



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**ANÁLISIS TÉCNICO - ECONÓMICO DEL RECURSO HÍDRICO APLICADO A LA
PICO CENTRAL INSTALADA EN EL CANTÓN PAUTE**

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

AUTOR: OLIBER MARCELO ORELLANA YANZA

TUTOR: ING. FREDDY FERNANDO CAMPOVERDE ARMIJOS

Cuenca - Ecuador

2023

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Oliber Marcelo Orellana Yanza con documento de identificación N° 0104265665, manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo 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, 20 de octubre del 2023

Atentamente,



Oliber Marcelo Orellana Yanza

0104265665

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

Yo, Oliber Marcelo Orellana Yanza con documento de identificación N° 0104265665, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del Proyecto técnico: “Análisis técnico - económico del recurso hídrico aplicado a la pico central instalada en el Cantón 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, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 20 de octubre del 2023

Atentamente,



Oliber Marcelo Orellana Yanza

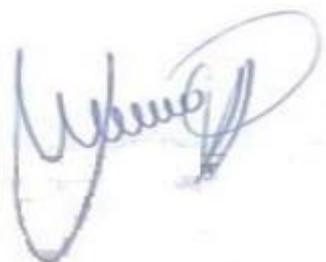
0104650619

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Freddy Fernando Campoverde Armijos con documento de identificación N° 0102339470, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: ANÁLISIS TÉCNICO - ECONÓMICO DEL RECURSO HÍDRICO APLICADO A LA PICO CENTRAL INSTALADA EN EL CANTÓN PAUTE, realizado por Oliber Marcelo Orellana Yanza con documento de identificación N° 0104265665, 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, 20 de octubre del 2023

Atentamente,



Ing. Freddy Fernando Campoverde Armijos.

0102339470

AGRADECIMIENTO

“En primer lugar le agradezco a mi madre que siempre me ha brindado su apoyo incondicional para poder cumplir todos mis objetivos personales y académicos. Es ella quien con su cariño siempre me ha impulsado para perseguir mis metas, mis hermanos en especial a Maribel que me ha apoyado para poder culminar este un sueño más en mi vida, a mis suegros que confiaron en mí para poder continuar con mis estudios y me brindaron su apoyo incondicional”.

“Un agradecimiento de manera especial a mi tutor por su dedicación y paciencia, sin sus palabras y correcciones precisas no hubiese podido lograr llegar a esta instancia tan anhelada. Gracias por su guía y todos sus consejos”.

“A todos mis docentes que en el transcurso de mis estudios supieron transmitir sus conocimientos y así lograr llegar a esta meta final”.

“A esta prestigiosa institución que me ha exigido tanto y al mismo tiempo me ha permitido la oportunidad de alcanzar un título muy importante para el desarrollo personal y colectivo”.

DEDICATORIA

“Dedicado con amor y gratitud,

A mi querida esposa Johanna, quien ha sido mi mayor apoyo y fuente inagotable de inspiración a lo largo de esta travesía académica. Tu amor, paciencia y aliento han sido mi motor para alcanzar este logro. Tu constante apoyo y comprensión han sido la luz que ha iluminado mi camino.

A mis adorables hijos, quienes han sido mi mayor motivación y razón de ser. Cada paso que ha dado en este camino ha estado guiado por el deseo de brindarles un ejemplo de perseverancia y dedicación. Su amor y sonrisas han sido mi mayor recompensa en este viaje.

Esta tesis es un tributo a ustedes, mi familia, por estar a mi lado en cada paso de este emocionante viaje. Gracias por ser mi razón de esfuerzo constante y mi fuente de felicidad. Cada logro que alcance siempre llevará su nombre en mi corazón.

Con todo mi amor y gratitud

OLIBER”.

Índice

1. CAPÍTULO I	4
1.1. Antecedentes	4
1.2. Problema de estudio	5
1.3. Justificación	6
1.4. Objetivos	7
1.4.1. Objetivo principal	7
1.4.2. Objetivos específicos	7
1.5. Geografía del Cantón	7
1.6. Ubicación del proyecto de la PCH	8
1.7. Precipitación en el Cantón	9
2. CAPÍTULO II	12
2.1. Pico Centrales Hidráulicas	12
2.2. Subsistemas de una PCH	14
2.3. Turbinas hidráulicas	15
2.3.1. Componentes de la turbina	16
2.3.2. Principios de funcionamiento	17
2.4. Generador eléctrico.	17
2.4.1. Generador trifásico de imanes permanentes	18
2.5. Regulación y control	20
2.5.1. Tipos de válvulas de control	21
2.6. Aprovechamiento de una central hidráulica	21
2.6.1. Caudal de servidumbre	22
2.6.2. Caudal de equipamiento	22
2.6.3. Caudal mínimo técnico	22
2.7. Costo de la energía	24
2.8. Impacto medioambiental	24
2.9. Energía Hidráulica	25
2.9.1. Potencia Hidráulica	26
2.10. Velocidad Síncrona	26
2.11. Potencia y Par de un motor y un generador eléctrico	27
2.12. Cálculo de embalse	28
2.13. Cálculos de potencia a la salida del generador	30
3. CAPÍTULO III	33
3.1. Cálculo de torque del generador	35
3.2. Cálculo de obras civiles	39
3.2.1. Tubería	39
3.2.2. Construcción de la casa de máquinas	39

3.3. Elementos que componen la pico central	40
4. CAPÍTULO IV	41
4.1. Análisis de resultados	41
4.1.1. Análisis Técnico del recurso hídrico	41
4.1.2. Tiempo de llenado del reservorio	42
4.1.3. Tiempo de vaciado del reservorio	44
4.2. Análisis económico	48
4.2.1. Costos de construcción	49
4.2.2. Análisis de operación de la planta	49
4.2.3. Análisis de mantenimiento	49
4.2.4. Cálculo de retribución de acuerdo a la generación	50
5. Conclusiones	53
6. Recomendaciones	54

Índice de tablas

1. Tipos de Válvulas [14].	21
2. Parámetros [19]	28
3. Características generales [9].	35
4. Relación Potencia - Par (Autor).	37
5. Tipo de cargas (Autor)	38
6. Volumen de agua según los meses de lluvia (Autor).	42
7. Equipos con sus respectivas potencias (Autor).	45
8. Análisis de diferentes cargas (Autor).	48
9. Rubros generados por mantenimiento (Autor).	49
10. Resultado del VAN con 2,74 (kW) (Autor).	51
11. Resultado del VAN con 4 kW (Autor).	52

Índice de figuras

1. Cantón Paute [7].	8
2. Unidad Educativa Agronómico Salesiano [16].	9
3. Precipitación por mes. [7]	10
4. Días de lluvia por mes. [7]	10
5. Turbina Michell-Banki. [12]	16
6. Impacto en álabes. [12]	17
7. Generador con rotor de imanes permanentes [9].	19

8.	Dispositivo para regulación [14].	20
9.	Diversos saltos de agua [25].	23
10.	Impacto ambiental [16].	25
11.	Teodolito electrónico [16].	29
12.	Imagen procesada del levantamiento (Autor).	29
13.	Características técnicas de la tubería PVC [17].	32
14.	Perfil del tramo de tubería [28].	39
15.	Volumen de agua (Autor)	42
16.	Máquinas utilizadas (Autor).	46
17.	Análisis de Potencia (Autor).	46

1. CAPÍTULO I

1.1. Antecedentes

En la última década, la creciente demanda mundial de energía eléctrica ha llevado a un incremento significativo en la construcción y el desarrollo de plantas de generación eléctrica renovable. Entre estas fuentes de energía renovable, la hidroeléctrica se destaca como una opción sostenible y confiable, capaz de proporcionar una fuente constante de electricidad. En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo realizar un análisis técnico-económico del recurso hídrico aplicado a una Pico Central.

La Pico Central, ubicada en el Cantón Paute de la provincia del Azuay en Ecuador, es una planta hidroeléctrica que utiliza el potencial energético de un embalse que se dispone en la zona para generar electricidad. La cual tiene una capacidad instalada de 5 kilovatios. Sin embargo, para comprender plenamente el potencial de esta central hidroeléctrica y evaluar su viabilidad económica, es esencial realizar un análisis técnico y económico.

En términos técnicos, el análisis del recurso hídrico implica evaluar la cantidad de agua disponible para la generación. Para ello, se deben considerar variables como la precipitación anual, los caudales históricos, la topografía del área y la disponibilidad estacional del recurso. Estos datos permitirán estimar la capacidad de generación de la planta y su rendimiento a lo largo del tiempo.

Desde un punto de vista económico, es fundamental realizar un análisis de costos y beneficios para determinar la rentabilidad de la planta hidroeléctrica. Esto implica evaluar los costos de inversión inicial, los costos operativos y de mantenimiento. Además, se deben considerar factores como los posibles impactos ambientales y sociales que puede generar la instalación de proyectos de esta índole.

Investigaciones anteriores han demostrado la importancia del análisis técnico-económico en la evaluación de proyectos hidroeléctricos. Por ejemplo, Cañar Ramírez [26], llevó a cabo un estudio similar en una planta hidroeléctrica ubicada en una región montañosa, concluyendo que el análisis técnico detallado del recurso hídrico fue esencial para estimar la generación de energía y la rentabilidad del proyecto.

Es esencial por tanto analizar la disponibilidad del recurso, puesto que es el

componente principal para el desarrollo de estos proyectos [24]. En el caso particular del estudio e implementación en el Cantón Paute, existe un embalse alimentado por una corriente que acumula una cantidad considerable de agua durante el invierno. Ésta se utiliza para activar una turbina, la cual está conectada a un generador eléctrico de imanes permanentes, permitiendo así la conversión de energía cinética en electricidad. El movimiento de la turbina se produce gracias al flujo de agua que proviene desde el embalse hacia los álabes de la turbina que está instalada dentro de una mini casa de máquinas.

Según Blanco, asesor técnico del proyecto de una pequeña central hidroeléctrica en Honduras, este tipo de centrales son importantes para suministrar electricidad de manera segura en áreas alejadas de las redes convencionales. Los resultados obtenidos han sido satisfactorios, logrando generar una potencia máxima de 3kW que abastece a un par de fincas. Gracias a este proyecto, estas fincas han tenido más oportunidades para su desarrollo [20].

1.2. Problema de estudio

La problemática del consumo de energía es de carácter global, por lo que se vuelve necesaria la búsqueda de nuevos recursos para la producción de energía eléctrica. Ecuador cuenta con una gran cantidad de recursos hídricos debido a su ubicación geográfica en la región andina y a su extensa red de ríos y cuencas hidrográficas. Estas características son de gran importancia dado que permiten aprovechar las condiciones de altura y el abastecimiento de agua para diversas actividades. Entre estas actividades, destaca la generación eléctrica, que en la provincia del Azuay ha sido y seguirá siendo un aporte significativo para el Sistema Nacional Interconectado.

En esta línea de ideas, el problema que se aborda en esta investigación se relaciona con la necesidad de evaluar y comprender la energía hidráulica primaria aplicada a la pico central instalada, desde una perspectiva técnica y económica. En primer lugar, se busca analizar la disponibilidad y características del recurso en el sitio que se encuentra el proyecto, lo que implica estudiar la cantidad de agua disponible, su caudal, su variabilidad estacional, entre otros factores. Esta información es fundamental para comprender la viabilidad y la capacidad de generación de la pico central.

En segundo lugar, se plantea la necesidad de evaluar la eficiencia y el rendimiento de la pico central en términos técnicos. Esto implica analizar el funcionamiento de la turbina y el generador eléctrico, así como los sistemas de control y distribución de energía. Se deben considerar aspectos como la

potencia generada, la eficiencia energética, y la estabilidad del suministro eléctrico.

Además del análisis técnico, se busca realizar un estudio económico para evaluar la rentabilidad y la viabilidad financiera de la pico central. Es decir considerar los costos de construcción, operación y mantenimiento, para determinar la sostenibilidad económica del proyecto.

En la provincia del Azuay, así como en la Región Amazónica y la Región Interandina, se encuentran condiciones favorables para la implementación de pequeños proyectos hidroeléctricos que puedan complementar y contribuir a la generación eléctrica del país. Se sabe que la generación masiva de electricidad requiere una inversión considerable, además, conlleva riesgos ambientales significativos; por lo tanto, se debe explorar alternativas que aprovechen las fuentes de energía potencial presente en lagos, riachuelos y manantiales naturales. De esta manera, se pueden instalar pequeñas centrales hidroeléctricas que contribuyan a la generación de electricidad y satisfagan demandas que actualmente no están siendo atendidas o a su vez fortalecer el sistema eléctrico.

Aunque la mayoría de las comunidades actualmente tienen acceso a la electricidad, todavía existen sectores que carecen de este servicio, especialmente en áreas alejadas donde la instalación de redes eléctricas convencionales resulta compleja. Un ejemplo claro son las comunidades nativas sobretodo en la Amazonia ecuatoriana [15]. Por esta razón, se están llevando a cabo estudios para proveer energía eléctrica segura y limpia a estos sectores.

1.3. Justificación

En la actualidad, es importante buscar fuentes de generación eléctrica que sean limpias y seguras debido a la devastación ambiental que enfrenta el planeta. La contaminación causada por diversas industrias, incluyendo la generación eléctrica, ha tenido un impacto negativo en el entorno, por lo que resulta imperativo encontrar soluciones que minimicen los efectos negativos y preserven el medio ambiente. En este sentido, las pequeñas centrales de hidro generación son una alternativa eficiente ya que pueden ser instaladas en lugares que cuentan con recursos naturales en cantidades limitadas, sin causar alteraciones graves en el entorno.

Esto permitirá determinar si existe una base sólida para el aprovechamiento

de este recurso en la generación hidroeléctrica, considerando aspectos como el caudal, la estacionalidad y la calidad del agua. Además, se requerirá evaluar la eficiencia y el rendimiento de la pico central en términos técnicos, para asegurar su funcionamiento óptimo.

Por ende, la justificación de este trabajo se basa en la necesidad de buscar alternativas de generación de energía eléctrica que sean sostenibles y respetuosas con el medio ambiente. La utilización del recurso hídrico para la generación eléctrica representa una fuente de energía renovable y limpia que puede contribuir a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y a la mitigación del cambio climático.

Así mismo este proyecto es pertinente pues tiene como objetivo proporcionar información relevante y guías técnicas referentes para la implementación de proyectos similares en otras ubicaciones con características hidrológicas similares. Esto permitirá replicar y adaptar el conocimiento adquirido en el Cantón Paute a otras áreas geográficas, maximizando así el aprovechamiento del agua en la generación de energía eléctrica a nivel regional y nacional.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo principal

Realizar un análisis técnico y económico de la Pico Central de 5 kW instalada en el cantón Paute.

1.4.2. Objetivos específicos

- Recopilar información del caudal y volumen del embalse en el lugar de emplazamiento de la pico central.
- Cuantificar la capacidad de generación de energía en el sitio, con base en el caudal, el volumen del embalse y los equipos existentes.
- Realizar una aproximación del costo de la energía generada por la pico central.

1.5. Geografía del Cantón

El Cantón Paute fue establecido el 26 de febrero de 1860 y tiene una población de 29.011 habitantes. Limita al noreste con la provincia del Azuay, al norte

con el Cantón Azogues, al este con los Cantones Sevilla de Oro y Guachapala, al sur con el Cantón Gualaceo y al oeste con el Cantón Cuenca.

Se encuentra ubicado entre 2100 y 2300 metros sobre el nivel del mar y está conectado a la cordillera oriental. Las temperaturas en el área oscilan entre 15 y 25 °C. Además, el Cantón es reconocido por su papel en proyectos hidroeléctricos y su contribución a la generación de energía para gran parte del territorio nacional [7].

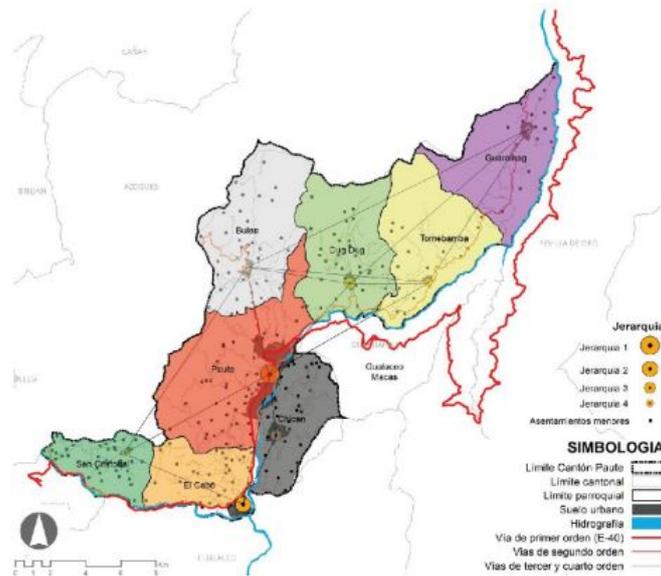


Figura 1: Cantón Paute [7].

El primer complejo construido en la zona es la represa Daniel Palacios, que cuenta con su central Molino. Por otro lado, el complejo Hidroeléctrico Paute Integral aprovecha el caudal del río Paute e integra cuatro centrales hidroeléctricas: Mazar, Molino, Sopladora y Cardenillo. Se estima que una vez concluido el proyecto, contribuirá con aproximadamente 2.243 MW de energía al país [7].

1.6. Ubicación del proyecto de la PCH

El proyecto se encuentra ubicado en los terrenos pertenecientes al campus de la Universidad Politécnica Salesiana sede Paute como se observa en la Figura 2, en este sitio se cuenta con un reservorio de agua, el mismo que es utilizado para diferentes propósitos que benefician directamente a la unidad educativa Agronómico Salesiano, de este reservorio se pretende utilizar el agua para

mover una turbina ubicada a 85m de distancia aproximadamente entre el reservorio y la casa en donde se encuentra instalada la turbina y el generador eléctrico.



Figura 2: Unidad Educativa Agronómico Salesiano [16].

1.7. Precipitación en el Cantón

Según los registros recopilados desde la página del INAMHI, se observa una variabilidad significativa en los niveles de precipitación a lo largo del año como podemos ver en la Figura 3. El mes de marzo destaca como el más lluvioso, con un promedio de 157 mm de precipitación. Por otro lado, el mes de agosto muestra una menor cantidad de lluvia, con un promedio de 35 mm. Estas cifras proporcionan información importante para comprender la disponibilidad y la distribución del recurso hídrico en la zona [2].

Se debe tener en cuenta que los efectos del cambio climático han generado alteraciones considerables en los patrones de precipitación en todo el mundo,

bajo este contexto en el Cantón Paute no ha sido una excepción. Estos cambios han ocasionado una reducción notable en los días de lluvia en la zona de emplazamiento de la PCH. En algunos casos, se han experimentado períodos de sequía absoluta, lo que ha tenido un impacto directo en el embalse y ha provocado una falta de agua durante períodos prolongados, incluso de meses. Esta situación plantea un desafío significativo para el funcionamiento óptimo y la capacidad de generación eléctrica de la PCH.

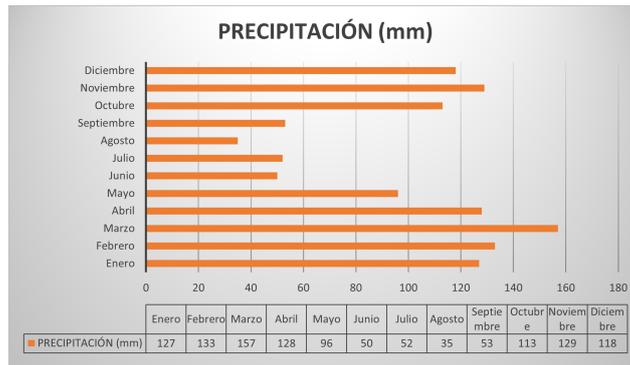


Figura 3: Precipitación por mes. [7]

Además, es importante resaltar que los datos actuales sobre los días promedio de lluvia también están sujetos a cambios debido al impacto continuo del cambio climático. El análisis de la hidro generación se basa en información histórica de períodos anteriores, lo que proporciona una idea aproximada de cuántos días se puede esperar que la generación eléctrica opere a su máxima capacidad según la Figura 4. Sin embargo, es necesario monitorear y actualizar constantemente estos datos para adaptarse a las variaciones y tendencias actuales [2].



Figura 4: Días de lluvia por mes. [7]

En conclusión, el estudio de la precipitación en el Cantón Paute es esencial para comprender la disponibilidad del recurso hídrico y evaluar la viabilidad técnica y económica de la PCH instalada en la zona. Los registros muestran una variabilidad estacional significativa en los niveles de precipitación, pero también es necesario considerar los impactos del cambio climático, que han generado una reducción en los días de lluvia y períodos de sequía absoluta. Estos factores deben considerarse al analizar el potencial de generación hidroeléctrica y garantizar un enfoque sostenible y adaptable en el aprovechamiento de la energía primaria del agua.

2. CAPÍTULO II

2.1. Pico Centrales Hidráulicas

Las Pico Centrales Hidráulicas (PCH) son una opción a considerar al analizar proyectos de generación eléctrica en áreas no abastecidas por el Sistema Interconectado Nacional (SIN). Estas presentan características particulares que las hacen adecuadas para este tipo de proyectos. En primer lugar, requieren una fuente de agua de tamaño reducido y desniveles de pequeña altura. Esto significa que pueden aprovechar arroyos o cursos de agua de menor tamaño para poder generar energía [20] y [24].

Además, las Pico Centrales se distinguen por su bajo impacto ambiental, durante la construcción de las mismas. Esto es importante en una época en la que la conciencia sobre la preservación del medio ambiente se ha vuelto fundamental para el bienestar humano y la sostenibilidad del planeta.

La carencia de recursos energéticos tiene un impacto significativo en diversos aspectos de la sociedad, como la salud, la educación y el empleo. Por lo tanto, resulta importante diseñar e implementar proyectos, como las pico centrales [6].

El acceso a la energía eléctrica es fundamental para el desarrollo socio económico de una comunidad. La disponibilidad de electricidad permite mejorar los servicios de salud al proporcionar iluminación adecuada, equipos médicos funcionales y refrigeración para medicamentos y vacunas. Además, la energía eléctrica es un factor clave en la educación, ya que facilita el uso de tecnologías de información y comunicación, proporcionando acceso a recursos educativos en línea y oportunidades de aprendizaje mejoradas.

Asimismo, la electricidad juega un papel crucial en el ámbito laboral al impulsar el desarrollo de actividades productivas y la creación de empleo. Con acceso a la energía, las comunidades pueden implementar soluciones innovadoras, establecer negocios locales y mejorar la eficiencia de las operaciones existentes. Esto contribuye a fortalecer la economía local y reducir la dependencia de recursos externos.

Las Pico Centrales Hidroeléctricas (PCH) son centrales de generación de capacidad reducida, con una capacidad típica que oscila entre 1 y 5 kW de energía eléctrica. Debido a esta capacidad limitada, estas centrales son adecuadas para abastecer a zonas pequeñas con un consumo relativamente bajo.

A pesar de esto, su implementación resulta fundamental para proporcionar sustentabilidad energética a dichas comunidades[23].

El tamaño compacto de las Pico Centrales les permite adaptarse a las necesidades específicas de áreas o comunidades con un consumo eléctrico moderado. Estas centrales pueden satisfacer la demanda de electricidad en zonas rurales, aldeas aisladas o áreas remotas que no están conectadas a la red eléctrica principal.

La OLADE, en su informe titulado "Potencial Hidroeléctrico en América Latina y el Caribe", ha establecido una clasificación de las centrales hidroeléctricas en función de su potencia. Según este informe, se distinguen las siguientes categorías principales [4].

Grandes Centrales Hidroeléctricas: Son aquellas que tienen una capacidad de generación superior a 100 MW. Estas centrales se caracterizan por su alta capacidad de producción de energía y su capacidad para abastecer grandes áreas o sistemas interconectados [23].

Medianas Centrales Hidroeléctricas: Comprenden las centrales con una capacidad de generación entre 1 MW y 100 MW. Estas centrales son adecuadas para abastecer áreas más pequeñas o sistemas de distribución localizados[23].

Microcentrales: Son aquellas centrales que poseen una capacidad de generación hasta los 50 kW, y pueden funcionar con distintos valores de saltos de agua que van desde los 15m hasta valores superiores a los 50 m[23].

Pico Centrales Hidroeléctricas: Son las centrales de menor capacidad, generalmente entre 1 kW y 5 kW. Estas centrales son ideales para suministrar energía a zonas rurales, comunidades aisladas o pequeñas instalaciones de consumo energético[23].

Estas categorías permiten una mejor comprensión de la capacidad de generación y el alcance de cada tipo de central hidroeléctrica. A través de esta clasificación, se facilita la identificación y el análisis de las diferentes opciones de suministro de energía hidroeléctrica de acuerdo con las necesidades y características específicas de cada región [18].

2.2. Subsistemas de una PCH

Las partes o subsistemas de una Pico Central Hidráulica (PCH) pueden variar en función de la fuente de energía primaria que activa la turbina. En el caso de una planta de hidro generación, generalmente se pueden identificar los siguientes subsistemas que componen una pico central hidráulica.

Captación de agua: Este subsistema se encarga de captar el agua de la fuente hídrica, como un río o arroyo, utilizando estructuras como presas, compuertas o canalizaciones.

Embalse o canal de conducción: En este subsistema, el agua captada se almacena en un embalse o se conduce a través de canales hacia el área de aprovechamiento de la central.

Cámara de carga: Es el punto donde el agua ingresa a la central hidráulica y se distribuye hacia las turbinas.

Turbinas: Las turbinas son el corazón de la central hidráulica. Aquí la energía hidráulica del agua en movimiento se convierte en energía mecánica a través de las turbinas. Los tipos comunes de turbinas utilizadas en centrales de gran generación son las turbinas de acción (como las turbinas Pelton) o las turbinas de reacción (como las turbinas Francis o Kaplan), en el caso puntual de este proyecto se utiliza una turbina Michell Banki que se acopla a las características del flujo de agua existente en el sitio.

Generadores: En estos elementos la energía mecánica producida por las turbinas se convierte en energía eléctrica mediante los generadores. Los generadores síncronos son los más comunes en las pico centrales hidráulicas y se encargan de generar corriente alterna.

Sistema de control y regulación: Este abarca el conjunto de dispositivos y sistemas de control que monitorean y regulan el funcionamiento de la central, asegurando una operación segura y eficiente.

Sistema de evacuación de energía: Es el encargado de transmitir la energía eléctrica generada hacia la red de distribución eléctrica o hacia los puntos de consumo.

Cabe mencionar que esta descripción de subsistemas es una visión general y que la configuración y especificaciones exactas pueden variar dependiendo

del diseño y tamaño de la pico central hidráulica.

Por otra parte a continuación se analiza cada subsistemas dentro del emplazamiento del proyecto y se detalla a continuación [4].

- Obra civil.
- Turbinas hidráulicas y transmisiones mecánicas.
- Generadores eléctricos.
- Subsistema de regulación y control.
- Subsistema de evacuación de energía.

Dentro del ámbito de la obra civil en una pico central hidráulica, se incluyen elementos de retención y almacenamiento de agua, que permiten acumular una cantidad de agua adecuada para activar la turbina y transmitir su energía cinética al eje del generador, convirtiendo así la energía mecánica en energía eléctrica. Para pequeñas centrales, puede ser suficiente construir un pequeño azud que minimice el impacto ambiental.

Además, en la obra civil se contempla la instalación de la tubería de presión, la cual debe cumplir con criterios técnicos y requerir estudios previos para garantizar el transporte eficiente del agua necesaria hacia la turbina.

Asimismo, se lleva a cabo la construcción de la casa de máquinas, donde se aloja todo el equipamiento necesario para la generación de energía. Esta estructura alberga las válvulas de control de agua, la turbina, el generador, el centro de control y otros equipos esenciales para el proceso de producción de energía [4].

2.3. Turbinas hidráulicas

Las turbinas hidráulicas son dispositivos que transforman la energía potencial del agua en energía mecánica, que puede ser utilizada para la generación de electricidad, mover maquinarias y realizar otro tipo de actividades. Existen diferentes tipos de turbinas cada una está diseñada para aprovechar de manera óptima las características del flujo de agua y las necesidades específicas de cada aplicación.

En este apartado hablaremos de la turbina Michell Banki, la misma que se utilizó en este proyecto por su diseño sencillo y de fácil fabricación, buena eficiencia en operación, también su bajo costo en operación y mantenimiento [12].

Esta turbina también conocida como turbina de flujo cruzado fue creada en 1903 por el ingeniero Anthony George Maldon Michell, posteriormente fue estudiada por el profesor Donat Banki, quien realizó un trabajo profundo para maximizar la eficiencia de esta máquina, demostrando teóricamente los ángulos de entrada y salida del rotor, las curvaturas de los álabes y la forma como el agua fluye a través de la turbina, finalmente esta turbina fue perfeccionada por la compañía Ossberger la misma que desde 1933 tiene una patente, la turbina se observa en la Figura 5.

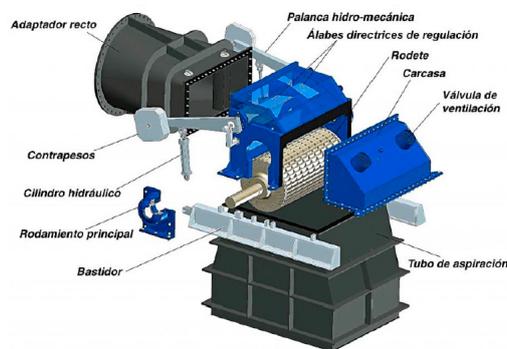


Figura 5: Turbina Michell-Banki. [12]

2.3.1. Componentes de la turbina

Los componentes de esta turbina son cuatro: el rodete, inyector, tubería de conducción y álabe director.

El rodete es el encargado de transformar la energía cinética del agua en energía mecánica, este elemento está conformado por dos discos en paralelo conectados por una serie de álabes curvados con sus bordes bien afilados para reducir la resistencia al flujo.

El inyector se encarga de regular y orientar la entrada del agua a la turbina este elemento se encarga de que el chorro de agua impacte a los álabes con un ángulo llamado ángulo de ataque, dentro de éste se encuentra un álabe directriz que ayuda a minimizar las pérdidas y aprovechar el mayor flujo de agua.

La tubería de conducción es la encargada de conducir el fluido desde la toma de agua hasta los álabes, el diseño y la construcción de la misma influyen en el desempeño y la durabilidad de la turbina, en este elemento se dan las

pérdidas por el efecto de la rugosidad de la misma estas pérdidas se reflejan en la reducción de la altura neta ocasionando una reducción considerable en la potencia mecánica deseada.

2.3.2. Principios de funcionamiento

El funcionamiento se basa en el principio de transformar la energía potencial gracias a la diferencia de nivel existente entre la toma y la turbina, una vez que el agua llegue al inyector es acelerado debido al efecto de este, el agua que ingresa realiza una doble acción de impacto logrando transferir el 70 % en el primer contacto con los álabes, posteriormente el agua atraviesa el interior del rodete para hacer un nuevo contacto con un segundo grupo de álabes transfiriendo el 30 % de energía restante, como podemos observar en la Figura 6.

Finalmente el fluido abandona el rodete y es liberado al afluyente que se desvió aguas arriba para de esta forma minimizar los efectos negativos del desvío ocasional.

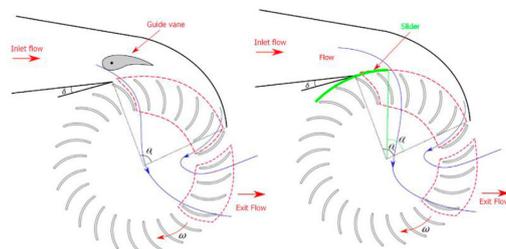


Figura 6: Impacto en álabes. [12]

2.4. Generador eléctrico.

Para transformar la energía mecánica generada por la turbina en energía eléctrica, se requiere de un generador eléctrico. En el caso de las pico centrales hidráulicas, los generadores más utilizados son los de corriente alterna, en casos especiales se utilizan generadores trifásicos de imanes permanentes.

Un generador eléctrico consta de dos componentes fundamentales: el rotor y el estator. El rotor es la parte móvil del generador y su función principal es generar campos magnéticos variables. Este campo magnético variable se

obtiene gracias a la rotación del rotor, que puede ser impulsada por la turbina hidráulica en el caso de una pico central hidráulica.

Por otro lado, el estator es la parte fija del generador. En el estator se genera la electricidad mediante la inducción electromagnética. El estator está compuesto por bobinas o devanados de cobre dispuestos estratégicamente. Al girar el rotor y generar los campos magnéticos variables, se induce una corriente eléctrica en los devanados del estator. Esta corriente eléctrica generada en el estator es de corriente alterna [22].

De acuerdo a la disposición del eje de giro estos se clasifican en generadores de eje vertical y eje horizontal [4].

2.4.1. Generador trifásico de imanes permanentes

Un generador trifásico de imanes permanentes consta de tres bobinas de cableado que están dispuestas en ángulo con respecto a la rotación del imán permanente. Cuando el imán gira al rededor del eje central del generador se genera un campo magnético que induce una corriente eléctrica en la bobinas.

Cada una de las bobinas se conecta a una fase diferente de la red eléctrica trifásica, la combinación de estas tres fases produce una corriente trifásica que puede ser utilizada para alimentar una amplia variedad de cargas eléctricas.

En la actualidad existen un sin número de generadores, cada uno con objetivos específicos, a continuación se describe las características del generador trifásico, estos generadores están construidos para ser mucho más eficiente ya que cuentan con un rotor de imanes permanentes.

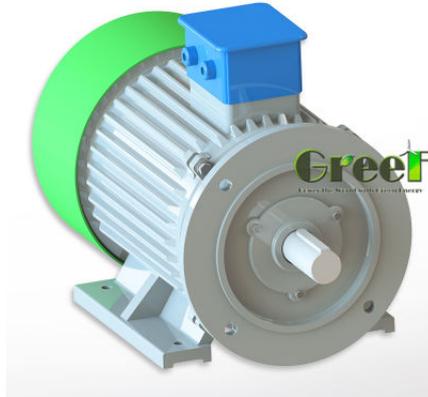


Figura 7: Generador con rotor de imanes permanentes [9].

Ventajas:

- Se puede construir generadores de acuerdo a las necesidades de los clientes ya sea el voltaje, la frecuencia, la potencia, la velocidad, etc.
- Estructura del rotor de imanes permanentes, sin devanando de excitación, ni escobillas de carbono, sin anillos deslizantes, ni cajas de cambio.
- Diseño de múltiples polos que mejoran la frecuencia y la eficiencia de los rectificadores e inversores.
- Tienen rotores fuertes que podrían funcionar a altas velocidades en todo el tiempo de su funcionamiento.
- Alta eficiencia debido que no poseen partes móviles son muy eficiente y pueden tener una larga vida útil de trabajo.
- Bajo ruido, debido a la falta de componentes móviles estos generadores son muy silenciosos en comparación con otro tipo de generadores.

Desventajas:

- Costo inicial, debido a la complejidad del diseño y la necesidad de imanes permanentes de alta calidad, estos generadores pueden ser más caros que otro tipo de generadores.
- Limitaciones de potencia, debido a la complejidad del diseño estos genera-

dores pueden tener limitaciones de potencia en comparación con otros.

2.5. Regulación y control

Todas las centrales tienen dispositivos de control, regulación y protección como se ve en la Figura 8, estos elementos ayudan a mantener un funcionamiento adecuado en todas las etapas de generación, en esta sección se analizará las válvulas que están encargadas de controlar el fluido que circula por la tubería de acuerdo a las necesidades que se requieran, con este elemento se puede controlar la velocidad de giro en la turbina y al estar acoplada directamente al eje del generador también se controla la velocidad y el torque de éste, todo esto con el fin de mantener un equilibrio entre frecuencia y tensión en las borneras de salida del generador.



Figura 8: Dispositivo para regulación [14].

En este sentido las válvulas son las encargadas de proveer la cantidad de flujo necesario para el correcto funcionamiento del generador, en nuestro caso la apertura y cierre de estos elementos se los realiza de forma manual sin embargo en el caso de que se tenga la necesidad de controlar este proceso existen dispositivos que lo hacen de forma más fácil y sencilla para esto es necesario realizar un lazo de control con la información que se adecue al sistema, en este caso puntual si deseamos más torque para la turbina es necesario un caudal mayor y viceversa, todo este proceso debe estar bien diseñado y construido para evitar afecciones al comportamiento de control.

2.5.1. Tipos de válvulas de control

La característica principal para que una válvula sea llamada de control es que está gobernada por un actuador que recibe una señal de control y hace que la válvula actúe según los requerimientos del sistema a ser controlado, a continuación se describe en la Tabla 1, los tipos de válvulas que existen [14].

LINEALES	ROTATIVAS
Globo.	Globo Rotary Plug.
Guillotina.	Mariposa.
Diafragma.	Bola.
Manguito.	Macho.

Tabla 1: Tipos de Válvulas [14].

2.6. Aprovechamiento de una central hidráulica

Para estimar la cantidad de energía que se puede generar en una central hidráulica, es fundamental considerar el caudal de agua disponible en un período de tiempo específico. Para ello, se realiza un estudio del caudal, que implica la medición y análisis de una serie de valores que influyen directamente en la cantidad de agua utilizable para accionar la turbina.

Estos datos permiten obtener información precisa sobre la variación del caudal en diferentes momentos, considerando factores como las estaciones del año, las lluvias, y otros fenómenos que afectan la disponibilidad de agua.

Con base en estos registros de caudal, se pueden realizar análisis estadísticos y modelos hidrológicos para estimar la disponibilidad en diferentes períodos de tiempo, como días, meses o años. Estas estimaciones del caudal son fundamentales para determinar la cantidad de agua aprovechable y, por ende, la cantidad de energía que se puede generar.

Es importante destacar que el estudio del caudal y la estimación de la energía producida son procesos complejos que requieren el uso de métodos hidrológicos y herramientas de análisis especializados. Además, factores como la ubicación geográfica, el tipo de fuente hídrica y las características del terreno también influyen en la disponibilidad y aprovechamiento del caudal.

2.6.1. Caudal de servidumbre

El caudal de servidumbre de una central hidráulica está compuesto por el caudal ecológico o caudal mínimo necesario para garantizar el funcionamiento adecuado de la central. Es importante destacar que este caudal difiere de otros usos o demandas de agua.

El caudal ecológico se refiere a la cantidad mínima de agua que debe dejarse fluir aguas abajo de la central para mantener el equilibrio del ecosistema acuático y preservar la vida acuática, así como proteger los hábitats y garantizar la calidad del agua. Este caudal es esencial para conservar los ecosistemas fluviales y mantener la biodiversidad.

A diferencia de otros usos de agua, como el abastecimiento humano, la agricultura o la industria, el caudal de servidumbre tiene como objetivo principal mantener la salud y el equilibrio del medio ambiente acuático. Es una consideración importante en el diseño y operación de centrales hidroeléctricas para asegurar un manejo sostenible de los recursos hídricos.

La determinación del caudal de servidumbre implica un análisis exhaustivo de los aspectos ambientales y regulatorios, considerando factores como la legislación ambiental, los estudios de impacto ambiental, la evaluación de los ecosistemas afectados y la consulta con expertos en conservación y gestión de recursos hídricos.

Es fundamental reconocer la importancia de mantener un equilibrio entre la generación de energía hidroeléctrica y la protección del medio ambiente. La consideración y estipulación adecuada del caudal de servidumbre contribuyen a lograr una gestión responsable y sostenible de los recursos hídricos en el contexto de la generación de energía eléctrica [13].

2.6.2. Caudal de equipamiento

Se refiere a la cantidad de agua necesaria para un correcto funcionamiento de la turbina, está ligado a varios factores como el tipo de generador, el diseño de la turbina, la altura de caída, este caudal debe garantizar un flujo suficiente para mover la turbina y mantener una generación estable.

2.6.3. Caudal mínimo técnico

Este es proporcional al caudal de equipamiento y depende del tipo de turbina seleccionada (aproximadamente, 10 % Q_e para turbina Pelton, 25 % Q_e para

turbina Kaplan, y 40 % Q_e para turbina Francis) [3].

Para poder hacer un acercamiento a la energía que se puede obtener de una central se utiliza una ecuación que depende directamente de la altura o salto útil y las pérdidas que se puedan generar en la tubería, también depende del caudal turbinado y de los rendimientos de cada equipo que se conecte a la central es decir, la turbina, el generador, los transformadores, con esta perspectiva la ecuación quedaría de la siguiente forma:

$$P = 1000 * g * Q * H_n * \eta \quad (1)$$

En donde:

1000 = Peso específico del agua.

g = Valor de la gravedad.

Q = Caudal necesario para el funcionamiento del sistema.

H_n = Altura o salto neto, que existe entre la toma de agua y la turbina instalada.

η :Es la eficiencia del equipamiento.

Ahora bien el salto neto H_n , se defina como la diferencia entre el salto útil H_u , y las pérdidas generadas en la tubería H_p , el salto útil es la diferencia entre el nivel de agua en el depósito y el nivel de salida en el desagüe de la turbina, por otro lado tenemos el salto bruto H_b , que es el desnivel desde la cota superior de agua en el embalse hasta la salida al cauce final luego de ser turbinado, como podemos ver en la Figura 9.

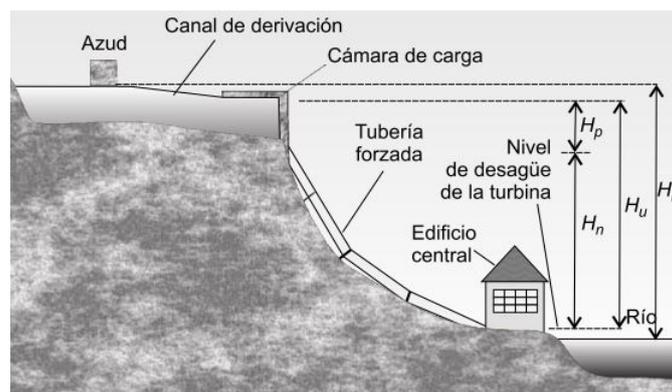


Figura 9: Diversos saltos de agua [25].

En cuanto a los rendimientos de los diferentes equipos son proporcionados por los fabricantes sin embargo a nivel global se los puede considerar entre un 80 % y un 85 %.

Para el cálculo de las pérdidas en las tuberías y los diferentes accesorios también se puede calcular en base a la ecuación de Darcy y Weisbach que se explicará más adelante.

2.7. Costo de la energía

La determinación del costo de una central hidráulica puede verse influenciada por varios aspectos, principalmente los gastos asociados a la construcción de obras civiles y la adquisición de los equipos necesarios para su puesta en funcionamiento. Los costos más significativos suelen incluir elementos como la infraestructura civil (accesos, embalses, canales, tuberías, edificaciones, entre otros), el sistema eléctrico (líneas de transmisión, transformadores, sistemas de control), la maquinaria (turbinas, generadores, multiplicadores) y los servicios de ingeniería y dirección de la obra.

Al calcular los costos de producción de energía en una central hidráulica, resulta importante considerar un factor clave conocido como el factor de capacidad anual de la central. Este factor representa el porcentaje de la potencia instalada en la central que efectivamente se utiliza durante su operación. Las centrales hidroeléctricas suelen operar con un factor de capacidad relativamente bajo, en torno al 40 %, en comparación con otras que pueden alcanzar el 60 % o incluso el 80 %.

2.8. Impacto medioambiental

El impacto ambiental de las centrales hidráulicas debe ser analizado desde dos perspectivas. En primer lugar, se encuentra la reducción de emisiones de gases tóxicos al medio ambiente, los cuales son responsables de diversas problemáticas como la lluvia ácida, la misma que es ocasionada por la quema de combustibles fósiles. En comparación con otras fuentes de energía, las centrales hidráulicas contribuyen significativamente a la disminución de estas emisiones, ya que utilizan la energía del agua en lugar de combustibles fósiles.

En segundo lugar, es importante considerar las alteraciones ambientales que pueden surgir como resultado de la construcción de grandes embalses en centrales hidroeléctricas de mayor envergadura, como podemos apreciar en la Figura 10. Estas alteraciones incluyen la inundación de extensas áreas, la pérdida de hábitats de especies animales, cambios en las condiciones bioclimáticas locales, entre otros efectos. Sin embargo, en el caso de las pequeñas

centrales hidráulicas, estos impactos ambientales suelen ser mínimos debido a la menor intervención y requerimientos de infraestructura.

Es esencial tener en cuenta que el análisis del impacto ambiental de las centrales hidráulicas debe considerar factores como la ubicación, el diseño y la mitigación de los posibles impactos. Las autoridades reguladoras y los desarrolladores de proyectos hidroeléctricos deben realizar evaluaciones ambientales exhaustivas, aplicar medidas de conservación y restauración, y buscar un equilibrio entre la generación de energía y la protección del medio ambiente.



Figura 10: Impacto ambiental [16].

2.9. Energía Hidráulica

La energía hidráulica es una forma de energía renovable que se obtiene del movimiento del agua en ríos, embalses, corrientes submarinas y otros cuerpos de agua. Esta energía se puede aprovechar para generar electricidad mediante el uso de turbinas hidráulicas, las mismas que se conectan al eje del generador transformando así a la energía cinética del agua en energía eléctrica.

Esta es una de las fuentes de energía renovable más utilizada en todo el mundo y su capacidad de proporcionar energía constante y fiable la hace especialmente atractiva. Según la Agencia Internacional de Energía (AIE), las hidroeléctricas representan aproximadamente el 16 % de la electricidad mundial generada a partir de fuentes renovables [5].

Sin embargo, la construcción de presas y centrales hidroeléctricas puede tener impactos ambientales significativos, incluyendo la pérdida del flujo natural del agua y el riesgo de inundaciones. Por lo tanto, es importante llevar a cabo un análisis cuidadoso y riguroso de los impactos ambientales y sociales antes de llevar a cabo este tipo de proyectos.

La energía hidráulica corresponde a un proceso de conversión de energía gravitacional, originada a partir del flujo másico de agua a través de la tubería de presión, es decir al peso del agua que se desplaza por la tubería desde una altura inicial hasta la salida al final, esta energía es analizada por la siguiente ecuación [25].

$$E_H = H_{est} * m \quad (2)$$

En donde:

E_H : Energía que se obtiene gracias a la caída de agua que se da desde el nivel superior del depósito.

H_{est} : Altura estática que corresponde a la diferencia del nivel superior y el nivel inferior.

m: Peso del agua y obedece a la siguiente expresión:

$$m = \rho * g * V \quad (3)$$

Aquí el volumen es el producto del caudal en unidad de tiempo,

$$V = Q * t \quad (4)$$

De esta forma la ecuación final de la energía quedaría de la siguiente manera:

$$E_H = H_{est} * \rho * g * Q * t \quad (5)$$

2.9.1. Potencia Hidráulica

A partir de la Ecuación 5, se puede obtener la potencia de la planta.

$$P_H = H_{est} * \rho * g * Q \quad (6)$$

2.10. Velocidad Síncrona

En las máquinas síncronas se debe tener en consideración la velocidad de rotación n (r/min), que está vinculada directamente con la frecuencia f de la red de corriente alterna esta relación la podemos ver en la siguiente expresión:

$$n = \frac{120 * f}{p} \quad (7)$$

En donde p , es el número de polos de la máquina síncrona [11], [19]
 Si un generador síncrono gira a una velocidad menor que la nominal, su frecuencia de salida también disminuirá. Esto significa que la energía eléctrica generada tendrá una frecuencia más baja, lo que puede tener consecuencias negativas para los equipos que estén conectados a la red, ocasionando un daño en los mismos.

Si el generador trabaja a una velocidad menor que la nominal por un tiempo prolongado, puede que se vea afectado en su vida útil, esto se debe a que el generador puede experimentar esfuerzos mecánicos y térmicos no deseados que pueden afectar su capacidad para generar electricidad de forma confiable y eficiente.

2.11. Potencia y Par de un motor y un generador eléctrico

Los motores y generadores son muy parecidos y están contruidos bajo los mismos principios electromagnéticos es por ello que podemos utilizar las mismas ecuaciones para los cálculos respectivos, la potencia mecánica se expresa en (HP) o en (kW), y la relación de estas cantidades se dan por medio de la siguiente expresión:

$$1HP = 746W \quad (8)$$

También se relaciona mediante la velocidad de giro multiplicado por el torque y este resultado dividido entre una constante proporcionada por el sistema métrico de medición como podemos ver en la siguiente ecuación:

$$P(W) = \frac{V(RPM) * T(Nm)}{9,55} \quad (9)$$

Donde:

Ahora bien el par producido por los motores y generadores se relacionan con la siguiente expresión en la que involucra a la velocidad y la potencia, estos parámetros se detallan en la Tabla 2.[10].

$$T(Nm) = \frac{9,55 * P(W)}{V(RPM)} \quad (10)$$

P (W)	Potencia mecánica en watts.
V (RPM)	Velocidad en revoluciones por minuto.
T (Nm)	Par en Newton-metro.
9.55	Constante del sistema métrico de medición.

Tabla 2: Parámetros [19]

Con estas ecuaciones, podemos realizar un cálculo aproximado de los requisitos de caudal de agua necesarios para instalar una PCH en un lugar determinado. Esto es importante ya que la velocidad de la turbina es un factor crítico para el arranque del generador. Si la velocidad no alcanza un mínimo determinado aproximadamente del 75 % del valor nominal, el generador no podrá funcionar adecuadamente [6].

2.12. Cálculo de embalse

Para determinar el volumen de la laguna que proporcionará el flujo de agua necesario para accionar la turbina y convertir ese movimiento mecánico en energía eléctrica, se realiza un levantamiento topográfico utilizando un teodolito electrónico altamente preciso, como se muestra en la Figura 11. Los datos obtenidos en este levantamiento se procesan mediante un programa computacional (REVIT) que permite calcular el volumen del embalse.

Es relevante destacar que solo se considera el volumen que será útil para el funcionamiento óptimo de la turbina. En consecuencia, el volumen total de la laguna se divide en una porción que cumpla con este propósito y la otra porción tan solo ayuda a mantener la laguna llena. Para lograr esto, se tiene en cuenta la precipitación que se presenta en la zona. Este enfoque garantiza una utilización eficiente y sostenible del recurso hídrico en el proyecto de generación hidroeléctrica.



Figura 11: Teodolito electrónico [16].

Una vez obtenida la información del levantamiento topográfico y es representado en la Figura 12, se analiza los datos en el programa (REVIT) para realizar el cálculo respectivo y encontrar el volumen exacto que se tiene disponible para la generación eléctrica.

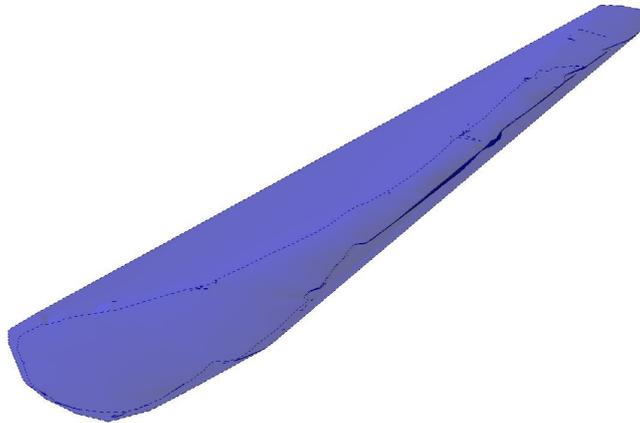


Figura 12: Imagen procesada del levantamiento (Autor).

Se obtiene un volumen de $4223,75 \text{ m}^3$ de agua embalsada y útil para el suministro de la turbina. El volumen restante de $4424,47 \text{ m}^3$, que se encuentra por debajo de la tubería de presión, se considera solamente para alcanzar la capacidad de llenado de la laguna pero que es importante ya que de no contar

con este volumen adicional no se llegará a llenar el depósito, ocasionando así el desabastecimiento de agua.

2.13. Cálculos de potencia a la salida del generador

Con el volumen concentrado en este embalse y con la ayuda de diferentes ecuaciones se puede realizar los cálculos de forma adecuada y técnica que indiquen los resultados requeridos, para lograr esto se recurre a las ecuaciones de Mecánica de fluidos, las mismas que permiten encontrar el flujo que circula por la tubería y que alimenta la turbina instalada en el lugar.

Se analiza con la ecuación de Darcy-Weisbach, que permite obtener las pérdidas de energía en el sistema, para esto se debe calcular en primer lugar el número de Reynolds con la siguiente ecuación, con la información resultante se puede saber el tipo de flujo presente en la tubería [1].

$$N_R = \frac{\rho * V * D}{\mu} \quad (11)$$

En donde:

N_R : Número de Reynolds.

ρ : Densidad del fluido en (kg/m) .

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:

$$V = \sqrt{2 * g * H} \quad (12)$$

Donde:

V : Velocidad.

g : Gravedad.

H : Altura bruta.

Una vez que se obtiene este valor se verifica si el N_R es menor a 2000 se trata de un flujo laminar, pero si este número es superior se trata de un flujo turbulento, de este valor dependerá la fórmula para determinar el factor de fricción [21], a continuación se presenta la ecuación encargada de encontrar el valor del coeficiente de fricción, este valor se aplica en la ecuación de Darcy:

$$f = \frac{0,25}{\left(\log\left(\frac{1}{3,7 * \frac{D}{\epsilon}} + \frac{5,74}{N_R^{(0,9)}}\right)\right)^2} \quad (13)$$

Donde:

f : Coeficiente de fricción.
 N_R : Número de Reynolds.
 D : Diámetro de la tubería.
 ϵ : Rugosidad.

A partir de estos factores se procede a utilizar la ecuación de Darcy que es la siguiente:

$$h_L = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2 * g} \quad (14)$$

Donde:

h_L : Pérdida de energía debido a la fricción.
 f : Factor de fricción.
 L : Longitud de la tubería.
 D : Diámetro de la tubería.
 g : Aceleración de la gravedad.
 v : Velocidad promedio del fluido.

Con el valor de pérdidas se calcula la velocidad del fluido en ese instante, en este caso es la velocidad con la que llega a las aspas de la turbina, para esto se utiliza la ecuación de Hazen-Williams, dicha ecuación es la siguiente:

$$v_f = 0,85 * C * Rh^{0,63} * S^{0,54} \quad (15)$$

Donde:

v_f : Velocidad de fluido.
0,85: Constante para el SI.
 C : Constante de Hazen-Williams para tubería PVC.
 Rh : Radio hidráulico.
 S : Pendiente de la conducción.

De esta ecuación el radio hidráulico (Rh) se calcula con la siguiente ecuación:

$$Rh = \frac{A}{L} \quad (16)$$

Donde:

A : Área de la tubería.
 L : Longitud de la tubería.

Se requiere realizar estos cálculos para determinar el caudal disponible que alimentará el sistema. En consecuencia, es fundamental considerar la información técnica correspondiente a la instalación tanto el tamaño de la tubería y la longitud de la misma.

La pendiente de conducción (S) depende de las pérdidas generadas (H_l) y la longitud (L) de la tubería instalada y se calcula con la siguiente expresión.

$$S = \frac{H_l}{L} \quad (17)$$

Diámetro Nominal (mm)		Diámetro Interior	Espesor Nominal	Presión de Trabajo		
UNIÓN U/Z	UNIÓN E/C	mm	mm	MPa	PSI (lb./in ²)	Kgf/cm ²
160		153.6	3.2	0.50	73	5.10
		152.2	3.9	0.63	91	6.43
		150.0	5.0	0.80	116	8.16
		147.6	6.2	1.00	145	10.20
		144.8	7.6	1.25	181	12.75
200		192.2	3.9	0.50	73	5.10
		190.2	4.9	0.63	91	6.43
		187.6	6.2	0.80	116	8.16
		184.6	7.7	1.00	145	10.20
		181.0	9.5	1.25	181	12.75
250		240.2	4.9	0.50	73	5.10
		237.8	6.1	0.63	91	6.43
		234.4	7.8	0.80	116	8.16
		230.8	9.6	1.00	145	10.20
		226.2	11.9	1.25	181	12.75

Figura 13: Características técnicas de la tubería PVC [17].

Con los datos de los fabricantes de las tuberías, mismos que se encuentran en la Figura 13, se realizará los cálculos requeridos, por lo tanto se hace uso de la siguiente ecuación para encontrar el valor del caudal en dicho sistema.

$$Q = v * A \quad (18)$$

En donde:

Q es el caudal (m^3).

v es la velocidad del líquido (m/s)

A es el área de la tubería por donde circula el agua (m^2).

3. CAPÍTULO III

En este capítulo se analizan los cálculos necesarios para poder dimensionar la potencia final que entrega el generador instalado en el sitio. Para esto, el uso de las ecuaciones anteriores es muy importante.

$$P = \rho * 9,8 * Q * H_n * \eta \quad (19)$$

Donde:

P = Potencia (kW)

ρ = Densidad del agua (kg/m^3)

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$

Q = Caudal (m^3)

H_n = Altura neta (m)

La altura neta (H_n), se considera desde el tubo en el embalse hasta la salida en la turbina, también se considera un rendimiento de 0,85 para el conjunto de turbina y generador[8]. Estos datos permiten calcular la potencia que se obtendrá a la salida.

Datos generales:

$\rho = 1000 \text{ (kg/m}^3\text{)}$ Densidad del agua.

$A = 0,045276641 \text{ m}^2$ Área de la tubería.

$H = 12,5 \text{ m}$ Altura bruta.

$L = 85,48 \text{ m}$ Longitud de tubería.

$g = 9,81 \text{ m/s}^2$ Gravedad.

$D = 0,240 \text{ m}$ Diámetro de tubería.

$\nu_i = 1,005 \text{ (pa} * \text{s)}$ Viscosidad de fluido.

$\mu = 1,007 \text{ (m}^2 * \text{s)}$ Viscosidad cinemática.

$\epsilon = 0,0000003$ Rugosidad.

Con estos valores se calcula de forma ordenada los valores necesarios para encontrar el caudal resultante en el sistema, se inicia con la Ecuación 11.

$$N_R = \frac{1000 * \sqrt{2 * 9,81 * 12,5 * 0,240}}{1,007} = 3732$$

Este número representa un flujo turbulento ya que es mayor a 2000 por consiguiente se procede al cálculo del factor de fricción.

$$f = \frac{0,25}{\left(\log\left(\frac{1}{3,7 * \frac{0,240}{0,0015}} + \frac{5,74}{3732^{(0,9)}}\right)\right)^2} = 0,00597634$$

Posteriormente para encontrar el valor de la velocidad se procede con la Ecuación 12.

$$V = \sqrt{2 * 9,81 * 12,5} = 15,66 \text{ m/s}^2$$

Una vez obtenidos los valores necesarios, se procede a realizar los cálculos correspondientes que proporcionan información de las pérdidas que se dan en el tramo de la tubería, para este fin acudimos a la Ecuación 14.

$$h_L = 0,00597634 * \frac{85,48}{0,240} * \frac{15,66^2}{2*9,81} = 26,5956 \text{ m}$$

Este resultado representa las pérdidas que se obtienen en el trayecto de la tubería, esto afecta directamente al sistema.

Para el calculo del radio hidráulico se emplea la Ecuación 16, para esto es importante el dato técnico de los fabricantes de la tubería ya que son los encargados de proporcionar datos constructivos de la tubería instalada se obtiene el siguiente resultado.

$$Rh = \frac{0,045314364}{85,48} = 0,000530117 \text{ m}$$

En el valor de la pendiente de conducción se emplea la Ecuación 17 y se obtiene el siguiente resultado:

$$S = \frac{26,5056}{85,48} = 0,31100307$$

A partir de estos valores se calcula el caudal que la tubería puede transportar desde la bocatoma hacia las aspas de la turbina, la misma que se encuentra conectado al eje del generador, para esto se utiliza la ecuación de Hazen-Williams.

$$V_f = 0,85 * 140 * 0,0005296^{0,63} * 0,31100307^{0,54} = 0,54700822 \text{ m/s}$$

De la ecuación 18, se calcula el valor del caudal y se obtiene el siguiente resultado:

$$Q = 0,54700822 * 0,045314364 = 0,024787329 \text{ m}^3/\text{s}$$

Con estos valores calculados se obtiene la potencia que genera la planta hidroeléctrica, misma que se comprueba mas adelante con cargas específicas. Finalmente, a partir de los datos anteriores se determina el valor de la potencia.

$$P = 1000 * 9,81 * 0,024787329 * 12,5 * 0,9 * 10^{-3} = 2,74 \text{ kW}$$

Este valor es muy importante ya que representa la potencia máxima teórica que se puede generar utilizando el caudal de agua y la altura que existe en la pico central instalada. No obstante y de acuerdo a los resultados de las mediciones obtenidas conectando diferentes cargas eléctricas, que se detallarán más adelante, se ha constatado que se podría conectar una carga de hasta 4000 w, de forma paulatina y equilibrada entre las tres fases sin ocasionar ningún problema al generador. Por lo tanto, se debe considerar cuidadosamente la elección de las cargas conectadas para asegurar el adecuado funcionamiento de la pico central.

Dentro de las especificaciones técnicas para el funcionamiento del generador se pueden apreciar ciertos valores que deben ser respetados para que no se produzca ningún tipo de avería en el mismo. Dichos valores se detallan en la Tabla 3.

Potencia Nominal	5	kW
Velocidad de rotación	300	RPM.
Tensión Nominal	220	Vac.
Corriente Nominal	13.1	A.
Par Nominal	161.6	N.M
Frecuencia	60	Hz.
Números de polos	24	-
Tipo de Generador	Trifásico	Síncrono.
Eficiencia	94.8	%.
Grado de Clasificación	IP54	-
Instalación	Horizontal	-

Tabla 3: Características generales [9].

3.1. Cálculo de torque del generador

A partir de las pruebas realizadas con diferentes cargas conectadas al generador se obtienen los resultados detallados en la Tabla 4, mismos que deben llegar a un torque máximo de acuerdo al Par del generador, este dato se obtiene de la carcasa del mismo, que es de 161,6 N-m, por lo tanto al conectar las cargas debe llegar a generar como máximo un torque similar con el objetivo de no forzar al generador y poder mantener un funcionamiento óptimo del mismo.

Para el cálculo del Par se procede a la utilización de la siguiente ecuación que relaciona al Par con la potencia eléctrica del dispositivo conectado a este generador:

$$T = \frac{P * f}{2 * \pi * n} \quad (20)$$

En donde:

T = Par ($N * M$)

P = Potencia (Kw)

f = Frecuencia ($60Hz$)

n = Revoluciones (Rpm)

A continuación se presenta la Tabla 4 con los valores obtenidos de las diferentes mediciones, dichos valores permiten calcular el torque que genera cada carga que se conecta al generador. La tabla contiene el porcentaje de apertura de la válvula, el voltaje línea/neutro, la carga conectada, la velocidad de giro medida en el eje de la turbina, y la frecuencia. Con estos valores y aplicándolos en la Ecuación 20, calculamos el torque que genera cada valor de carga instalada. Esta información proporciona una visión clara de la capacidad que tiene la planta en términos del torque generado.

Núm	Apertura Válvula	Voltaje	Potencia	Velocidad	Frecuencia	Par
1	15 %	101,4V	75w	180rpm	60Hz	4N.M.
2	25 %	187V	0w	320rpm	60Hz	0N.M.
3	25 %	138V	800w	237rpm	60Hz	32,2N.M.
4	25 %	131V	1100w	301rpm	60Hz	35,4N.M.
5	50 %	255,7V	0w	440rpm	60Hz	0N.M.
6	50 %	151,3V	1900w	280rpm	60,4Hz	61,4N.M.
7	50 %	173,4V	2500w	325rpm	60Hz	78N.M.
8	50 %	150,1V	2900w	295rpm	60Hz	90,7N.M.
9	50 %	112,7V	3000w	223rpm	56,9Hz	128,5N.M.
10	50 %	163,7V	1500w	315rpm	63,7Hz	48,2N.M.
11	50 %	154,7V	1500w	283rpm	58Hz	51,5N.M.
12	50 %	141,3V	2600w	258rpm	60Hz	91,4N.M.
13	75 %	159V	2600w	225rpm	63,5Hz	108,5N.M.
14	75 %	198,3V	1870w	346rpm	61Hz	62,7N.M.
15	75 %	166,3V	2670w	297rpm	61Hz	86,6N.M.
16	75 %	164V	2900w	298rpm	58Hz	94,5N.M.
17	75 %	122,3V	3300w	230rpm	Hz	132,4N.M.
18	75 %	154,7V	1500w	248rpm	61Hz	51,3N.M.
19	75 %	116V	3000w	229rpm	60Hz	125,1N.M.
20	75 %	133,4V	4300w	265rpm	51Hz	131,7N.M.
21	75 %	147,6V	4100w	295rpm	59,1Hz	102N.M.
22	100 %	155,9V	4300w	299rpm	60Hz	137,3N.M.
23	100 %	120,3V	3000w	239rpm	60Hz	119,9N.M.
24	100 %	125,3V	3300w	233rpm	60Hz	135,2N.M.
25	100 %	160V	2600w	300rpm	60Hz	82,8N.M.
26	100 %	146V	2600w	269rpm	58,6Hz	82,4N.M.
27	100 %	122V	4400w	239rpm	60Hz	175,8N.M.
28	100 %	88V	5900w	183rpm	60Hz	307,9N.M.

Tabla 4: Relación Potencia - Par (Autor).

A continuación se detalla el tipo de carga conectada en cada prueba realizada de acuerdo a la Tabla 5.

Núm	Equipo	Tipo de carga	Potencia
1	Iluminación	R,L,C	75 w
2	Vacío	0	
3	Amoladora Black and Decker	R,L,C	800 w
4	Taladro	R,L,C	1100 w
5	Vacío	0	
6	Amoladora Dewalt	R,L,C	1900 w
7	Taladro y Amoladora	R,L,C	2500 w
8	Amoladora y Calefactor	R,L,C	2900 w
9	Calefactor y Compresor	R,L,C	3000 w
10	Calefactor	R	1500 w
11	Compresor	R,L,C	1500 w
12	Calefactor y Taladro	R,L,C	2600 w
13	Compresor y Taladro	R,L,C	2600 w
14	Amoladora, Iluminación	R,L,C	1870 w
15	Calefactor, Taladro, Iluminación	R,L,C	2670 w
16	Calefactor, Amoladora	R,L,C	2900 w
17	Amoladora B., Compresor	R,L,C	3300 w
18	Calefactor	R	1500 w
19	Taladro, Amoladora	R,L,C	3000 w
20	Taladro, Amoladora G., Amoladora P.	R,L,C	4300 w
21	Compresor, Calefactor, Taladro	R,L,C	4100 w
22	Taladro, Amoladora G. Amoladora P.	R,L,C	4300 w
23	Compresor, Calefactor	R,L,C	3000 w
24	Calefactor, Amoladora G.	R,L,C	3300 w
25	Taladro, Compresor	R,L,C	2600 w
26	Calefactor, Taladro	R,L,C	2600 w
27	Calefactor, Amoladora G., Taladro	R,L,C	4400 w
28	Calefactor, Amoladora G. Taladro, Compresor	R,L,C	5900 w

Tabla 5: Tipo de cargas (Autor)

Mediante el análisis de estos resultados, se considera que la planta hidroeléctrica tiene la capacidad de generar una potencia de 4,3 kW. Es importante destacar que esta potencia es la adecuada para que el generador funcione correctamente a una velocidad de 300 rpm. Esta elección de potencia asegura una vida útil prolongada para el generador ya que se evita un esfuerzo excesivo en el sistema. Al mantener el funcionamiento dentro de los parámetros

nominales se garantizará la eficiencia y la fiabilidad del generador a lo largo de su vida útil.

3.2. Cálculo de obras civiles

Dentro de las obras civiles en este proyecto, se pueden mencionar dos aspectos importantes. El primero se relaciona con la colocación de la tubería, mientras que el segundo está relacionado con la construcción de la casa de máquinas, en donde se ubican todos los equipos necesarios para la generación eléctrica.

3.2.1. Tubería

La tubería es la encargada de trasladar el caudal óptimo para la activación de la turbina, para su dimensionamiento es importante examinar precios tanto de la tubería como de la mano de obra requerida para la instalación. En el trayecto se encuentran dos válvulas de control, estas son las encargadas de regular el flujo de agua al momento de impactar con los álabes de la turbina, luego transferir la energía potencial del agua hasta llegar a la obtención de energía cinética.

A continuación se puede observar el perfil que va a tener la tubería en su trayecto de aquí se obtiene la dimensión exacta de tubería que se requiere adquirir .

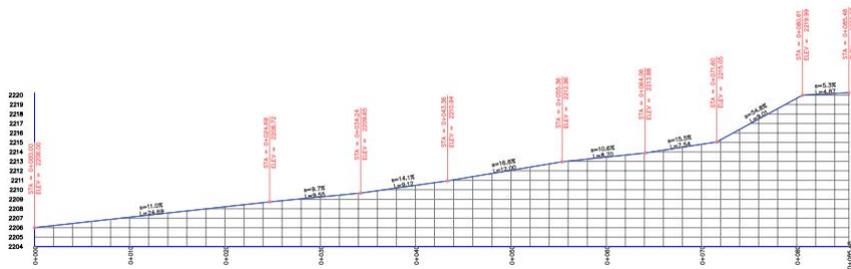


Figura 14: Perfil del tramo de tubería [28].

3.2.2. Construcción de la casa de máquinas

Para empezar con la construcción de la casa de máquinas es necesario adecuar de forma correcta el terreno ya que debe ser totalmente firme, una vez realizado la excavación necesaria se procede a realizar la fundición de la loza en donde se va a colocar las paredes y posteriormente los equipos necesarios, empezando por la turbina y su respectiva salida de agua.

3.3. Elementos que componen la pico central

Dentro de los componentes fundamentales de la pico central hidroeléctrica se destacan la turbina y el generador eléctrico. La turbina ha sido diseñada y fabricada a nivel local, mientras que el generador eléctrico ha sido importado, se trata de un generador síncrono de imanes permanentes, el cual presenta la ventaja de no requerir corriente de excitación para generar energía eléctrica. Esta característica permite un funcionamiento más eficiente y confiable del generador, garantizando la producción de energía de manera continua y estable, al poseer estas características hace que su costo sea considerable.

4. CAPÍTULO IV

4.1. Análisis de resultados

De acuerdo al trabajo investigativo y práctico realizado en el lugar de emplazamiento de la pico central en el Cantón Paute se obtuvieron los siguientes resultados.

4.1.1. Análisis Técnico del recurso hídrico

En este apartado según los datos obtenidos, se observa que en los meses de octubre hasta el mes de mayo, se tiene una precipitación entre 113 - 96 (mm)[7]. Esto favorece al abastecimiento de agua en la laguna, con esta precipitación se puede obtener una generación de energía eléctrica sin interrupciones de hasta 2,7 kW, ya que la cantidad de agua se mantendrá en niveles óptimos para abastecer el funcionamiento de dicha pico central.

De acuerdo a los datos, se ha identificado que los meses que presentan dificultades en el suministro de agua, son los comprendidos entre junio y septiembre (50 - 53 mm), con esta precipitación no se llega al mínimo volumen requerido para la generación.

En base a los cálculos y los resultados de las pruebas realizadas, se puede decir que la planta de hidro generación tiene la capacidad de abastecer de manera adecuada una carga de 2700 W.

En cuanto al volumen de agua que se almacena en la laguna según el levantamiento técnico es de 8648,22 m³ de dicho volumen se utiliza 4223,75 m³ para la hidro generación y la diferencia para el llenado del reservorio estos datos se aprecian en la Figura 15, la cantidad de agua en la parte superior del embalse abastece por 24 horas continuas la hidro generación sin requerir una entrada adicional de caudal. En la tabla 5, se detalla los meses que se tendría la cantidad suficiente de agua para el llenado del reservorio, para esto realiza un cálculo aproximado de la entrada de agua mediante la compuerta con las siguientes dimensiones base (40 cm), altura (10 cm) a partir de estas medidas se obtiene un dimensionamiento del caudal de ingreso que se detalla en la Ecuación 22.

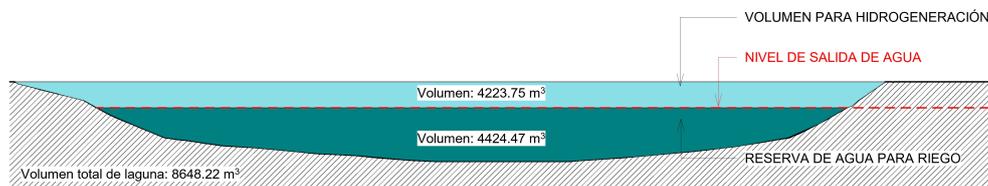


Figura 15: Volumen de agua (Autor)

Además del caudal mencionado, en momentos de precipitación también se acumula agua en el propio lecho de la laguna. Esta superficie de estudio abarca una área de 2850 m². Utilizando este dato y considerando el mes correspondiente, se procede a examinar los resultados de la cantidad de agua obtenida durante un día lluvioso. Estos valores deben exceder el volumen derivado del levantamiento topográfico para poder mantener el volumen óptimo en la laguna. En consecuencia, los meses en los cuales no se alcance este volumen de agua resultarán insuficientes para generar energía eléctrica, para el cálculo se utiliza la Ecuación 21.

$$volumen = A * Precipitacion \quad (21)$$

DÍAS DE MES	PRECIPITACIÓN (mm)	VOLUMEN(m ³)
Enero	127	12065
Febrero	133	12635
Marzo	157	14915
Abril	128	12160
Mayo	96	9120
Junio	50	4750
Julio	52	4940
Agosto	35	3325
Septiembre	53	5035
Octubre	113	10735
Noviembre	129	12255
Diciembre	118	11210

Tabla 6: Volumen de agua según los meses de lluvia (Autor).

4.1.2. Tiempo de llenado del reservorio

Para el cálculo de llenado se debe analizar la entrada de agua mediante la compuerta instalada para desviar el cauce de la quebrada, dicha compuerta

es de forma rectangular con las siguientes dimensiones, base de 40cm, altura de 10cm, con estos datos y un desnivel del terreno de 25cm se calcula el siguiente caudal.

$$Q = v * A \quad (22)$$

En donde:

Q: Caudal de ingreso.

v: velocidad de agua.

A: área de la compuerta.

$$v = \sqrt{2 * g * h} \quad (23)$$

En donde:

g: es el valor de la gravedad.

h: la altura de desnivel de la entrada de agua hasta la alguna.

$$v = \sqrt{2 * 9,81 * 0,25}$$

$$v = 2,215 \text{ m/s}$$

$$Q = 2,215 * (0,4 * 0,1)$$

$$Q = 0,08859 \text{ m}^3/\text{s}$$

A partir de estos resultados se calcula el volumen de agua que se almacena en veinte y cuatro horas para poder estimar el tiempo de llenado mientras no haya presencia de lluvia en el sector se utiliza la Ecuación 24.

$$V_{le} = Q * t \quad (24)$$

En donde:

V_{le} : Volumen de llenado

Q: Caudal

t: tiempo

$$V_{le} = 0,08859 * 3600 * 24 = 7654 \text{ m}^3/\text{día}$$

Además de este volumen de llenado, se debe considerar el volumen de agua que se da en el momento que existe precipitación en un día con la Ecuación 21 por ejemplo un día en el mes de octubre es por eso que se divide para 30, obteniendo el siguiente resultado.

$$V_{\text{día}} = \frac{2850 \cdot 113}{30} = 10740 \text{ m}^3/\text{día}$$

Con la suma de los resultados se puede aproximar el tiempo de llenado (t_{lle}) el mismo que depende de Volumen de ingreso tanto de la bocatoma como de la lluvia que se de en el área de la laguna y se especifica en la Ecuación 25.

$$t_{lle} = \frac{8648}{7654 + 10740} * 24 = 11,28 \text{ horas} \quad (25)$$

En donde:

Volumen total: 8648 m^3

V_{lle} : 7654 $m^3/\text{día}$

$V_{\text{día}}$: 10740 $m^3/\text{día}$

t_{lle} : tiempo de llenado

$$t_{lle} = \frac{8648}{7654+10740} * 24 = 11,28 \text{ horas}$$

En base a los resultado obtenidos del tiempo de llenado, es fácil darse cuenta que en los meses de lluvia, la generación continua estaría asegurada, en virtud de que tarda menos tiempo para volver a obtener la cota máxima del reservorio.

4.1.3. Tiempo de vaciado del reservorio

Para determinar el volumen de fugas en la tubería instalada, considerando un caudal de salida Q (m^3/s), así como el transcurso de un período de 24 horas, se emplea la Ecuación 26 con el propósito de calcular la cantidad de agua que sale durante dicho intervalo de tiempo.

$$V_{24h} = Q * t \quad (26)$$

$$V_{24h} = 0,0247592 * 3600 * 24 = 2139 \text{ m}^3/\text{día}$$

Una vez que se determina el volumen (2139 $m^3/\text{día}$) de agua que se utiliza en 24 horas con un funcionamiento continuo del generador, se procede al cálculo del tiempo que tardaría en llegar el agua hasta la cota mínima que alimenta al sistema, es decir el momento en que ya no se dispone de agua que acceda a la conducción y pueda llegar a la turbina. Para esto se utiliza la Ecuación 27.

$$t_v = \frac{V_e}{V_{24h}} \quad (27)$$

En donde:

t_v : tiempo de vaciado total.

V_e : volumen de agua para hidro generación.

V_{24h} : volumen de salida de agua en 24 horas.

$$t_v = \frac{4223,75\text{m}^3}{2139\text{m}^3} = 1,97 \text{ días}$$

De acuerdo con los datos de precipitación y la cantidad de agua que se necesita se puede observar que en los meses de junio a septiembre no supera el volumen de llenado que es de $8648,47 \text{ m}^3$ por lo tanto no se tendrá la cantidad necesaria para poder generar, lo que significa que no tendremos generación eléctrica, por lo tanto la generación va a estar limitada por la presencia o no de lluvia en la zona.

Además, en la zona de emplazamiento del proyecto, se determinó una potencia calculada con los parámetros del proyecto instalado considerando las pérdidas y aplicando las ecuaciones de Darcy y Hazen Hilliams se obtiene: $P = 2,74 \text{ kW}$, este resultado se contrasta con las mediciones realizadas en el sitio con cargas superiores, y el resultado muestra que el generador puede abastecer cargas de 4000 W , conectadas de forma equilibrada entre las tres fases, estas cargas se detallan en la Tabla 7 y la Figura 16.

Las cargas no simultaneas utilizadas fueron las siguientes:

Equipo	Potencia
Iluminación	70w
Taladro	1100w
Amoladora Black Decker	800w
Amoladora Dewalt grande	1800w
Amoladora Dewalt pequeña	1400w
Calefactor	1500w
Compresor	1500w

Tabla 7: Equipos con sus respectivas potencias (Autor).



Figura 16: Máquinas utilizadas (Autor).

De acuerdo a estas cargas y las diferentes formas de iteración entre ellas se obtuvieron los resultados.

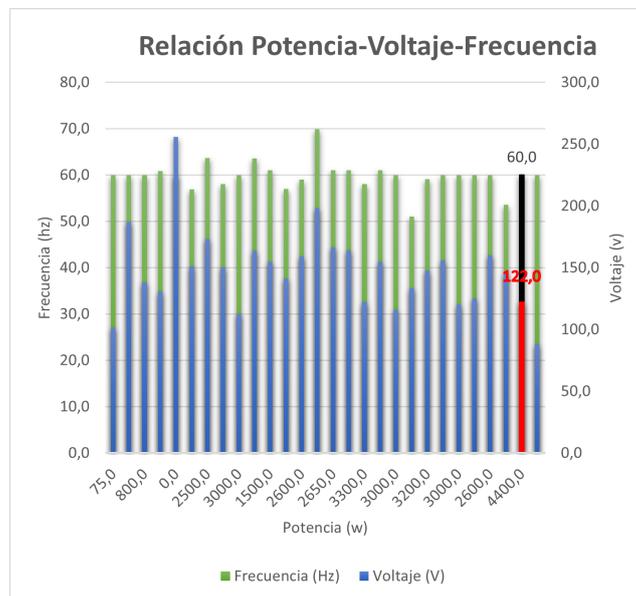


Figura 17: Análisis de Potencia (Autor).

Los resultados obtenidos se detallan en la Figura 17, esto muestra que es viable operar con una potencia de 4 kW sin que la frecuencia y más parámetros del generador se vean afectados. Esta selección de potencia se encuentra

dentro de los límites de funcionamiento seguros y óptimos del generador, lo que asegura su rendimiento eficiente y confiable durante su operación.

No obstante, con el propósito de realizar un análisis económico, se considerará una potencia de generación de 2,74 kW, de acuerdo a los cálculos realizados. Este valor representa la potencia teórica que se puede generar, y permitirá evaluar el desempeño económico de la central.

Además, se procedió a realizar un análisis de cargas específicas para estudiar el desempeño del generador. Esta evaluación se llevó a cabo mediante el uso de una carga completamente resistiva, la cual demanda su máxima potencia de forma constante durante su funcionamiento. Esto implica que la carga conectada a los terminales del generador se mantiene constante. Los resultados de esta prueba es interesante, ya que se conectó una carga de 1500 W que corresponde a un calentador operando con energía monofásica. Dada esta naturaleza, el consumo de corriente en una única fase es elevado, como se detallará a continuación. Este fenómeno provoca una disminución en la velocidad del generador, lo cual impacta en otros parámetros relevantes.

Los datos de las mediciones generan los siguientes resultados:

Carga: Calefactor de 1500 W.

Voltaje en la fase A: 138 V.

Corriente en la fase A: 13,4 A.

Con estos datos se puede calcular una potencia equivalente a la trifásica que se estaría consumiendo del generador y se obtiene el siguiente resultado:

$$S = \sqrt{3} * 138 * 13,4 = 3203 \text{ VA}$$

Además de la potencia se analiza el torque que genera esta carga, el valor del torque no debe exceder de 161,6 NM que viene especificada en la placa del generador caso contrario puede surgir problemas en la vida útil del mismo.

Para esto se mide los datos de frecuencia y la velocidad de rotación del eje del generador.

Velocidad: 284 rpm.

Frecuencia: 61 Hz.

Mediante la aplicación de la Ecuación 20, se deriva el valor subsiguiente del torque inducido por el calefactor, el cual se encuentra interconectado a una única fase.

$$T = \frac{3203 \cdot 61}{2 \cdot \pi \cdot 248} = 125,4 \text{ N-m}$$

Al realizar un análisis de los resultados de la potencia y el torque, es evidente que el generador es capaz de tolerar dicha carga sin presentar inconvenientes. Se procede a analizar un conjunto adicional de cargas Tabla 8, conectadas a las tres fases, con el propósito de evaluar las variaciones en los resultados.

Para las cargas a continuación se obtienen los siguientes resultados.

Fase	Equipo	Potencia	Voltaje	Corriente	Frecuencia	Velocidad
A	Taladro	1100W	162,2V	2,98A	60Hz	299rpm
B	Amoladora	1800W	143,5V	10,5A	60Hz	299rpm
C	Amoladora	1400W	162V	4,8A	60Hz	299rpm

Tabla 8: Análisis de diferentes cargas (Autor).

$$S(A) = \sqrt{3} * 162,2 * 2,98 = 837,2 \text{ VA}$$

$$S(B) = \sqrt{3} * 143,5 * 10,5 = 2609,77 \text{ VA}$$

$$S(C) = \sqrt{3} * 162 * 4,8 = 1346,8 \text{ VA}$$

$$S(T) = 837,2 + 2609,77 + 1346,8 = 4793,81 \text{ VA}$$

$$T = \frac{4793,81 \cdot 60}{2 \cdot \pi \cdot 299} = 153,1 \text{ NM}$$

Basándose en los resultados obtenidos, se verifica que el generador es capaz de alimentar cargas hasta de 4000 W sin que se vean afectadas sus características técnicas nominales para un funcionamiento óptimo.

4.2. Análisis económico

En la presente sección, se llevará a cabo un análisis de los costos asociados a la central, comenzando con la evaluación de los gastos inherentes a la implementación del proyecto. A continuación, se procederá al estudio de los costos operativos de la planta. Finalmente, se abordarán los costos relacionados con el mantenimiento integral del sistema.

4.2.1. Costos de construcción

El costo de construcción de un proyecto de pico generación hidroeléctrica abarca una serie de componentes que deben ser evaluados de manera integral. Entre estos elementos se encuentran los gastos relacionados con la obra civil, como la construcción de estructuras como presas o depósitos, la instalación de tuberías y canales, así como la edificación de infraestructura necesaria como la casa de máquinas. Además, se deben considerar los costos asociados a la adquisición e instalación de equipos, tales como turbina, generador y válvulas de control, dicho costo en este proyecto puntual es de 21000 USD.

4.2.2. Análisis de operación de la planta

Dentro de los costos que se generan en la operación de la planta, se debe considerar la contratación de una persona para que se encargue de la apertura y cierre de las válvulas instaladas, para este fin se estima un valor de 50 dólares mensuales que se debería cancelar durante los 8 meses de operación dentro del año y a su vez considerar el tiempo de vida de la central que se considera 15 años, obteniendo así el costo total que genera la operación de la planta.

$$C=50*8*15 = 6000 \text{ USD}$$

4.2.3. Análisis de mantenimiento

En el proceso de mantenimiento debemos considerar la limpieza de la laguna y la toma de entrada de agua, en este rubro también se considera el mantenimiento de la turbina y los demás elementos instalados, este mantenimiento se puede realizar cada dos años, generando los siguientes rubros explicados en la Tabla 9.

Tiempo	Detalle	P.U.(USD)	P.T.(USD)
6	Hora de máquina	25	150
2	Mantenimiento de turbina	50	100
2	Mantenimiento de generador	50	100
		Total	350

Tabla 9: Rubros generados por mantenimiento (Autor).

Con este valor y considerando que se realizará este mantenimiento en períodos de dos años, además se prevé que la pico central tendrá una vida útil de quince

años se debería considerar siete intervenciones de mantenimiento generando así el siguiente costo en el tiempo de vida útil de la pico central.

$$C_{man} = 350 * 7 = 2450 \text{ USD} \quad (28)$$

4.2.4. Cálculo de retribución de acuerdo a la generación

Utilizando los resultados obtenidos en la generación, se calcula el costo total que se podría obtener en el tiempo de operación de la planta que es de 15 años, de este tiempo se considera los meses en los que no se podrá generar debido al desabastecimiento de agua en el reservorio en tiempos de sequía se calcula y se refleja este resultado en el siguiente calculo.

$$Ingreso = P * t * 0,1 \quad (29)$$

Donde:

Ingreso = Costo total en un período de 15 años.

P = Potencia instalada.

t = Tiempo.

0,1 = Precio estimado del kWh.

$$Ingreso = 2,74 * (24 * 30 * 8 * 15) * 0,1 = 23673,6 \text{ USD}$$

Este resultado se analiza considerando una utilización máxima de 24 horas al día y solamente la potencia calculada teóricamente.

Como se puede apreciar, el ingreso generado por la planta no es suficiente para cubrir la inversión inicial y los costos relacionados con la operación y el mantenimiento del proyecto.

Esto puede ser respaldado mediante la realización de un análisis del Valor Actual Neto (VAN) y la Tasa Interna de Retorno (TIR). Estas herramientas adquieren una relevancia en la evaluación de la viabilidad de un proyecto, ya que permiten determinar si es aconsejable o no llevar a cabo una inversión, con el fin de salvar los intereses del inversor y evitar posibles perjuicios económicos [27].

Si el análisis del VAN tiene un resultado positivo indica que es un proyecto viable, caso contrario si el resultado es negativo indica que dicho proyecto no es rentable y por lo tanto se debe abandonarlo, esto se presenta en la Tabla 10.

La ecuación que se utiliza para la resolución del VAN se describe en la Ecuación 32.

$$VAN = -Inv + \sum_{j=1}^n \frac{F_j}{(1+i)^j} \quad (30)$$

En donde:

-Inv: Inversión inicial del proyecto.

j: el tiempo en años.

Fj: Flujo neto.

i: Tasa de inversión.

Años	Flujo de beneficio	Flujo de costo	Beneficio neto
0	0	-21000	-21000
1	1578,24	400	1178,24
2	1578,24	750	828,24
3	1578,24	400	1178,24
4	1578,24	750	828,24
5	1578,24	400	1178,24
6	1578,24	750	828,24
7	1578,24	400	1178,24
8	1578,24	750	828,24
9	1578,24	400	1178,24
10	1578,24	750	828,24
11	1578,24	400	1178,24
12	1578,24	750	828,24
13	1578,24	400	1178,24
14	1578,24	750	828,24
15	1578,24	400	1178,24
Tasa(k)	0,1	VAN	-13265,99

Tabla 10: Resultado del VAN con 2,74 (kW) (Autor).

De acuerdo al resultado con (2,74 kW) se puede mencionar que el proyecto no es viable por lo tanto no se debería invertir en el mismo.

Ahora se realizará el mismo análisis con la potencia de 4 (kW), que es la carga con la que el generador puede trabajar constantemente sin presentar anomalías en el mismo, primero se calcula los ingresos que se tendría con esta potencia, luego se realizará el estudio del VAN para analizar la rentabilidad del proyecto.

$$Ingreso = 4 * (24 * 30 * 8 * 15) * 0,1 = 34560 \text{ USD}$$

Años	Flujo de beneficio	Flujo de costo	Beneficio neto
0	0	-21000	-21000
1	2304	400	1904
2	2304	750	1554
3	2304	400	1904
4	2304	750	1554
5	2304	400	1904
6	2304	750	1554
7	2304	400	1904
8	2304	750	1554
9	2304	400	1904
10	2304	750	1554
11	2304	400	1904
12	2304	750	1554
13	2304	400	1904
14	2304	750	1554
15	2304	400	1904
Tasa(k)	0,1	VAN	-7745,81

Tabla 11: Resultado del VAN con 4 kW (Autor).

Como se puede apreciar el análisis del VAN, aún el proyecto no es viable, pese a que el calculo de ingresos se observa una ganancia, esto se da porque la tasa de interés juega un papel importante en el movimiento del dinero, mismo que indica la rentabilidad que debe generar el capital que se ha invertido en un proyecto.

Esto se debe a los costos relacionados en la implementación, dichos costos se podría mejorar utilizando diferentes elementos en la construcción de proyectos similares, por ejemplo el mismo generador se podría emplazar uno con características similares pero con una tecnología distinta, esto reduciría en gran medida el costo en la inversión inicial, ocasionando la rentabilidad de los proyectos.

A pesar de esto el proyecto de la pico generación en Paute se justifica por el propósito principal, que es un proyecto con un enfoque educativo y permite fomentar la investigación y el desarrollo de los conocimientos adquiridos de este tipo de proyectos que buscan reducir el impacto negativo causante por la obstrucción de causes en riachuelos y fuentes naturales de agua.

5. Conclusiones

La información recopilada del volumen de lluvia que se da en el lugar obedece a ciertos meses bien definidos que va desde septiembre a mayo con el abastecimiento requerido, sin embargo en la actualidad se ve afectado por el cambio climático que se da a nivel mundial, por lo tanto se debe seguir analizando los cambios que se puedan dar a un futuro.

Con la precipitación que se da en la zona, sobretodo en la parte alta el reservorio puede llegar a su máxima capacidad en un lapso de doce horas aproximadamente en los meses en los que haya presencia constante de lluvia con esto se garantizará un funcionamiento óptimo de la pico generación.

Con las pruebas realizadas y los resultados obtenidos se puede mencionar que la planta funciona correctamente para potencias de hasta 4000 W, esto en base a las mediciones realizadas, sin embargo de acuerdo a los cálculos teóricos se puede conectar hasta 2700 W, estos resultados dependerán de los propósitos finales que se de a la hidro generación del lugar, todos estos resultados indican que se puede diseñar e implementar proyectos similares en otros sitios en donde se presenten condiciones similares a las del lugar que se está implementado este proyecto.

Dentro de las pruebas realizadas en el sitio con diferentes cargas, se verifica que, para dimensionar un generador, a más de la potencia eléctrica, es necesario considerar que el torque de las cargas no sobrepase al Par nominal del generador, esto debido a que éste se frena y a disminuye la frecuencia. Es importante considerar sobre todo el torque de arranque de cada elemento.

Al realizar el análisis económico para un plazo de 15 años de vida del proyecto, se concluye que con la potencia calculada y con un valor de diez centavos el kWh, no se encuentra viable ya que no se recuperaría la inversión inicial, menos los costos asociados al funcionamiento y mantenimiento de la pico central, como se observa los resultados negativos del proyecto se asocian a la inversión inicial que es muy elevada ya que los componentes instalados en la pequeña planta son costosos debido la tecnología utilizada. Sin embargo se justifica ya que al ser un proyecto educativo es relevante para que el estudiante pueda generar experiencia en el desarrollo de proyectos similares y realizar estudios más profundos en busca de mejorar los diseños y la implementación de estos.

6. Recomendaciones

A partir del estudio realizado, se evidencia la importancia de considerar ciertas recomendaciones para el desarrollo de proyectos similares:

- Implementar dispositivos de monitores y control climático en el lugar de emplazamiento del proyecto, con el propósito de recopilar datos precisos y actualizados en el transcurso del tiempo. Esta estrategia buscará enriquecer los conocimientos y facilitará la mejora continua en la etapa de diseño, permitiendo la optimización de los sistemas hidroeléctricos en función de los datos reales de precipitación registrados. De esta manera, se fortalecerá la capacidad de adaptación y perfeccionamiento de los diseños, garantizando una mayor eficiencia en la generación eléctrica.
- Ejecutar proyectos enfocados en la preservación de los recursos naturales en la zona de emplazamiento de la PCH, en particular centrados en la conservación y restauración de la cuenca hidrográfica que alimenta el embalse. Esta iniciativa debería abordar el mantenimiento y la revitalización de la vegetación en la cuenca de la quebrada, con el objetivo de salvar la calidad del agua que fluye hacia el reservorio. La reforestación y el mantenimiento adecuado contribuirán a proteger la biodiversidad local, minimizar la erosión del suelo y mantener la sostenibilidad a largo plazo
- Realizar el arranque operativo de la pico central de manera semanal es altamente recomendable para evitar posibles deterioros en los componentes metálicos del proyecto. La exposición constante al agua durante su operación podría propiciar la oxidación en determinados elementos que entran en contacto directo con el agua.

Desde la perspectiva de este proyecto, es esencial llevar a cabo una evaluación que abarque diversos aspectos cruciales. En primer lugar, se debe realizar un análisis detallado de la naturaleza de la carga que se pretende conectar al sistema. A continuación, es fundamental considerar la disponibilidad de agua, ya que esta variable ejerce un impacto directo en el rendimiento y la eficiencia del proyecto. La clave radica en la implementación de proyectos que se centran en la incorporación de los componentes estratégicos y esenciales, lo que garantizará un enfoque eficaz y una óptima relación costo-rendimiento.

Es importante que en una segunda fase del proyecto se pueda implementar un controlador automático que gestione la apertura y cierre de la válvula, lo

cual permitirá regular el caudal de ingreso hacia la turbina. Además, se recomienda la incorporación de un regulador de voltaje para mantener constante el suministro eléctrico hacia las cargas conectadas.

Referencias

- [1] Carlos Arturo Duarte Agudelo. *Mecánica de Fluidos*. Colombia, 2017.
- [2] Weather Atlas. Clima y previsión metereológica mensual paute ecuador. 2023.
- [3] A. Barragán-Escandón X. Serrano-Guerrero B. Romero-Añazco, A. Siguenza-Maldonado. Methodology to evaluate the repowering of small hydroelectric power plants: Case study el amarillo in portovelo, ecuador. 2019.
- [4] José Carta; Roque Pérez; Antonia Santos; Manuel Castro; Eduardo Collado. *Centrales de energía renovable*. Madrid, 2013.
- [5] Agencia Internacional de Energías. Energías renovables 2021. *Análisis y pronóstico a 2026*, 2021.
- [6] Juan Carlos Vega de Kuyper; Santiago Ramírez Morales. *Fuentes de Energía, Renovables y No Renovables*. Colombia, 2014.
- [7] Municipio del Cantón Paute. Pdot-paute-2020. 2021.
- [8] Luis Cuesta Diego; Eugenio Vallarino Cánovas del Castillo. *Aprovechamientos Hidroeléctricos*. Madrid, 2015.
- [9] Greef New Energy. Generador síncrono. 2020.
- [10] Harper Enríquez. *El Libro Práctico de los Generadores, transformadores y Motores Eléctricos*. México, 2013.
- [11] Javier Sanz Feito. *Máquinas Eléctricas*. Madrid, 2002.
- [12] Edwin Chica Fredys Romero, Laura Velásquez. Consideraciones de diseño de una turbina michell-banki. 2020.
- [13] R. Guna, R. y Sagia. Generación de energía hidroeléctrica. en enciclopedia de materiales renovables y sostenibles. 2018.
- [14] Antonio Campo López. *Válvulas de Control*. España, 2014.

- [15] María José Manzano Mantilla. Situación actual del sector eléctrico ecuatoriano y sus desafíos., 2022.
- [16] Google Maps. Maps. 2023.
- [17] Molecor. Gama de productos pvc. 2023.
- [18] J Molina and X Serrano. Diseño y análisis técnico económico para proyectos de centrales minihidráulicas. *IEEE Ecuador Magazine; IEEE Ecuador: Manta, Ecuador*, pages 7–12, 2016.
- [19] Jesús Fraile Mora. *Máquinas Eléctricas*. Madrid, 2015.
- [20] José Abraham Blanco Morazán. Proyectos pico hidroeléctricos para electrificación de fincas cafetaleras en zonas aisladas. 2016.
- [21] Robert L. Mott. *Mecánica de Fluidos*. México, 2006.
- [22] American Society of Mechanical Engineers. Electric power generation, transmission, and distribution. 2021.
- [23] OLADE. Guía para la evaluación del impacto ambiental de centrales hidroeléctricas. 1995.
- [24] Freddy Javier Landa Quimbita; Luis Eduardo Llanganate Quinatoa. Diseño y construcción de una pico central hidroeléctrica utilizando una turbina michelle banki para generación eléctrica en el sector de las carne-litas del cantón tena, 2009.
- [25] Ortiz Flores Ramiro. *Pequeñas Centrales Hidroeléctricas*. Colombia, 2011.
- [26] Andrés Humberto Cañar Ramírez. Diseño e implementación de un sistema scada para la central hidroeléctrica la península., 2009.
- [27] Pedro Ramírez. Van y tir: Concepto, diferencias y cómo calcularlos. 2022.
- [28] Edison Medina; Byron Sigchi. Diseño y análisis para la implementación de un sistema de pico aprovechamiento en generación hidroeléctrica, 2021.