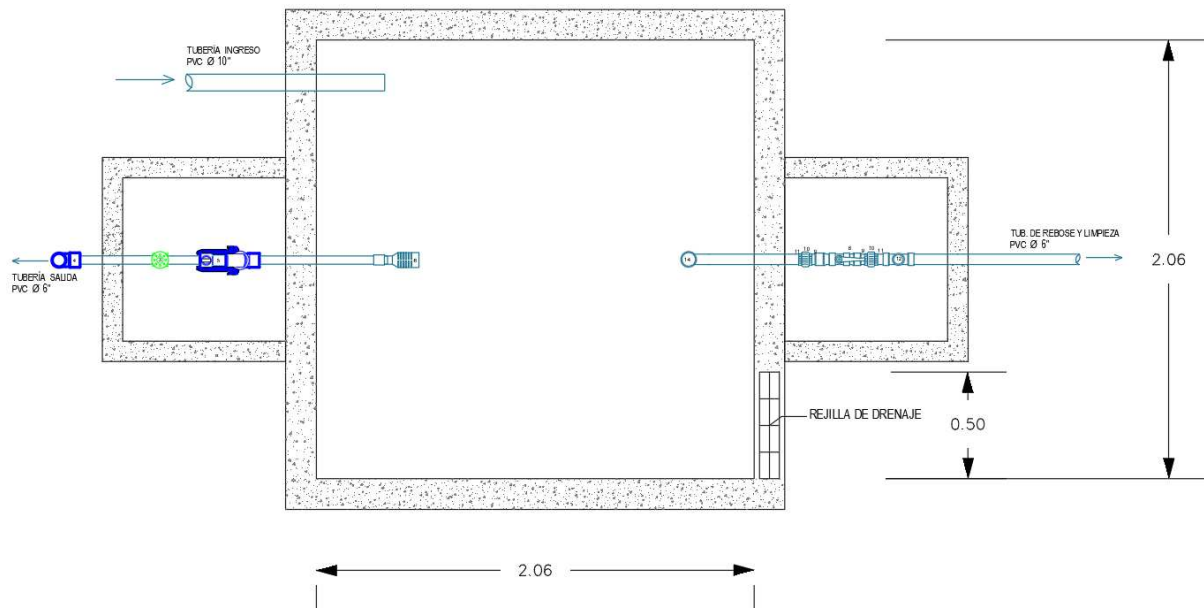


Figura 3.4: Dimensiones del reservorio de vista superior (AutoCAD).

Tabla 3.4: Listado de Accesorios de Reservorio (Autor).

Accesorios de Reservorio		
N°	Descripción	Cant
Accesorios red de ingreso		
1	Tubería PVC Ø 10''	01 und
Accesorios red de salida		
2	Flotador eléctrico	01 und
3	Válvula check Ø 6''	01 und
4	Codo PVC de Ø 6'' × 90°	02 und
5	Bomba Lowara NSC 100-200/25 220V/5,5kW	01 und
6	Canastilla PVC Ø 6''	01 und
7	Tubería PVC Ø 6''	01 und
Accesorios red de limpieza y rebose		
8	Válvula de compuerta Ø 6''	01 und
9	Niple de F °G° Ø 6''	02 und
10	Unión universal PVC-SAP C/R Ø 6''	02 und
11	Adaptador PVC SAP tipo UPR Ø 6''	02 und
12	Tee PVC SAP Ø 6''	01 und
13	Codo PVC SAP Ø 6'' × 90°	02 und
14	Cono de rebose Ø 8'' a 6''	01 und
15	Tubería PVC Ø 6''	01 und

3.3 Cálculo para el dimensionamiento del sistema solar fotovoltaico

3.3.1 Revisión de las horas solar pico del sistema

En la tabla 3.2 se presentan los datos de irradiación solar global recopilados en Paute, Azuay, para el año 2023. La ubicación específica de Paute se encuentra en las coordenadas (-2.773, -78.757). Se han medido los valores de irradiación en diferentes ángulos de inclinación (0°, 15°, 20° y 30°) a lo largo de los meses del año.

Los datos fueron obtenidos utilizando el software PVGIS (Photovoltaic Geographical Information System), una herramienta que proporciona información sobre la irradiación solar y el potencial de energía solar en diversas localizaciones.

Tabla 3.5: Irradiación Global en Paute, Azuay 2023 para diferentes ángulos (PVGIS).

Irradiación Global [kWh/m ² día]				
	0°	15°	20°	30°
Enero	4,425	4,038	3,870	3,482
Febrero	4,265	4,021	3,902	3,611
Marzo	3,794	3,724	3,764	3,612
Abril	3,547	3,606	3,593	3,518
Mayo	3,933	4,165	4,344	4,207
Junio	3,116	3,399	3,444	3,479
Julio	3,043	3,419	3,404	3,192
Agosto	4,565	4,762	4,907	4,753
Septiembre	5,254	5,257	5,200	4,849
Octubre	4,702	4,568	4,330	3,742
Noviembre	4,765	4,355	4,175	3,684
Diciembre	4,044	3,673	3,516	3,156

En el presente análisis, se ha seleccionado los tres datos mas bajos irradiación solar global del mes de Abril, Junio y Julio, correspondiente al ángulo de inclinación de 15 grados es de 3,606 kWh/m² día, 3,399 kWh/m² día y 3,419 kWh/m² día, para el dimensionamiento del sistema fotovoltaico usaremos el valor de 3,606 kWh/m², debido que para los meses de junio y julio pueden ser aprovechados para el mantenimiento preventivo de la pico central, el sistema de bombeo y el sistema fotovoltaico por lo cual en estos meses no estarán en operación.

3.3.2 Dimensionamiento del sistema

- Consumo energético del sistema:

Datos:

Potencia máxima = 5,5 kW

Horas de operación al día = 6 horas

$$E_{mc} = 5,5(kW) * 6 = 33kWh$$

- Cálculo de paneles solares:

Para determinar el número de paneles requeridos, se considero con panel de 675W. En la figura 3.4 se detallan las características técnicas del panel solar, la cual son consideradas para los cálculos requeridos para el sistema.

Electrical Parameters (STC*)							
Module Type: SP650M-60H	675	680	685	690	695	700	705
Maximum Power (Pmax/W)	675	680	685	690	695	700	705
Module Efficiency (%)	21.70	21.90	22.10	22.30	22.50	22.66	22.82
Optimum Operating Voltage (Vmp/V)	39.00	39.20	39.40	39.60	39.80	40.00	40.20
Optimum Operating Current (Imp/A)	17.31	17.50	17.39	17.43	17.47	17.51	17.55
Open Circuit Voltage (Voc/V)	46.90	47.10	47.30	47.50	47.70	47.90	48.10
Short Circuit Current (Isc/A)	18.24	18.29	18.34	18.39	18.44	18.49	18.54

*STC: Irradiance 1000 W/m², cell temperature 25°C, AM=1.5. Tolerance of Pmax is within +/- 3%.

Figura 3.5: Características técnicas del panel solar [?].

$$n_{panel} = \frac{E_{mc}}{P_{panel} * n_{campol} * HSP}$$

$$n_{panel} = \frac{33kWh/dia}{0,675kW * 0,8 * 3,606}$$

$$n_{panel} = 15,95 \approx 16$$

A través del análisis, se determinó que se requieren 16 módulos fotovoltaicos de 675W para este estudio.

- Cálculo de conexión en serie:

Datos:

Voltaje necesario del sistema = 48V

Voltaje a máxima potencia = 39V

$$n_{serie} = \frac{V_s}{V_{mp}}$$

$$n_{serie} = \frac{48V}{39V}$$

$$n_{serie} = 1,23 \approx 2$$

- Cálculo de paneles en paralelo:

$$n_{paralelo} = \frac{n_{panel}}{n_{serie}}$$

$$n_{paralelo} = \frac{16}{2}$$

$$n_{paralelo} = 8$$

- Cálculo del Inversor

Para el sistema fotovoltaico el inversor que se utilizará debe ser mayor o igual a la potencia de demanda.

$$P_{inversor} \geq P_{demanda,maxima}$$

$$P_{inversor} = 6kW$$

$$P_{demanda,maxima} = 5,5kW$$

$$6kW > 5,5kW$$

Model		1000W	1500W	2000W	3000W	4000W	5000W	6000W
Inverter Input	Rated capacity	1000W	1500W	2000W	3000W	4000W	5000W	6000W
	peak power	3000W	4500W	6000W	9000W	12000W	15000W	18000W
	Commercial Power range	110VAC:83V-137VAC 120VAC:90V-150VAC 220VAC:165V-275VAC 230VAC:173V-287VAC						
	AC frequency range	45-65HZ						
	Efficiency	>85%						

Figura 3.6: Características técnicas del inversor [?].

- Cálculo del controlador

Este cálculo es fundamental para dimensionar correctamente el controlador y garantizar que sea capaz de gestionar la corriente generada por el sistema.

$$I_n = I_{SC} * n_{paralelo}$$

$$I_n = 18,24A * 8$$

$$I_n = 145,92A$$

MPPT RS SmartSolar aislado	450 100	450 200
CARGADOR		
Tensión de la batería	48 V	
Corriente de carga nominal	100 A	200 A
Potencia de carga máxima	5,8 kW a 57,6 V	11,5 kW a 57,6 V
Tensión de carga de "absorción"	Valores predeterminados: 57,6 V (regulable)	
Tensión de carga de "flotación"	Valores predeterminados: 55,2 V (regulable)	
Rango de tensión programable	Mínima: 36 V Máxima: 62 V	
Algoritmo de carga	Adaptativo multifase (regulable)	
Sensor de temperatura de la batería	Incluido	
Eficiencia máxima	96 %	
Autoconsumo	15 mA	
SOLAR		
Tensión FV CC máxima	450 V	
Tensión de arranque	120 V	
Rango de tensión de trabajo del MPPT	80 – 450 V ⁽¹⁾	
Número de rastreadores	2	4
Máxima corriente de entrada operativa FV	18 A por rastreador	
Máxima corriente de corto circuito FV ⁽²⁾	20 A por rastreador	
Tamaño máximo del conjunto FV por rastreador ⁽³⁾	7200 Wp (450 V x 20 A) ⁽³⁾	
Nivel de fallo del aislamiento FV ⁽⁴⁾	100 kΩ	

Figura 3.7: Características técnicas del controlador [?].

- Cálculo del acumulador

$$C_{sb} = \frac{E_{mc}}{V_{sb}E_{iv}}$$

$$C_{sb} = \frac{33kW}{48 * 0,85}$$

$$C_{sb} = 584,375Ah$$

Además, se calcula cuantas baterías sera instaladas.

$$B_p = \frac{C_{sb}D_{aut}}{C_bM_{pd}}$$

$$B_p = \frac{584,375 * 1}{200Ah * 0,6}$$

$$B_p = 4,87 \approx 5$$

Normal		
Model	48V 100AH	48V 200AH
Battery Type	LiFePO4(LFP)	LiFePO4(LFP)
Normal Voltage(V)	48V	48V
Normal Capacity(WH)	4800WH	9600WH
Usable Capacity(WH)	3840WH/80%DOD	7680WH/80%DOD
Design Life	10+Years(25°C/77T)	10+Years(25°C/77T)
Physical		
Dimension(mm)	470*490*220mm	560*600*275.5mm
Weight(kg)	50kg	90kg

Figura 3.8: Características técnicas de las baterías [?].

3.3.3 Dimensiones de la Estructura

- Ancho y Profundidad

Ancho Total:

$$\text{Ancho total} = 8 \times 1303 \text{ mm} = 10424 \text{ mm} = 10.424 \text{ m}$$

Profundidad:

$$\text{Profundidad} = 2 \times 2384 \text{ mm} = 4768 \text{ mm} = 4.768 \text{ m}$$

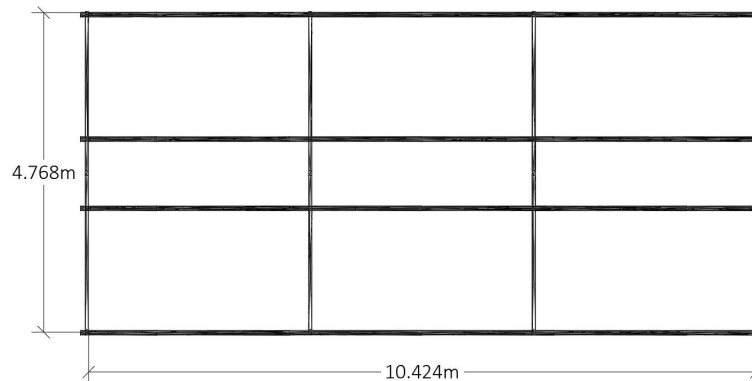


Figura 3.9: Diseño en 2D de una estructura fotovoltaica fija, con dimensiones claramente acotadas de ancho y profundidad (AutoCAD).

- Altura

Altura del borde más alto:

$$H_a = 1200 \text{ mm} + (4768 \text{ mm} \times \tan(15^\circ))$$

$$H_a = 1200 \text{ mm} + 1277.58 \text{ mm} = 2477.58 \text{ mm}$$

$$H_a = 2.477 \text{ m}$$

Altura del borde Intermedio:

$$H_i = 1200 \text{ mm} + (2384 \text{ mm} \times \tan(15^\circ))$$

$$H_i = 1200 \text{ mm} + 638.79 \text{ mm} = 1838.79 \text{ mm}$$

$$H_i = 1.838 \text{ m}$$

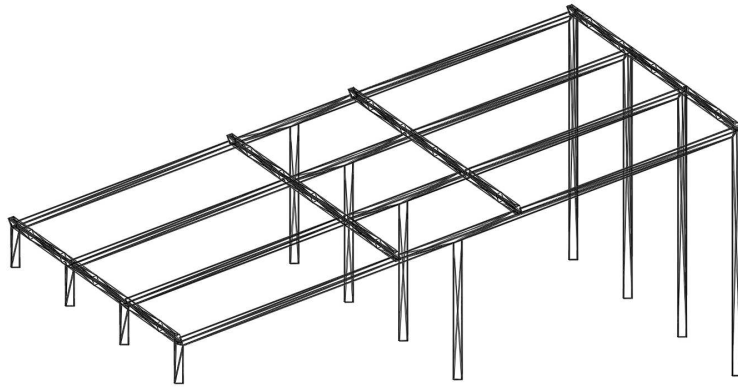


Figura 3.10: Diseño en 3D de una estructura fotovoltaica fija (AutoCAD).

- Dimensiones de la Estructura:

Ancho: 10424 mm (10.424 m).

Profundidad: 4768 mm (4.768 m).

Altura del borde más bajo: 1200 mm (1.2 m).

Altura del borde intermedio: 1838.79 mm (1.838 m).

Altura del borde más alto: 2477.58 mm (2.477 m).

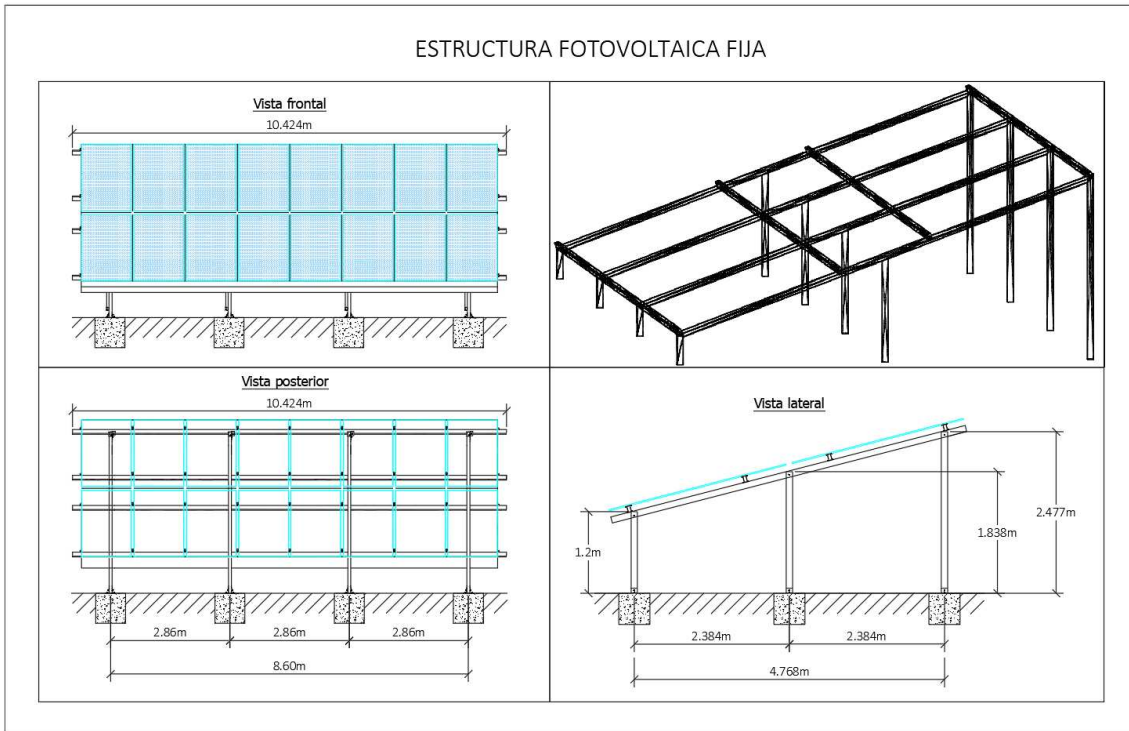


Figura 3.11: Diseño de estructura fotovoltaica fija con vistas frontal, posterior y lateral, que incluye dimensiones detalladas (AutoCAD).

3.3.4 Ubicación de la estructura fotovoltaica

La ubicación seleccionada para la instalación de la estructura fotovoltaica se encuentra en la Unidad Educativa Agrónomo Salesiano Campus Yugmacay, específicamente en la zona de los tanques de Biodigestor. Este espacio está delimitado por una malla de cerramiento, lo que garantiza la seguridad y protección del área.

Dentro de esta zona, existe un espacio adecuado y suficiente para la colocación de la estructura fotovoltaica. La ubicación no solo es estratégica, sino que también permite optimizar la captación de energía solar, contribuyendo así a los objetivos de sostenibilidad y eficiencia energética.



Figura 3.12: Ubicación para la estructura fotovoltaica (Autor).

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Introducción

En este capítulo se presentan los resultados de las simulaciones realizadas al sistema de bombeo, previamente desarrollado en el capítulo 3, así como los escenarios planteados, las pruebas experimentales realizadas a la pico central hidráulica y el análisis económico correspondiente.

4.2 Validación del sistema de bombeo

Para validar el sistema de bombeo usamos el entorno de simulación Aspen Hysys V14 el cual nos permite obtener la potencia de la bomba, para esto es necesario conocer los parametros de entrada y salida tales como presión, caudal y diámetro de la tubería a usar.

Para comenzar con la simulación, se especifica las condiciones iniciales como caudal, presión y temperatura del agua.

Material Stream: tanque

Worksheet Attachments Dynamics

Worksheet	Stream Name	tanque	Aqueous Phase
Conditions	Vapour / Phase Fraction	0,0000	1,0000
Properties	Temperature [C]	25,00	25,00
Composition	Pressure [kPa]	101,3	101,3
Oil & Gas Feed	Molar Flow [kgmole/h]	4226	4226
Petroleum Assay	Mass Flow [kg/h]	7,613e+004	7,613e+004
K Value	Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	76,28	76,28
User Variables	Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-2,849e+005	-2,849e+005
Notes	Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	6,559	6,559
Cost Parameters	Heat Flow [kJ/h]	-1,204e+009	-1,204e+009
Normalized Yields	Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	75,02	75,02
Emissions	Fluid Package	Basis-1	
	Utility Type		

Figura 4.1: Parámetros de entrada.

Establecemos los componentes de la tubería para el tramo de succión, esta tubería sera de 6 pulgadas de diámetro y una longitud de 1.5m, también se incluye accesorios como la válvula check.

Pipe Segment: PIPE-100

Design Rating Worksheet Performance Flow Assurance Dynamics

Rating

Sizing
Heat Transfer

Length - Elevation Profile

Segment	1	2
Fitting/Pipe	Pipe	Check Valve: Swing
Length/Equivalent Length	1,500	17,30
Elevation Change	0,0000	0,0000
Outer Diameter	168,3	<empty>
Inner Diameter	154,1	154,1
Material	PlasticTubing	Mild Steel
Roughness	1,400e-005	4,572e-005
Pipe Wall Conductivity	0,1700	45,00

Append Segment Insert Segment View Segment...
Delete Segment Clone Segment Clear Profile

Figura 4.2: Tubería de succión.

Para el tramo de descarga se indica la elevación de la tubería, longitud y diámetro, así como los accesorios, codos de 45° y las válvulas check.

Segment	1	2	3	4	5	6	7
Fitting/Pipe	Pipe	Elbow: 45 Std	Pipe	Elbow: 45 Std	Pipe	Check Valve: Swing	Check Valve: Swing
Length/Equivalent Length	76,60	1,771	9,010	2,062	4,870	17,30	17,30
Elevation Change	11,00	0,0000	4,600	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Outer Diameter	168,3	<empty>	168,3	<empty>	168,3	<empty>	<empty>
Inner Diameter	154,1	154,1	154,1	154,1	154,1	154,1	154,1
Material	PlasticTubing	PlasticTubing	PlasticTubing	Mild Steel	PlasticTubing	Mild Steel	Mild Steel
Roughness	1,400e-005	1,400e-005	1,400e-005	4,572e-005	1,400e-005	4,572e-005	4,572e-005
Pipe Wall Conductivity	0,1700	0,1700	0,1700	45,00	0,1700	45,00	45,00
Increments	5	1	5	1	5	1	1
FittingNo	<empty>	1	<empty>	1	<empty>	1	1

Figura 4.3: Tubería de descarga.

Se indica los parámetros de salida caudal, presión y temperatura del agua.

Stream Name	Laguna	Aqueous Phase
Vapour / Phase Fraction	0,0000	1,0000
Temperature [C]	25,00	25,00
Pressure [kPa]	101,3	101,3
Molar Flow [kgmole/h]	4226	4226
Mass Flow [kg/h]	7,613e+004	7,613e+004
Std Ideal Liq Vol Flow [m3/h]	76,28	76,28
Molar Enthalpy [kJ/kgmole]	-2,849e+005	-2,849e+005
Molar Entropy [kJ/kgmole-C]	6,559	6,559
Heat Flow [kJ/h]	-1,204e+009	-1,204e+009
Liq Vol Flow @Std Cond [m3/h]	75,02	75,02
Fluid Package	Basis-1	
Utility Type		

Figura 4.4: Parámetros de salida.

Al introducir los datos requeridos por Aspen Hysys, el entorno de simulación realiza los cálculos necesarios y nos da como resultado la potencia de la bomba.

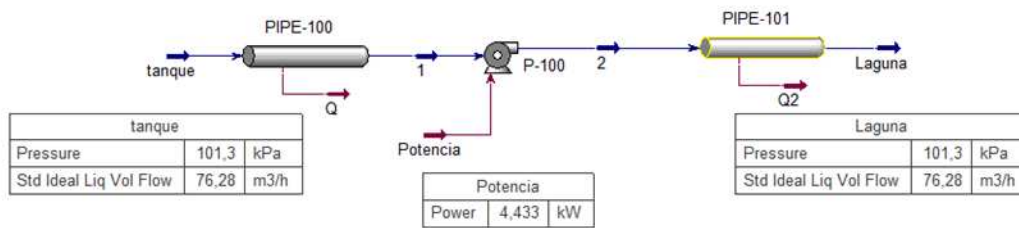


Figura 4.5: Simulación en el software Aspen HYSYS.

Head [m]	15,99	<input type="checkbox"/>
Fluid Head [kJ/kg]	0,1568	<input type="checkbox"/>
Speed [rpm]	<empty>	<input type="checkbox"/>
Efficiency [%]	75,00	<input checked="" type="checkbox"/>

Figura 4.6: Resultados.

Como resultado obtenemos la potencia de la bomba de 4,433 kW, el caudal del agua que es de $76,28 \text{ m}^3/\text{s}$ y la altura dinámica de 15.99 m lo cual coincide con los datos previamente realizados en la sección 3.2.

- Validación en EPANET

En el entorno de simulación EPANET 2.00.12, es posible llevar a cabo el análisis y diseño de sistemas de distribución de agua. En este diseño, se pueden incorporar diversos componentes, como embalses, bombas y tuberías.

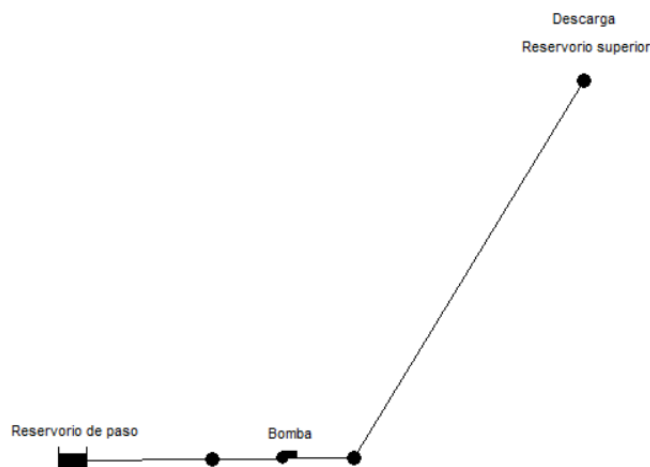


Figura 4.7: Representación de componentes - etapa preliminar.

Primero, se identifican los parámetros de entrada, como es el caso del embalse. En este componente, se ingresa el valor de la altura total, que en este sistema de bombeo de succión positiva se establece a 1.5 metros sobre el nivel del agua. La imagen muestra los datos de entrada correspondientes al embalse, donde se detallan propiedades como la altura, la presión y el caudal neto entrante.

Embalse 1	
Propiedad	Valor
*ID Embalse	1
Coordenada X	1218,98
Coordenada Y	3474,45
Descripción	
Etiqueta	
*Altura Total	1,5
Curva Modulac. de la Altura	
Calidad Inicial	
Intensidad de la Fuente	
Caudal Neto Entrante	-21,19
Altura	1,50
Presión	0,00
Calidad	0,00

Figura 4.8: Datos de entrada en el reservorio.

A continuación, se requieren los parámetros de las tuberías. En este caso, para el tramo entre el reservorio y la bomba, es necesario especificar la longitud, el diámetro, la rugosidad y los coeficientes de pérdidas menores.

Tubería 2	
Propiedad	Valor
*ID Tubería	2
*Nudo Inicial	1
*Nudo Final	5
Descripción	
Etiqueta	
*Longitud	1,5
*Diámetro	154,1
*Rugosidad	0,03
Coef. Pérdidas Menores	2,5
Estado Inicial	Abierta
Coef. Reacción en el Medio	
Coef. Reacción en la Pared	
Caudal	21,19
Velocidad	1,14
Pérdida Unitaria	117,04

Figura 4.9: Datos de entrada en la tubería en el primer tramo.

En la bomba, el dato que se ingresará es la curva característica de operación de la bomba seleccionada. Esta curva es fundamental, ya que permitirá verificar el funcionamiento del sistema de bombeo.

Propiedad	Valor
*ID Bomba	1
*Nudo Aspiración	5
*Nudo Impulsión	6
Descripción	
Etiqueta	
Curva Característica	B1
Potencia Nominal	
Velocidad Relativa	
Curva Modulac. Velocidad	
Estado Inicial	Marcha
Curva Rendimiento	
Precio Energía	
Curva Modulac. Precios	
Caudal	21,19
Altura Bomba (-)	-16,06

Figura 4.10: Datos de entrada en la bomba.

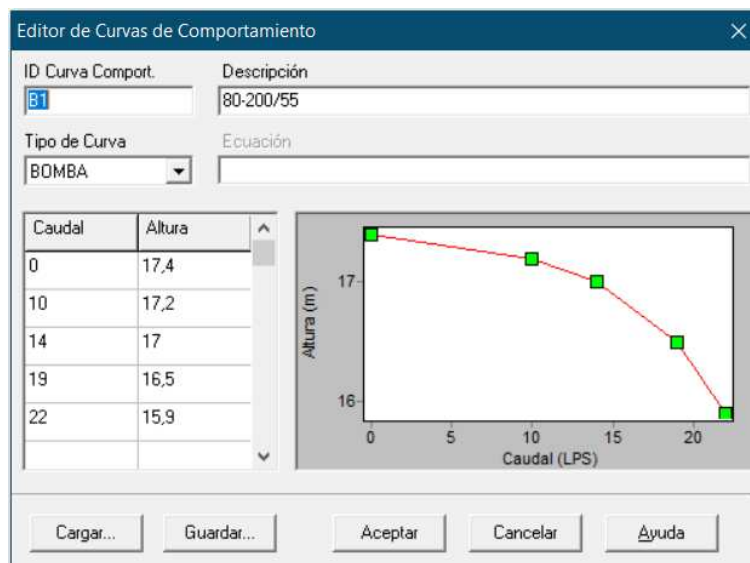


Figura 4.11: Datos de la curva característica de operación de la bomba.

En el tramo entre la bomba y el punto de descarga hacia el reservorio superior, se ingresan parámetros como la longitud, el diámetro, la rugosidad y los coeficientes de pérdidas menores.

Tubería 3	
Propiedad	Valor
*ID Tubería	3
*Nudo Inicial	6
*Nudo Final	3
Descripción	
Etiqueta	
*Longitud	90,48
*Diámetro	154,1
*Rugosidad	0,03
Coef. Pérdidas Menores	6,26
Estado Inicial	Abierta
Coef. Reacción en el Medio	
Coef. Reacción en la Pared	
Caudal	21,19
Velocidad	1,14
Pérdida Unitaria	12,00

Figura 4.12: Datos de entrada en la tubería en el segundo tramo.

Para el nodo o punto de descarga, se ingresan los valores correspondientes a la cota o altura a la que está ubicado, así como la demanda base, que representa el caudal final esperado para que el agua llegue al reservorio superior.

Nudo de Caudal 3	
Propiedad	Valor
*ID Nudo de Caudal	3
Coordenada X	6810,22
Coordenada Y	7620,44
Descripción	
Etiqueta	
*Cota	15,6
Demanda Base	21,19
Curva Modul. Demanda	
Tipos de Demanda	1
Coefficiente del Emisor	
Calidad Inicial	
Intensidad de la Fuente	
Demanda Actual	21,19
Altura Total	16,30
Presión	0,70

Figura 4.13: Datos de entrada en la punto de descarga.

Estos resultados permiten determinar si el sistema cumple con los requerimientos de presión y su correcto funcionamiento. La presión en el reservorio superior es de 0.70 metros, lo que indica que el sistema está diseñado para mantener una presión adecuada en el punto de descarga y el caudal de 21.19 LPS (litros por segundo) se

mantiene, lo que sugiere que el sistema es capaz de satisfacer la demanda prevista.

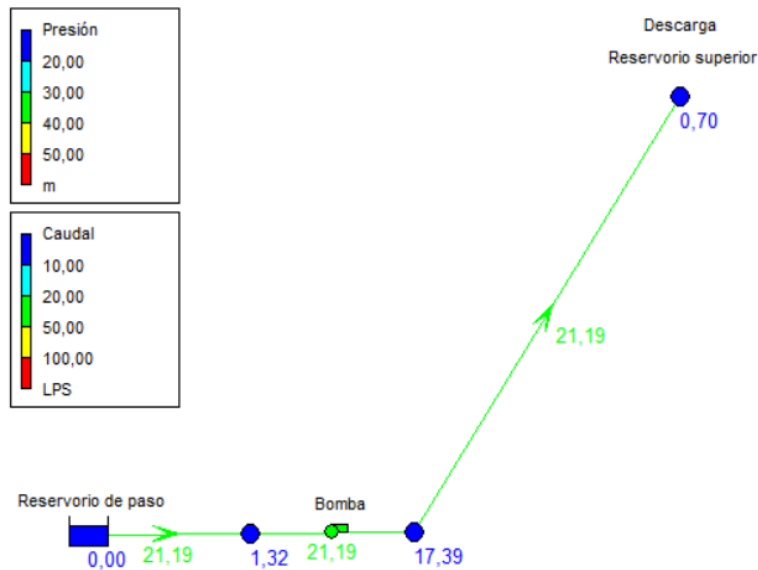


Figura 4.14: Simulación en el software EPANET.

4.3 Análisis de Escenarios para la Implementación del Sistema de Bombeo

4.3.1 Implementación de un Reservorio de Captación en una Ubicación Estratégica en Altura para el Máximo Aprovechamiento del Caudal de Salida en la Pico Central Hidráulica

En este caso, se incluirá en la salida de agua de la pico central hidráulica una tubería de 5 metros de longitud a una elevación de un metro en este punto se ubicará el reservorio de captación aprovechando el máximo desfogue que nos permite. Esta disposición permite reducir la longitud de la tubería de descarga y, al mismo tiempo, disminuir la altura de referencia respecto a la laguna.

Mediante el principio de vasos comunicantes se determinará que el agua no puede alcanzar un nivel superior por sí sola sin aporte de energía externa (como una bomba). Es por esto que el agua solo podría alcanzar un metro de altura.

Se realizó la medición del caudal que obtenemos en la salida de esta tubería mediante el método volumétrico, para este caso se usó un recipiente de 40 litros, a continuación se muestra la tabla con las mediciones obtenidas.

Tabla 4.1: Tiempo de llenado del recipiente (Autor).

Pruebas	Tiempo (seg)
1	1,9
2	1,88
3	1,9
4	1,89
5	1,7
6	1,9
7	2
8	1,95
9	1,96
10	1,8
Tiempo Promedio	1,888

$$Q_e = \frac{40}{1,888} = 21,19 \frac{l}{seg} = 0,02119 \frac{m^3}{seg}$$

Como se puede observar el caudal de agua es el mismo que teníamos anteriormente de $0,02119 m^3/s$, es el caudal que usaremos para este caso de estudio.

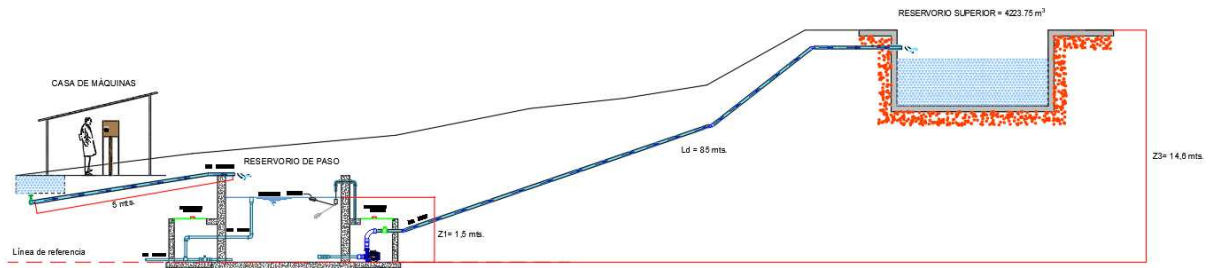


Figura 4.15: Primer escenario del sistema de bombeo (AutoCAD).

Tabla 4.2: Datos de entrada (Autor).

Dato	Valor
Q	0,02119 m^3/s
V	1,1 m/s
D	0,156 mm
A	0,0191 m^2
ρ	1000 Kg/m^3
γ	9810 N/m^3
Z1	1,5 m
Z3	14,6 m
Ld	85,48 m
Ls	1,5 m
g	9,81 m/s^2
μ	1,007 m^2/s
ϵ	0,0015

- Accesorios

Tabla 4.3: Valores de K en la línea de succión (Autor).

Accesorio	Cantidad	K_{unidad}	$K_{parcial}$
Válvula Check	1	2,5	2,5
K_{total}			2,5

Tabla 4.4: Valores de K en la línea de descarga (Autor).

Accesorio	Cantidad	K_{unidad}	$K_{parcial}$
Válvula Check	2	2,5	5
Codo 45°	3	0,42	1,26
K_{total}			5,26

Con estos valores establecidos calculamos los parámetros necesario para obtener la potencia de la Bomba.

Tabla 4.5: Resultados (Autor).

Dato	Valor
N_R	171415,6
f	0,037358
h_t	1,819814 <i>m</i>
h_A	14,91981 <i>m</i>
p_h	3,10144 <i>KW</i>
η Bomba	0,76
P_B	4,081 <i>KW</i>

- Eficiencia del sistema de bombeo

En este caso usaremos una bomba de 5,5kW.

$$\eta = \frac{P_{hidraulica}}{P_{electrica}} * 100$$

$$\eta = \frac{3,10144kW}{5,5kW} * 100$$

$$\eta = 56,38\%$$

4.3.2 Diseño de un Sistema de Bombeo con Reservorio de Almacenamiento para la Reducción del Caudal de Operación

En este escenario se contará con un reservorio capaz de almacenar el volumen generado durante las 6 horas de operación de la pico central hidráulica. El sistema de bombeo funcionará únicamente en los periodos en que la generación esté detenida, lo que permitirá regular el caudal requerido para el bombeo. En este caso el caudal que usaremos es de $0,011m^3/s$ y la tubería de 6 pulgadas, lo cual nos permite que la velocidad que es de $0,63m/s$ esté dentro del rango establecido por la NEC 11 que es de $0,6 m/s$ a $2m/s$,

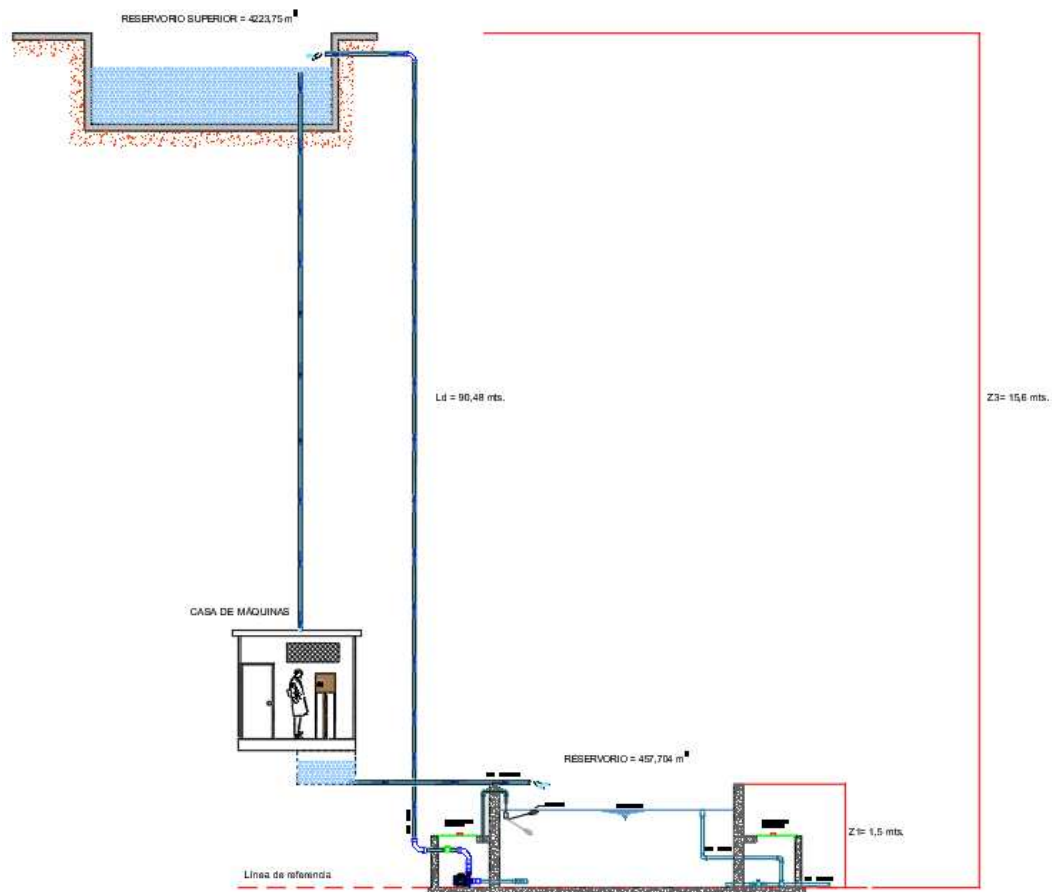


Figura 4.16: Segundo escenario del sistema de bombeo (AutoCAD).

Tabla 4.6: Datos de entrada (Autor).

Dato	Valor
Q	0,012 m^3/s
V	0,63 m/s
D	0,15661 mm
A	0,0191 m^2
ρ	1000 Kg/m^3
γ	9810 N/m^3
Z1	1,5 m
Z3	15,6 m
Ld	90,48 m
Ls	1,5 m
g	9,81 m/s^2
μ	1,007 m^2/s
ϵ	0,0015

- Accesorios

Tabla 4.7: Valores de K en la línea de succión (Autor).

Accesorio	Cantidad	K_{unidad}	$K_{parcial}$
Válvula Check	1	2,5	2,5
K_{total}			2,5

Tabla 4.8: Valores de K en la línea de descarga (Autor).

Accesorio	Cantidad	K_{unidad}	$K_{parcial}$
Válvula Check	2	2,5	5
Codo 45°	3	0,42	1,26
K_{total}			5,26

Realizamos los cálculos con las formulas previamente visto en el capítulo 2 y obtenemos los siguientes resultados.

Tabla 4.9: Resultados (Autor).

Dato	Valor
N_R	97871,003
f	0,0373587
h_t	0,6172336 m
h_A	14,72 m
p_h	1,73 KW
η Bomba	0,72
P_B	2,4 KW

- Eficiencia del sistema de bombeo

En este caso usaremos una bomba de 3KW.

$$\eta = \frac{P_{hidráulica}}{P_{eléctrica}} * 100$$

$$\eta = \frac{1,73kW}{3kW} * 100$$

$$\eta = 58\%$$

- Dimensionamiento del reservorio

Como la pico central estará en funcionamiento durante 6 horas y el caudal de agua de salida es de $0,02119 \text{ m}^3/s$, el reservorio deberá tener un volumen de $457,704 \text{ m}^3$. Para esto usamos las ecuación 2.24 y obtenemos las dimensiones del reservorio.

Tabla 4.10: Dimensiones del reservorio de almacenamiento (Autor).

Altura	1,5 <i>m</i>
Ancho	17,47 <i>m</i>
Largo	17,47 <i>m</i>

4.3.3 Análisis de eficiencia

Se realizará el análisis de la eficiencia para cada escenario propuesto.

Tabla 4.11: Eficiencia del sistema de bombeo (Autor).

Escenario	Valor
Propuesto (capítulo 3)	60,45 %
Escenario 1	56,38 %
Escenario 2	58 %

- Relación energía consumida y generada

Dado que la pico central hidráulica produce 4kW y estará en operación durante 15 horas la energía generada sera de 60kWh, entonces lo analizamos con la energía consumida por la bomba para cada escenario.

1. Propuesto

Para el sistema de bombeo se usa una bomba de 5,5kW en un periodo de 6 horas, lo cual nos da una energía consumida de 33kWh.

2. Escenario 1

Semejante al escenario propuesto, energía consumida de 33kWh.

3. Escenario 2

Para el sistema de bombeo se usa una bomba de 3kW pero el tiempo de bombeo aumenta a 10 horas por la reducción del caudal, lo que nos da una energía consumida de 33kWh.

Tabla 4.12: Relación energía generada y energía consumida (Autor).

Escenario	Energía generada	Energía Consumida	Relación
Propuesto (capítulo 2)	60kWh	33kWh	1,8
Escenario 1	60kWh	33kWh	1,8
Escenario 2	60kWh	33kWh	1,8

Se puede observar que el escenario propuesto, desarrollado en el Capítulo 3, presenta una eficiencia del 60,45 %, superior a la de los otros escenarios analizados. Esta mayor eficiencia refleja un mejor aprovechamiento energético, lo cual es especialmente relevante considerando las condiciones y parámetros específicos de la zona, tales como el caudal disponible, la altura neta y las características del terreno. En comparación, el Escenario 1 y el Escenario 2 alcanzan eficiencias menores, lo que evidencia que el diseño propuesto está mejor adaptado a las condiciones locales para el sistema de bombeo.

Al analizar la relación entre la energía generada por la pico central y la consumida por la bomba, se observa que lo generado es mayor a lo consumido, esto muestra un balance energético favorable que permite considerar viable la incorporación del sistema de bombeo.

4.3.4 Sostenibilidad Ambiental

La sostenibilidad ambiental ha emergido como un elemento clave en el desarrollo de tecnologías diseñadas para reducir el impacto negativo de las actividades humanas en el medio ambiente. En el ámbito de los sistemas de bombeo, es fundamental implementar soluciones que utilicen recursos renovables, promoviendo así un uso responsable de agua y energía.

Al utilizar paneles fotovoltaicos, esta tecnología convierte la radiación solar en electricidad, que se utiliza para accionar bombas centrífugas. Este método no solo disminuye la dependencia de fuentes de energía tradicionales, que a menudo están

vinculadas a la emisión de gases de efecto invernadero, sino que también maximiza la eficiencia en el uso del agua.

4.3.5 Evaluación Comparativa del Desempeño de una Picocentral con y sin Bombeo: Ventajas y Desventajas

Tabla 4.13: Comparación técnica entre pico central con sistema de bombeo fotovoltaico y sin sistema de bombeo (Autor).

Pico central con sistema de bombeo fotovoltaico (Reversible)	Pico central sin sistema de bombeo (No reversible)
Ventajas	Ventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Extiende el tiempo de generación eléctrica. • Utiliza energía renovable solar para alimentación del bombeo, asegurando autonomía. • Reduce pérdidas por vertido, dando mejor uso del agua disponible. 	<ul style="list-style-type: none"> • El sistema se enfoca únicamente en la generación hidráulica directa de la Pico central. • Menor inversión inicial debido a la ausencia de equipos de bombeo y energía solar. • Reducción de costos de operación.
Desventajas	Desventajas
<ul style="list-style-type: none"> • Requiere alta inversión inicial en bombas, paneles solares, inversores y sistemas de control. • Diseño complejo que requiere dimensionamiento detallado según condiciones hidráulicas y solares. • Mayor demanda de mantenimiento en componentes eléctricos y mecánicos. 	<ul style="list-style-type: none"> • Generación limitada al volumen de la laguna, restringiendo a 14 horas de operación. • Dependencia directa del recurso hídrico disponible sin posibilidad de recirculación. • Limitada capacidad de respuesta ante variaciones en la demanda energética.

4.4 Análisis Técnico

4.4.1 Enfoque en la Norma ISO 9001

En el análisis técnico del proyecto de titulación, se implementó un enfoque estructurado basado en los principios de la norma ISO 9001, la cual sirvió como guía para asegurar que cada etapa del proyecto, desde la recolección de datos, simulaciones hasta la selección y dimensionamiento de la bomba centrífuga, esto se realice con estándares claros de calidad, confiabilidad y supervisión técnica. De esta manera, se garantiza que los cálculos sobre la potencia requerida para la bomba centrífuga, el dimensionamiento del reservorio de captación y del sistema solar fotovoltaico sean correctos, demostrable y se orienten hacia una mejora continua.

En este enfoque, se utilizó el ciclo de mejora continua PHVA (planificar, hacer, verificar, actuar) [?], lo cual permitió estructurar de una forma ordenada las distintas etapas del proyecto. Además, se diseñó un flujograma que permite visualizar cada proceso del proyecto de forma clara y ordenada, que abarca desde el uso del agua para su respectiva generación hasta su retorno al reservorio superior mediante el sistema de bombeo, integrando el mecanismo de recirculación energética.

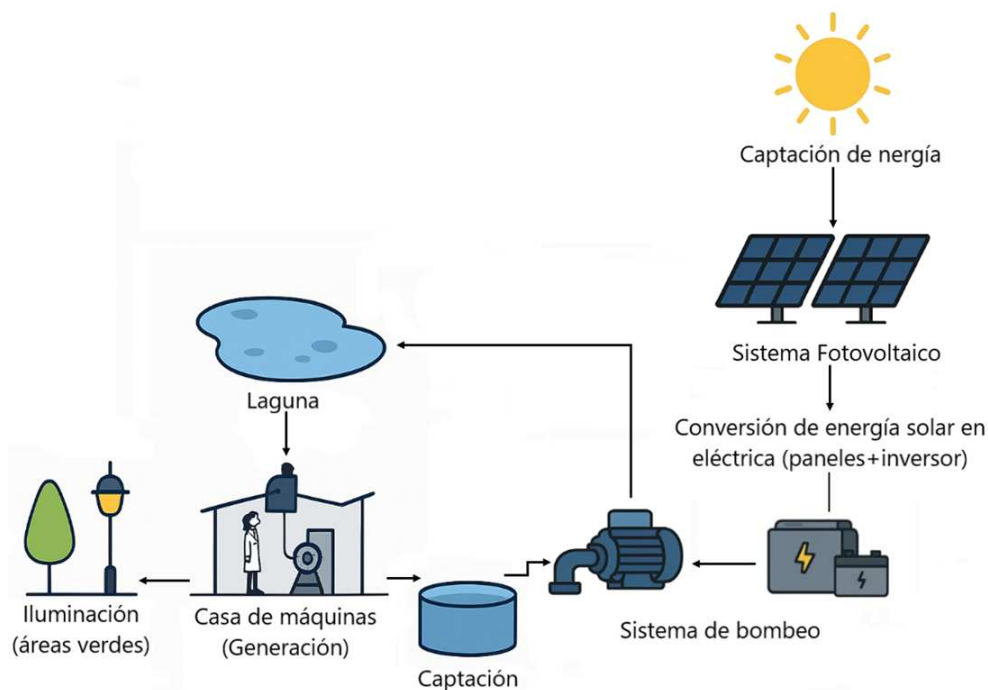


Figura 4.17: Flujograma del Proceso Técnico de Implementación y Evaluación conforme la normativa ISO 9001 (Autor).

4.4.2 Enfoque en recurso hídrico

En este análisis se considera el volumen de agua que tiene la laguna para hidrogenación, el volumen de agua que necesita la pico central para generar durante 15 horas, así como el caudal de agua que ingresa a la laguna debido a la compuerta que desvía el cause de una quebrada ubicada en la zona.

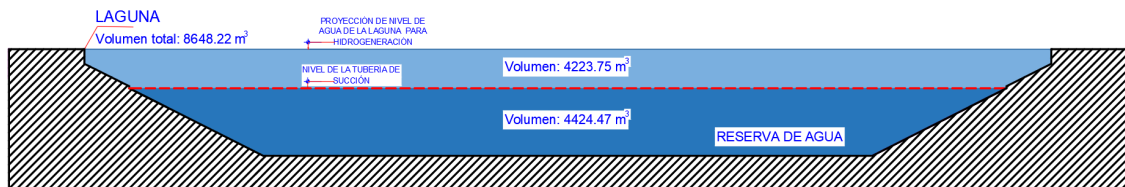


Figura 4.18: Levantamiento de la laguna (Autor).

- Volumen de agua necesario para hidrogenación

A la pico central ingresa un caudal de $0,024 \text{ m}^3/\text{s}$ para operar, se toma en cuenta el tiempo que estará en operación lo cual son 15 Horas.

$$V_{Consumo} = 0,024 \text{ m}^3/\text{s} * 54000 \text{ s}$$

$$V_{Consumo} = 1296 \text{ m}^3$$

Se necesita un total de 1296 m^3 diario para que la pico central pueda operar durante 15 Horas.

- Volumen de agua que ingresa a la laguna a través de la compuerta instalada

A través de esta compuerta instalada el caudal que ingresa en condiciones normales es de $0,02 \text{ m}^3/\text{s}$, y en temporada de estiaje el caudal decae a $0,01 \text{ m}^3/\text{s}$.

Considerando que la compuerta se mantendrá abierta las 24 horas, calculamos el volumen de agua que ingresara a la laguna.

$$V_{Ingesa} = 0,02 \text{ m}^3/\text{s} * 86400 \text{ s}$$

$$V_{Ingesa} = 1728m^3$$

$$V_{Ingesa} = 0,01m^3/s * 86400s$$

$$V_{Ingesa} = 864m^3$$

- Volumen de agua que retornará por bombeo

El sistema de bombeo operará durante 6 horas, con un caudal de $0,02119 m^3/s$.

$$V_{retorno} = 0,02119m^3/s * 21600s$$

$$V_{retorno} = 457,704m^3$$

El sistema de bombeo permitirá retornar $457,704 m^3$ hasta la laguna.

Entonces el volumen neto de agua utilizado de la laguna seria el Volumen que requiere la pico central para operar durante 15 horas menos el volumen de agua retornado mediante el sistema de bombeo.

$$V_{neto} = 1296m^3 - 457,704m^3$$

$$V_{neto} = 838,3m^3$$

El volumen neto que se necesita a diario de la laguna es de $838,3 m^3$, y mediante la compuerta en tiempo de estiaje ingresa a la laguna $864 m^3$ lo que permite que la pico central pueda operar las 15 horas diarias durante los 10 meses requeridos.

Según la norma ISO 50001, la cual es una guía para mejorar el uso de la energía en los sistemas siguiendo cuatro etapas: planear, hacer, verificar y actuar. La aplicamos de la siguiente manera:

En el paso de planear, se establece el volumen diario que necesita la pico central para operar durante las 15 horas requeridas.

En el paso de hacer, se propone el sistema de bombeo que reduzca el caudal necesario para la pico central.

El paso de verificar, mediante cálculos se puede observar como el volumen de agua necesario se reduce de $1296 m^3$ a $838,3 m^3$.

En el paso de actuar, se analizan los resultados obtenidos mediante cálculos, lo que muestra que el sistema de bombeo propuesto permite reducir el volumen de agua necesario para la generación durante 15 horas. Aunque no se realizan pruebas de campo esta verificación teórica muestra que el diseño representa una mejora en el uso del recurso hídrico.

4.4.3 Pruebas con carga al Generador

En la siguiente sección se presenta la Tabla 4.14, donde se detallan las cargas eléctricas utilizadas con sus respectivos consumos. Esta información es fundamental para las mediciones realizadas en las tablas subsiguientes, que incluyen mediciones en vacío y con carga, así como variaciones en el número de vueltas de una válvula reguladora del caudal.

Tabla 4.14: Tipos de Cargas y Consumo de Energía (Autor)

Tipo de carga	Consumo (Watts)
Plancha	1200
Cortadora	1500
Taladro 1	650
Taladro 2	1020
Taladro 3	650
Calefactor	1500
Pulidora	1200
Freidora	1700
Compresor	750
Sopladora	960

A continuación se presenta la Tabla 4.15, en la que se registran los valores de voltaje, THD, velocidad y frecuencia, correspondientes al aumento progresivo en el número de vueltas de la válvula reguladora de caudal (desde 9 hasta 36). Esta

información permite evaluar el impacto que tiene el ajuste de la válvula sobre dichas variables eléctricas y mecánicas.

Tabla 4.15: Mediciones en Vacío (Autor)

Nro Vueltas	Líneas	Voltaje (V)	THD	Velocidad (rpm)	Frecuencia (Hz)
9	L1	165.2	17.5	292.8	58.92
	L2	165.2	17.9	292.8	59.03
	L3	165	18	292.8	58.22
18	L1	227.3	17.6	405	59.8
	L2	227.3	17.7	405	59.9
	L3	227	17.9	405	59.72
27	L1	228	17.3	436	58.63
	L2	228.3	17.7	436	59.47
	L3	228	18	436	59.45
36	L1	230	17.3	492	58.95
	L2	230	17.8	492	59.01
	L3	230	17.95	492	59.85

Posteriormente, se presentan múltiples tablas en las que se registran mediciones bajo distintas cargas y con diferentes vueltas de la válvula, incluyendo diversos componentes y sus respectivos valores de voltaje, corriente, THD, potencia activa (kW), potencia aparente (kVA), velocidad (rpm) y frecuencia (Hz). Estas tablas permiten analizar el comportamiento del sistema en función de las variaciones en las cargas y los ajustes realizados en la válvula.

Tabla 4.16: Mediciones con una carga de 1200 W y con 9 vueltas a la válvula (Autor).

Nro Vueltas								9
Componente: Plancha								1200 W
Líneas	V (V)	I (A)	THD	P (kW)	S (kVA)	v (rpm)	Fp	F (Hz)
L1	85,9	7	99,9	-0,2	0,4	178	-0,615	64,52
L2	94,2	0	98,6	0	0	178	0	64,23
L3	96,4	0	99,01	0	0	178	0	63,12

Tabla 4.17: Mediciones con diferentes cargas y con 9 vueltas a la válvula (Autor).

Componentes: Plancha+taladro1								1850 W
Líneas	V (V)	I (A)	THD	P (kW)	S (kVA)	v (rpm)	Fp	F (Hz)
L1	75,9	6	14	-0,2	0,3	174	0	55,98
L2	80,8	1	16	-0,2	0,3	174	0,988	58,3
L3	84,4	0	19,2	0	0	174	0	59,9
Componentes: Plancha+taladro1+cortadora								3350 W
Líneas	V (V)	I (A)	THD	P (kW)	S (kVA)	v (rpm)	Fp	F (Hz)
L1	71,5	5	93,5	-0,2	0,3	155	-0,615	64,52
L2	77,2	1	4,7	-0,2	0,3	155	0,988	58,3
L3	79,4	2	98,4	-0,4	0,5	155	-0,987	60,07
Componentes: Plancha+taladro2+taladro 1+cortadora								4370 W
Líneas	V (V)	I (A)	THD	P (kW)	S (kVA)	v (rpm)	Fp	F (Hz)
L1	82,5	2	17,5	0	0,2	154	-0,503	63,97
L2	83,5	2	42,6	0	0,1	154	-1	62,1
L3	81,2	4	97,9	-0,2	0,3	154	-0,936	63,42

Tabla 4.18: Mediciones con diferentes cargas sumando 2800 W y con 18 vueltas a la válvula (Autor).

Nro Vueltas								18
Componentes: Taladro1+taladro3+calefactor								2800 W
Líneas	V (V)	I (A)	THD	P (kW)	S (kVA)	v (rpm)	Fp	F (Hz)
L1	117	10	4,7	-1,1	1,2	192	-0,985	62,12
L2	122,8	3	22,1	-0,3	0,4	192	-1	61,05
L3	134,2	0	15,8	0	0	192	0	58,96

Tabla 4.19: Mediciones con diferentes cargas sumando 4000 W y con 27 vueltas a la válvula (Autor).

Nro Vueltas								27
Componentes: Plancha+taladro1+taladro3+calefactor								4000 W
Líneas	V (V)	I (A)	THD	P (kW)	S (kVA)	v (rpm)	Fp	F (Hz)
L1	119,1	10	99,9	-1,1	1,2	242	-1	65,12
L2	130,4	2	36,2	-0,1	0,2	242	-1	65,36
L3	135,1	2	16,6	-0,1	0,2	242	-1	64,71

Tabla 4.20: Mediciones con diferentes cargas sumando 5200 W y con 27 vueltas a la válvula (Autor).

Nro Vueltas								27
Componentes: Plancha+taladro1+taladro3+calefactor+pulidora								5200 W
Líneas	V (V)	I (A)	THD	P (kW)	S (kVA)	v (rpm)	Fp	F (Hz)
L1	109,8	10	5,2	-1	1,1	225	-1	65,03
L2	112,5	5	99,4	-0,4	0,6	225	-0,812	64,97
L3	123,7	2	91,9	-0,1	0,2	225	-1	63,88

Tabla 4.21: Mediciones con diferentes cargas sumando 5200 W y con 36 vueltas a la válvula (Autor).

Nro Vueltas								36
Componente: Plancha+taladro1+taladro3+calefactor+pulidora								5200 W
Líneas	V (V)	I (A)	THD	P (kW)	S (kVA)	v (rpm)	Fp	F (Hz)
L1	129,7	1	36,5	0	0,1	193	-0,142	65,11
L2	107,3	11	29,7	-1,1	1,2	193	-1	64,53
L3	113,2	5	98,2	-0,4	0,6	193	-0,843	65,32

4.5 Análisis Económico

4.5.1 Costos de construcción

El costo de implementación del sistema de bombeo para la pico central incluye diversos componentes, entre los que se encuentran la bomba, las tuberías, los accesorios hidráulicos, los equipos del sistema fotovoltaico, así como los gastos asociados a la obra civil. Estos últimos comprenden la construcción del reservorio de captación y la estructura de soporte para los paneles solares.

A continuación, se presentan una serie de tablas con la información necesaria para llevar a cabo la implementación del proyecto. La Tabla 4.22 corresponde a los equipos que forman parte del sistema de bombeo, mientras que en la Tabla 4.23 se detallan los elementos que integran el sistema fotovoltaico. Por otro lado, las Tablas 4.24 y 4.25 incluyen los materiales previstos para la construcción e instalación de los sistemas, donde se especifican las características técnicas, cantidades requeridas y una breve descripción de cada componente.

Tabla 4.22: Sistema de bombeo (Autor).

Sistema de Bombeo				
Material	Cantidad	Descripción	P.Unitario	P.Total
Bombas 5,5kW	1	Bomba LOWARA NSC 80-200/55 200V	1675	1675
Tubería de PVC de 6"	14		36,47	510,58
Codo de 6" de 45 grados	3		9,88	29,64
Válvula check 6"	1		423,19	423,19
Válvula de pie 6"	1		660,19	660,19
Total				3383,98

Tabla 4.23: Sistema fotovoltaico (Autor).

Sistema Fotovoltáico				
Material	Cantidad	Descripción	P.Unitario	P.Total
Panel Fotovoltáico	13	Panel 650W	255	3315
Inversor	1	Inversor 6kW	1000	1000
Controlador	1	MPPT 450/220	2349	2349
Bateria	5	LifePo4 Battery 51,2V 200Ah	599	2995
Cable 4mm	1	100 m PV cable 4mm	199,99	199,99
Total				9858,99

Tabla 4.24: Estructura paneles solares (Autor).

Estructura Paneles Solares				
Material	Cantidad	Descripción	P.Unitario	P.Total
Tubo de acero galvanizado	14	tubo galvanizado cuadrado de 1 1/4" x 1.5mm-6m	13,41	187,74
Mano de obra			600	600
Total				787,74

Tabla 4.25: Reservorio 6,36 m³ (Autor).

Reservorio 6,36 m³				
Material	Cantidad	Descripción	P.Unitario	P.Total
Cemento	20	Cemento Holcim HS Saco de 50Kg	8,56	171,2
Arena m ³	3	Arena lista para hormigón	12,86	38,58
Grava m ³	3	Grava lavada 3/8	4	12
Acero de refuerzo	21	Varilla corrugada 1/2	11,41	239,61
Impermeabilizante	1	Impermax 20Kg	32,52	32,52
Mano de obra			260	260
Total				753,91

El costo de inversión total es de \$13430,71.

4.5.2 Costo de Mantenimiento

Se considerará el mantenimiento preventivo tanto para el sistema de bombeo como para el sistema fotovoltaico. En el caso del sistema fotovoltaico, se tomará en cuenta la vida útil de las baterías, las cuales deberán ser reemplazadas cada 10 años.

Tabla 4.26: Análisis de mantenimiento anual (Autor).

Actividad	Horas	Detalle	P. unitario	P. total
Sistema de bombeo				
Limpieza de filtros	2	Limpieza	15	30
Inspección de la bomba	2	Inspección de cables, protecciones	40	80
Sistema Fotovoltaico				
Limpieza de paneles solares	1	Limpieza de paneles con agua desionizada	25	25
Inspección del inversor	2	Pruebas de temperatura y conexiones	30	60
Inspección del controlador	2	Revisión de conexiones y pruebas de temperatura	30	60
Inspección del Banco de baterías	2	Revisión de baterías, conexiones y temperatura	25	50
Total				305

Tabla 4.27: Análisis de mantenimiento cada 10 años (Autor).

Actividad	Horas	Detalle	P. unitario	P. total
Sistema de bombeo				
Limpieza de filtros	2	Limpieza	15	30
Inspección de la bomba	2	Inspección de cables, protecciones	40	80
Sistema Fotovoltaico				
Limpieza de paneles solares	1	Limpieza de paneles con agua desionizada	25	25
Inspección del inversor	2	Pruebas de temperatura y conexiones	30	60
Inspección del controlador	2	Revisión de conexiones y pruebas de temperatura	30	60
Inspección del Banco de baterías	2	Revisión de baterías, conexiones y temperatura	25	50
Cambio de Baterías	9	Cambio de baterías cada 10 años	599	1799,91
Total				2104,91

4.5.3 Cálculo de retribución de acuerdo a lo generado

Con la implementación del sistema de bombeo, la pica central hidráulica podrá operar durante 15 horas diarias incluso en tiempo de estiaje garantizando la producción durante los 10 meses considerando que los 2 meses restantes estarán destinados al mantenimiento de todos los sistemas involucrados.

$$Ingreso = P * t * 0,1$$

Donde:

Ingreso: Ingreso anual de la Pico central

P: Potencia instalada

t: tiempo

0,1: Precio estimado del kWh

$$Ingreso = 4 * (15 * 30 * 10) * 0,1$$

$$Ingreso = \$1800$$

El resultado se analiza considerando que la pico central hidráulica genera 4kW, en un periodo de 15 horas diarias. Como se puede observar, el ingreso anual no es suficiente para cubrir el costo de la inversión inicial y los costos generados por el mantenimiento preventivo.

Para un mejor análisis se realizo el calculo del valor actual neto (VAN) y la tasa interna de retorno (TIR), que nos permite saber si el proyecto es rentable o es mejor abandonarlo.

A continuación se presenta la ecuación para la resolución del VAN.

$$VAN = -Inv + \sum_{j=1}^n \frac{Fj}{(1+i)^j} \quad (4.1)$$

Donde:

VAN: Indicador que muestra la rentabilidad de un proyecto

-Inv: Inversión inicial del proyecto

j: Tiempo en años

Fj: Flujo neto

i: tasa de inversión

Tabla 4.28: Flujo de Beneficio y Costo (Autor).

Años	Flujo de beneficio	Flujo de Costo	Beneficio Neto
0	0	-13430,71	-13430,71
1	1800	305	1495
2	1800	305	1495
3	1800	305	1495
4	1800	305	1495
5	1800	305	1495
6	1800	305	1495
7	1800	305	1495
8	1800	305	1495
9	1800	305	1495
10	1800	1304,95	495,05
11	1800	305	1495
12	1800	305	1495
13	1800	305	1495
14	1800	305	1495
15	1800	305	1495
16	1800	305	1495
17	1800	305	1495
18	1800	305	1495
19	1800	305	1495
20	1800	1304,95	495,05
Tasa(k)	0,1	VAN	-1237,09
TIR		7%	

Los resultados obtenidos muestran un Valor Anual Neto de -1237,09 calculado con una tasa de descuento del 10 % y una Tasa Interna de Retorno (TIR) del 7 %. Lo que indica que el proyecto no es rentable financieramente, ya que el VAN refleja perdidas y el TIR esta por debajo de la tasa mínima de retorno esperada, lo que indica que el proyecto genera un 7 % de rentabilidad anual promedio lo que es insuficiente si se espera al menos un 10 % de retorno para justificar la inversión por lo que no se recomienda ejecutar el proyecto.

CAPÍTULO 5

Conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros

5.1 Conclusiones

Con la información recolectada sobre el volumen del reservorio superior, que en este caso corresponde a la laguna ubicada en la Universidad Politécnica Salesiana Campus Paute, se determinó el tiempo máximo de operación de la pico central hidráulica. A partir de este dato, fue posible establecer también el tiempo máximo de funcionamiento del sistema de bombeo, así como obtener parámetros importantes para su dimensionamiento, como la longitud del tramo de succión y descarga, el caudal necesario y la presión requerida.

Con las medidas del caudal de agua realizadas en la tubería de salida de la pico central hidráulica permitió obtener el caudal mediante el método volumétrico. Con esta información, se determinó que la mejor ubicación para el reservorio de captación es junto a la tubería de salida. Intentar aprovechar el desfogue a mayor distancia no representa una mejora significativa en la potencia de la bomba y, en cambio, genera una desventaja: el retorno del agua hacia la turbina puede provocar cavitación y dañar los equipos.

Se determino en el dimensionamiento que a mayor diámetro de tubería disminuye las pérdidas de fricción, por lo que se dimensiona una tubería de 6 pulgadas para mantener la velocidad del agua dentro del rango permitido por la norma NEC 11, adicionalmente reducir las pérdidas por fricción.

El sistema de bombeo fue validado mediante dos entornos de simulación, ASPEN HYSYS y EPANET, con el primero se obtuvo la potencia necesaria para la bomba, la cual coincidió con los cálculos teóricos. Con el segundo es factible usar la curva característica de la bomba, también se obtuvieron resultados favorables. De este

modo, se concluyó que la bomba seleccionada, modelo LOWARA NSC 80-200/55, es adecuada para el sistema de bombeo propuesto.

Se logró dimensionar un sistema fotovoltaico capaz de alimentar el sistema de bombeo durante las 6 horas de operación diarias requeridas. Sin embargo, el alto consumo energético del bombeo que es de 33 kWh, se debe principalmente al desnivel existente entre el reservorio de captación y la laguna, ya que el sistema debe elevar el agua a una altura considerable, que exige un sistema solar de gran capacidad, lo que incrementa considerablemente el costo total del proyecto.

Al usar la energía fotovoltaica como fuente primaria de alimentación para el sistema de bombeo demuestra un impacto ambiental positivo al promover el uso de energía limpia reduce las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la generación de electricidad a partir de combustibles fósiles, contribuyendo a mejorar la calidad del aire en el ecosistema local.

Basados en la tabla 4.26 del Flujo de beneficio y costo, el análisis económico muestra que, debido al elevado consumo del sistema de bombeo y los costos relacionados presenta un valor Actual Neto (VAN) negativo de \$-1237,09 lo que indica que el proyecto no es rentable en las condiciones actuales. Aunque técnicamente su implementación es posible, los resultados obtenidos no justifican su ejecución por el bajo rendimiento y la alta inversión que requiere.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda realizar un estudio para determinar el caudal mínimo de bombeo necesario durante las seis horas de operación diaria, de forma que, restado al volumen que requiere la pico central, se logre mantener en la laguna un volumen cercano a los 864 m³ diarios disponibles en temporada de estiaje. Este análisis permitiría reducir el caudal de bombeo sin comprometer las 15 horas de operación diaria de la pico central, lo cual contribuiría directamente a disminuir la potencia de la bomba, el consumo energético del sistema fotovoltaico, así como el dimensionamiento y los costos de construcción.

La incorporación la rejilla en el reservorio de captación y la implementación de la compuerta permitiría una red de tuberías independientes para sistema de bombeo y para el riego esta adaptación es importante cuando el sistema de bombeo no

este en operación, evitaría desbordes en el el reservorio de captación y que afecte los dispositivos eléctricos. Además, el agua circulara de manera controlada por las tuberías correspondientes a cada uso.

La elección de la bomba debe ser apropiada, tomando en cuenta el caudal de bombeo que requerimos como la altura total de elevación, lo que evitara fallos por trabajo fuera de rango y prolonga la vida útil del sistema. Se sugiere considerar bombas centrifugas de alta eficiencia y validar su comportamiento mediante las curvas características brindadas por el fabricante.

Además, se propone estudiar la implementación de un sistema de alimentación híbrido para la bomba, combinando la energía solar con energía eólica aprovechando la velocidad y densidad del viento que hay en el sector. Esto ayudaría a reducir la dependencia total del sistema fotovoltaico, mejorar la estabilidad del funcionamiento y evitar el sobre dimensionamiento del sistema solar.

Anexos

- **Fotografías de las mediciones del caudal de agua**

A continuación, se presentan imágenes que documentan el proceso de medición del caudal de agua en dos ubicaciones distintas. La primera fue tomada a la salida del agua ya turbinada de la casa de máquinas y la segunda se tomó a una distancia de 5 metros de la primera ubicación, mostrando la recolección del agua para el análisis del caudal.



(a) Medición del caudal de agua con un balde de 20 litros de capacidad.



(b) Medición del caudal de agua usando una gaveta de 40 litros de capacidad.

Figura 5.1: Imágenes de las mediciones de caudal de agua.

- **Fotografías de la instalación de la tubería**

Se presentan las siguientes imágenes que documentan el proceso de instalación de la tubería a la salida del agua de la casa de máquinas:



(a) Proceso de instalación de la tubería.



(b) Vista de la tubería instalada.



(c) Ilustración de la tubería extendiéndose a lo largo del terreno.

Figura 5.2: Imágenes de la instalación de la tubería.

- Fotografías de las mediciones realizadas con carga al generador



(a) Analizador de calidad eléctrica y de redes de la marca FLUKE.



(b) Cargas eléctricas utilizadas.



(c) Tomando apuntes de sus respectivas mediciones.

Figura 5.3: Imágenes del proceso de medición realizado con carga al generador.

- **Anexo explicativo del SO2 en el proyecto de titulación:**

1. **Aspectos relacionados con Salud Pública y Medio Ambiente**

Si han sido considerados estos aspectos, se plantea el análisis para la implementación de un sistema de bombeo que dará soporte a una pico central ya operativa, el cual será alimentado mediante fuentes de energía renovable, específicamente a través de un sistema solar fotovoltaico.

Desde la perspectiva de la salud pública, el uso de energía limpia evita la emisión de contaminantes asociados a enfermedades respiratorias. Por lo tanto, el proyecto contribuye indirectamente a la mejora de la calidad del aire y a la salud de las comunidades cercanas.

En cuanto al impacto ambiental, el diseño del sistema procura un uso sostenible del recurso hídrico, ya que el agua turbinada es retornada a la laguna mediante un sistema de bombeo.

2. **Aspectos relacionados con Seguridad de Personas y Bienes**

En este proyecto se han considerado los aspectos vinculados con la seguridad de personas y bienes, tanto en la etapa de validación en campo como en el diseño del sistema propuesto. Para garantizar la viabilidad técnica del sistema de bombeo alimentado con energía solar, se llevaron a cabo mediciones en la pico central hidráulica con equipos específicos, a fin de verificar los niveles reales de generación eléctrica y obtener datos confiables para el dimensionamiento.

Estas actividades incluyeron también la medición del caudal disponible y la limpieza de la laguna de captación, realizadas en zonas de difícil acceso y con presencia de agua, lo cual representaba riesgos físicos. El equipo de trabajo utilizó elementos de protección personal adecuados, tales como calzado impermeable de seguridad, guantes resistentes y protección visual, considerando las condiciones del terreno y la presencia constante de agua. Estas acciones se ejecutaron conforme a los lineamientos establecidos por la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2266, la cual regula el uso obligatorio de equipos de protección personal para trabajos en ambientes expuestos a humedad, riesgos físicos y posibles contaminantes.

Posteriormente, en la fase de diseño, se incorporaron medidas de seguridad destinadas a evitar riesgos eléctricos y físicos en el entorno educativo donde se implementará el sistema. El campo fotovoltaico se instalará en un área cercada con malla metálica y acceso restringido, lo que evita la manipulación indebida por parte de personas no autorizadas y reduce la probabilidad de

accidentes. Adicionalmente, el sistema contribuirá a la seguridad interna del establecimiento al permitir la iluminación nocturna de las áreas verdes ubicadas dentro de la institución, mejorando la visibilidad y reduciendo el riesgo de incidentes en áreas transitadas.

3. Aspectos relacionados con el Bienestar de la Población

El desarrollo de este proyecto representa un aporte significativo al bienestar de la población, tanto interna como externa a la institución educativa donde se implementa.

Para la comunidad interna: estudiantes, docentes y personal que labora en la institución, el sistema contribuye a mejorar las condiciones de habitabilidad y seguridad mediante la iluminación nocturna de las áreas verdes, lo que permite un mayor aprovechamiento de estos espacios con menor riesgo de accidentes o situaciones inseguras.

Desde la perspectiva de la población externa, el proyecto ofrece un ejemplo funcional de aplicación de energías limpias, lo cual puede motivar a otras instituciones, comunidades o autoridades locales a replicar soluciones similares.

4. Factores Globales

El presente proyecto de titulación se encuentra alineado con los Objetivos de Desarrollo Sostenible y con diversas políticas energéticas, tanto a nivel global como nacional, que promueven el uso eficiente de la energía, el aprovechamiento de fuentes renovables y la mejora continua en la calidad de los procesos.

A nivel internacional, se consideran normas técnicas como la ISO 50001, que establece un marco para la gestión eficiente de la energía en las organizaciones. Su aplicación dentro de este proyecto contribuye a optimizar el rendimiento energético de la pico central hidráulica mediante la integración de un sistema de bombeo alimentado por energía solar fotovoltaica, lo que reduce la dependencia de fuentes convencionales.

De igual manera, se contempla la ISO 9001, norma reconocida globalmente para sistemas de gestión de la calidad, cuya inclusión busca asegurar que todas las etapas del proyecto desde el diseño hasta la ejecución cumplan con altos estándares de calidad, garantizando la seguridad, el seguimiento del proceso y mejora continua del sistema.

5. Factores culturales

La implementación del sistema de bombeo no involucra factores culturales locales que puedan verse afectadas, al ser un sistema de bombeo alimentado

con energía fotovoltaica destinado únicamente a la iluminación de áreas verdes dentro de la Universidad Politécnica Salesiana Campues Paute.

El sistema al ser instalado dentro de la institución no afecta espacios patrimoniales, sitios sagrados de la comunidad y sin relación directa con costumbres ancestrales o actividades tradicionales.

El sistema de bombeo al ser alimentado por energías fotovoltaica no genera contaminación y la bomba al estar instalada lejos de la zona urbana no genera contaminación auditiva lo cual puede molestar a los residentes. Su alcance es limitado.

Por lo tanto, el proyecto no implica conflictos culturales, y se considera que no es necesario un análisis sobre este factor, dado que el sistema no sobrepasa los límites de la unidad educativa y no tiene impacto con el entorno cultural.

6. Factores Sociales

Al desarrollar el proyecto en una institución educativa perteneciente a la Universidad Politécnica Salesiana, no genera cambios estructurales directos con la dinámica social de la población, su uso limitado únicamente para la institución la comunidad no tiene interacción directa. Además, al usar el agua de la laguna que se encuentra en la zona y el cauce de la quebrada producto de la propia naturaleza y con el uso de energías fotovoltaica no se ven afectados los servicios básicos, ni la movilidad de la población.

Por tanto, no se identifican efectos que intervengan con el desarrollo de la comunidad ni de la calidad de vida. De tal manera que este factor no tiene peso dentro del proyecto de titulación.

7. Factores Ambientales

El proyecto de titulación considera el uso de energías renovables, en específico el uso de un sistema fotovoltaico para la alimentación del sistema de bombeo, lo que representa un aporte positivo con el medio ambiente al no depender de combustibles fósiles. Los sistemas involucrados no producen emisiones de gases contaminantes ni genera residuos tóxicos.

Con el aprovechamiento de la laguna y el cauce de la quebrada propias de la naturaleza no existe alteración con el entorno lo que podría afectar el ecosistema. También se evita el desperdicio de agua mediante la recirculación, lo que nos permite extender el uso de la pico central y el control del volumen de agua necesario. Por lo cual el proyecto cuenta con un enfoque de sostenibilidad ambiental sin impactos negativos.

8. Factores Económicos

El proyecto de titulación incluye un análisis económico que permite determinar la viabilidad de implementar un sistema de bombeo alimentado con energía fotovoltaica. Este análisis considera los costos de inversión inicial, incluyendo la construcción de la infraestructura, la adquisición de equipos y el mantenimiento preventivo anual del sistema. Se elabora la proyección de los ingresos anuales que se podría obtener por la generación de energía eléctrica de la pico central hidráulica. Además, a esto se le incluye el análisis del indicador financiero el Valor Actual Neto (VAN) que nos permite evaluar si los beneficios futuros justifican la inversión inicial, convirtiendo al análisis económico en un elemento fundamental para la toma de decisiones sobre la ejecución del proyecto.

Tabla 5.1: Áreas del Trabajo de Grado

Título del Trabajo:				
Restricciones múltiples (dos o más)	Accesibilidad		Estética	
	Códigos		Construtibilidad	pp.32,40.
	Costos		Ergonomía	
	Extensibilidad		Funcionalidad	pp.44-51
	Interoperabilidad		Consideraciones Legales	
	Mantenibilidad	pp. 68-69.	Manufacturabilidad	
	Mercadeo		Política	
	Regulaciones		Cronogramas	
	Normativas	pp. 60,62-63.	Sostenibilidad	pp. 58.
	Usabilidad		Otros:	
Normas relevantes (dos o más)	ISO 50001	pp. 62-63.		
	ISO 9001	pp. 60.		
Elementos del proceso	Identificación de oportunidades	pp. 27,61-62.	Generación de soluciones múltiples	
	Desarrollo de requerimientos	pp. 5-6,66-68.	Evaluación de soluciones	
	Procesos iterativos		Consideración de riesgos	
	Realizar compromisos o tratos			
Basado en trabajos anteriores	Protecciones		Iluminación	
	Optimización de sistemas		Alta Tensión	
	Energías alternativas	pp.36-40.	Distribución	
	Máquinas eléctricas		Otros temas	

BIBLIOGRAFÍA

- [1] G. Ardizzon, G. Cavazzini, and G. Pavesi, “A new generation of small hydro and pumped-hydro power plants: Advances and future challenges,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 31, pp. 746–761, 2014.
- [2] J. Deane, B. Ó Gallachóir, and E. McKeogh, “Techno-economic review of existing and new pumped hydro energy storage plant,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 4, pp. 1293–1302, 2010.
- [3] W. F. Pickard, “The history, present state, and future prospects of underground pumped hydro for massive energy storage,” *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. 2, pp. 473–483, 2012.
- [4] J. Vizhñay Muñoz, “Factibilidad de la norma iso 50001 en la central hidroeléctrica ‘carlos mora carrión,’,” tech. rep., Universidad de Cuenca, 2013.
- [5] F. A. Alarcón Cáceres, “Diseño conceptual de centrales hidroeléctricas a bombeo usando agua desalinizada,” 2022.
- [6] D. Paramio Sastre, “Análisis dinámico del funcionamiento de la central hidroeléctrica reversible de soria-chira,” tech. rep., Universidad Politécnica de Madrid, 2018.
- [7] C. O. Montiel Chevez, C. A. Álvarez Vivar, and D. Zabala Ortíz, Gonzalo Rodolfo, “Diseño de un sistema de micro central hidroeléctrica de almacenamiento por bombeo para fines didácticos,” tech. rep., ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL, 2022.
- [8] J. A. Olivares Arriagada, “Adaptación central hidroeléctrica los molles a una central a bombeo,” 2023.
- [9] J. L. Carabajo Ávila and S. P. Calle Garcia, “Diseño y modelamiento de un sistema de regulación de voltaje para un generador de una pico central eléctrica de 5kw,” tech. rep., Universidad Politécnica Salesiana, 2023.

- [10] O. M. Orellana Yanza, “Análisis técnico - económico del recurso hídrico aplicado a la pico central instalada en el cantón paute,” tech. rep., Universidad Politécnica Salesiana, 2023.
- [11] M. Google Maps, 2025. 10/04/2025.
- [12] F. Saravia, E. Romero, R. Cortijo, M. Nater, D. Iparraguirre, and J. Saavedra, “Centrales hidroeléctricas reversibles: identificación de potencial y necesidades regulatorias en latinoamérica,” tech. rep., 2022.
- [13] S. M. Cabrales Pitre, “Análisis del comportamiento de centrales hidroeléctricas de bombeo en la operación de sistemas interconectados,” 2015.
- [14] N. E. DS, “Energía hidroeléctrica de almacenamiento por bombeo,” 2022. 10/04/2025.
- [15] A. Beltrán, H. Gracia-León, D. Rodríguez-Urrego, and L. Rodríguez-Urrego, “Diseño y cálculo de una central híbrida solar-hidráulica en gran canaria,” *Dyna*, vol. 85, no. 206, pp. 250–257, 2018.
- [16] J. J. Inga Aguilera, “Conversión de pequeñas centrales hidroeléctricas en sistemas reversibles usando energía eólica,” tech. rep., Universidad Politécnica Salesiana, 2015.
- [17] P. C. C. A. Palacios Carmona Gilber Stalyn, “Diseño y simulación mediante software especializado de la generación de electricidad con paneles solares fotovoltaicos para la distribuidora comercial paredes ubicada en la provincia de sucumbíos,” tech. rep., Universidad Politécnica Salesiana, 2022.
- [18] Lufussa, “Energía renovable,” 2022. 10/04/2025.
- [19] CELEC, “Central hidroelÉctrica manduriacu,” 2015. 10/04/2025.
- [20] E. SMART CITY, “La planta fotovoltaica en la isla isabela,” 2019. 10/04/2025.
- [21] G. B. D. A. Morales Peñafiel Adrián Joel, “Dimensionamiento e implementación de paneles fotovoltaicos aplicados al área residencial en un sector costero de la provincia del guayas, ecuador,” tech. rep., Universidad Politécnica Salesiana, 2022.
- [22] CONELEC, “Atlas solar del ecuador con fines de generaciÓn elÉctrica,” 2008. 10/04/2025.
- [23] M. Iberdrola, “Nueva vida para paneles fotovoltaicos,” 2023. 10/04/2025.
- [24] ecofener, “Tipos de paneles solares.” 10/04/2025.

- [25] Solargis, “Irradiación normal directa,” 2019. 10/04/2025.
- [26] LENNTECH, “Lowara e-nsc series,” 2016. 10/04/2025.
- [27] S. Solar, “Himax 6n 675-705w. topcon half cell monocrystalline single-glass module,” 2024. 10/04/2025.
- [28] T. ENERGY, “Split phase off grid hybrid inverter 1kw-12kw,” 2025. 10/04/2025.
- [29] AutoSolar, “Regulador smart solar mppt rs 450v 200a mc4 victron,” 2025.
- [30] T. ENERGY, “Powerwall lithium battery 5kwh,” 2025. 10/04/2025.
- [31] S. E. d. N. INEN, “Nte inen-iso 9001,” 2016. 10/04/2025.