



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE CUENCA**  
**CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**“VERIFICACIÓN MEDIANTE SIMULACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS  
OPERATIVAS DE UNA PICO TURBINA DE APROVECHAMIENTO”**

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

AUTOR: JUAN CARLOS QUITUISACA SUMBA

TUTOR: ING. MARLON XAVIER QUINDE ABRIL, MSC.

Cuenca - Ecuador

2023

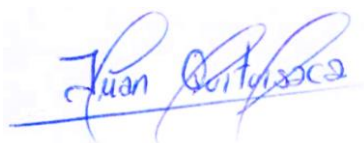
## CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Juan Carlos Quituisaca Sumba con documento de identificación N° 0106849755, 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, 28 de febrero del 2023

Atentamente,



---

Juan Carlos Quituisaca Sumba  
0106849755

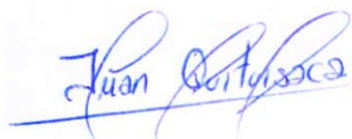
## **CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Juan Carlos Quituisaca Sumba con documento de identificación N° 0106849755, 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: “Verificación mediante simulación de las características operativas de una pico turbina de aprovechamiento”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, 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, 28 de febrero del 2023

Atentamente,



---

Juan Carlos Quituisaca Sumba  
0106849755

## CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Marlon Xavier Quinde Abril con documento de identificación N° 0104627658, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: “VERIFICACIÓN MEDIANTE SIMULACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS OPERATIVAS DE UNA PICO TURBINA DE APROVECHAMIENTO”, realizado por Juan Carlos Quituisaca Sumba con documento de identificación N° 0106849755, 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, 28 de febrero del 2023

Atentamente,



---

Ing. Marlon Xavier Quinde Abril, MSc.

0104627658

## **DEDICATORIA**

La presente tesis está dedicada a:

A Dios y a la Virgencita del Cisne por darme salud y fuerzas para culminar mi formación profesional.

A mis padres Gerardo Quituisaca y Antonia Sumba quienes, con su apoyo incondicional, amor, paciencia y esfuerzo, me ayudado a cumplir hoy esta meta en mi vida.

A mis hermanos Manuel, Luis y Wilmer por brindarme su apoyo en los buenos y malos momentos, por su confianza y por todos los consejos que me han dado, esto me ha servido para crecer como persona.

De igual manera a mis hermanas Cecilia y Tania, por su cariño y ayuda durante este proceso, gracias por su confianza y sus palabras de apoyo.

A mis abuelitos, por ser parte de mi formación, en mi educación y valores como persona y por su amor incondicional.

A toda mi familia por apoyarme cuando más lo necesite, por creer en mi capacidad y brindarme su cariño, amor y comprensión durante toda esta etapa.

A mi mascota Oddy, por ser mi fiel acompañante y mejor amigo, te desvelabas conmigo mientras realizaba mis tareas universitarias; ahora ya no estas, pero siempre te recordare.

## **AGRADECIMIENTOS**

Como prioridad en mi vida agradezco a Dios y a la Virgencita del Cisne por protegerme durante mi carrera universitaria, por ser mi guía, fortaleza y por su bondad en los momentos que más necesitaba, por darme fuerzas para superar los obstáculos y dificultades diarias y así me permitió culminar una meta más en mi vida

Agradezco a mis papas, Gerardo y Antonia por ser el pilar fundamental en mi vida, por su ayuda incondicional, por dedicarme su tiempo y amor para ser una mejor persona, gracias por inculcar en mí los valores y el ejemplo de valentía y esfuerzo que han sido la base para alcanzar unas de mis metas.

A mis hermanos y hermanas, por darme su apoyo y confiar en mí

A mis cuñados: John y Juan, por compartir conmigo momentos de alegría y fracasos, por su apoyo incondicional en mi vida, gracias.

A los docentes, por sus palabras sabias y por compartir sus conocimientos, los llevaré donde quiera que me vaya, en el transitar profesional.

A mi Tutor, Ing. Marlon Quinde, por guiarme y tener paciencia y constancia, este trabajo no lo habría logrado fácilmente. Gracias por los consejos y las ideas, usted formo parte importante de mi formación y por sus palabras de aliento cuando más lo necesite.

A mis amigas, Gaby, Patricia y Cristina que me acompañaron en este viaje, hoy culmino esta maravillosa trayectoria, gracias, por formar parte de mi vida, gracias por compartir las horas y días que transitaba y no puedo dejar de agradecer por el apoyo.

A mis amigos, amigas y compañeros, por brindarme su amistad y compartir buenos momentos.

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	II
CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA.....	III
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	IV
DEDICATORIA.....	V
AGRADECIMIENTOS .....	VI
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIII
RESUMEN.....	XVI
1 Introducción.....	15
2 Planteamiento de problema.....	16
2.1 Antecedentes.....	16
2.2 Problema General .....	16
2.3 Problemas Específicos.....	16
2.4 Importancia y alcances .....	17
2.5 Delimitación .....	17
3 Objetivos.....	17
3.1 Objetivo general .....	17
3.2 Objetivos específicos.....	18
4 Marco Teórico.....	18
4.1 Evolución histórica de la Energía hidráulica.....	18
4.2 Centrales minihidráulicas.....	20
4.2.1 Definición básica de una minicentral hidráulica.....	20
4.2.2 Componentes principales de una mini central hidráulica.....	21

4.2.3	Captación o bocatomas.....	22
4.2.4	Canal.....	23
4.2.5	Aliviadero o vertedero.....	23
4.2.6	Desarenador.....	23
4.2.7	Cámara de turbinas.....	23
4.2.8	Tuberías de presión.....	23
4.2.9	Casa de máquinas.....	24
4.2.10	Transformadores.....	24
4.2.11	Canal de descarga.....	24
4.3	Tipos de aprovechamiento.....	25
4.3.1	Aprovechamiento con azud.....	25
4.3.2	Aprovechamiento de pie de presa.....	26
4.3.3	Aprovechamiento de agua Fluyente.....	26
4.3.4	Aprovechamiento con túnel de desvío.....	27
4.3.5	Clasificación de pequeñas centrales hidroeléctricas según la capacidad instalada.	27
4.4	Desarrollo de la energía eléctrica a pequeña escala en zonas no interconectadas.....	28
4.5	Principio de funcionamiento de una pequeña central hidroeléctrica.....	29
4.6	Producción de energía e importación.....	30
4.6.1	Proyecto de minicentrales hidroeléctricas en Ecuador.....	33
4.7	Equipos de una central hidroeléctrica.....	34
4.7.1	Clasificación de las turbinas hidroeléctricas.....	34
4.7.2	Turbina de reacción.....	35
4.7.3	Turbina de acción o impulsión.....	35
4.8	Turbina Pelton.....	36
4.8.1	Historia de la turbina Pelton.....	36



4.9	Turbina Francis:.....	36
4.9.1	Historia de las turbinas Francis .....	36
4.10	Turbina Kaplan .....	37
4.10.1	Historia de la turbina Kaplan.....	37
4.11	Turbina Michell-Banki .....	38
4.11.1	Historia de la turbina Michell Banki .....	38
4.11.2	Campo de aplicación .....	40
4.11.3	Otras áreas de aplicación:.....	40
4.11.4	Materiales de construcción de la turbina Michell Banki .....	40
4.11.5	Características principales de la turbina Michell Banki.....	41
4.11.6	Componentes de la turbina Michell Banki .....	41
4.11.7	Funcionamiento de la turbina Michell Banki .....	43
4.12	Aspectos de instalación de una central hidroeléctrica y ecuaciones. ....	44
4.12.1	Determinación del salto del agua .....	44
4.12.2	Potencia a instalar y producción.....	45
4.12.3	Producción.....	46
4.12.4	Energía producida y horas equivalentes.....	47
4.12.5	Caudal.....	48
4.12.6	Cálculo del tiempo de drenado de la laguna.....	49
4.12.7	Ecuaciones diferenciales .....	49
4.12.8	Salto neto (ecuación (13)) .....	49
4.12.9	Diámetro interior del rodete (ecuación (14)).....	49
4.12.10	Velocidad de rotación (ecuación (15)) .....	49
4.12.11	Número específico de revoluciones $N_q$ (ecuación (16)) y $N_s$ (ecuación (17)).	
	50	
4.12.12	Número de álabes .....	50

4.12.13	Coeficiente de velocidad absoluta $K_c$ del inyector .....	50
4.12.14	Potencia de la turbina .....	50
4.12.15	Cálculo de la Potencia hidráulica (ecuación (21)).....	51
4.12.16	Rendimiento hidráulico (ecuación (22)).....	51
4.12.17	Rendimiento del generador (ecuación (23)) .....	51
4.12.18	Calculo eficiencia mecánica (ecuación (24)).....	51
4.12.19	Cálculo de la potencia mecánica (ecuación (25)).....	51
4.12.20	Cálculo del torque (ecuación (26)) .....	51
4.12.21	Cálculo de la presión (ecuación (27)).....	52
4.12.22	Tubería forzada.....	52
4.12.23	Cálculo de las perdidas primarias ( $hf_1$ ) (ecuación (29)) .....	52
4.12.24	Rugosidad relativa (ecuación (30)).....	52
4.12.25	Reynolds (ecuación (31)).....	52
4.12.26	Flujo laminar, transitorio y turbulento.....	53
4.12.27	Perdidas secundarias (ecuación (32)) .....	53
5	Metodología .....	54
5.1	Diseño prototipo de turbina Michell Banki .....	54
5.2	Diseño de investigación.....	54
5.3	Parámetros de selección y construcción de la Turbina Hidráulica Michel Banki .....	56
5.3.1	Ubicación geográfica del proyecto.....	56
5.3.2	Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad. ....	57
5.3.3	Análisis para la simulación de software. ....	57
5.3.4	Instrumentos utilizados.....	58
5.3.5	Maquinaria para realizar pruebas. ....	58
5.3.6	Proceso para medición.....	58
5.4	Cálculos matemáticos .....	60

5.4.1	Cálculo del tiempo de vaciado de la laguna .....	61
5.5	Diseño mecánico de la turbina.....	63
5.5.1	Salto neto.....	63
5.5.2	Diámetro interior del rodete .....	64
5.5.3	Velocidad de rotación.....	64
5.5.4	Número específico de Revoluciones (Nq) y (Ns). .....	64
5.5.5	Número de alabes .....	65
5.5.6	Coeficiente de velocidad absoluta Kc del inyector .....	65
5.5.7	Potencia de la turbina .....	65
5.5.8	Cálculo de la Potencia hidráulica (P) .....	66
5.5.9	Rendimiento hidráulico .....	67
5.5.10	Rendimiento del generador .....	67
5.5.11	Calculo eficiencia mecánica.....	67
5.6	Toma de datos 1.....	68
5.6.1	Potencia mecánica .....	68
5.6.2	Cálculo del torque .....	69
5.6.3	Cálculo de la presión .....	70
5.6.4	Tubería forzada.....	71
5.6.5	Principio de Bernoulli .....	71
5.6.6	Cálculo de las pérdidas primarias (hf1).....	72
5.6.7	Rugosidad relativa .....	72
5.6.8	Reynolds.....	73
5.6.9	Perdidas secundarias.....	74
5.7	Diseño de componentes del Sistema. ....	75
5.7.1	Alabe. ....	75
5.7.2	Rodete Michell Banki.....	76

5.7.3	Carcasa .....	76
5.7.4	Alabe Directriz .....	77
5.7.5	Eje del rodete.....	77
5.7.6	Inyector.....	77
5.7.7	Ensamble de la turbina Michael Banki.....	78
6	Análisis de Resultados .....	79
6.1.1	Resultados de la simulación. ....	84
7	Conclusiones .....	86
8	Recomendaciones .....	87
9	Referencias.....	88
10	Anexos .....	94

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Molino de agua nórdico o griego.....	19
<b>Figura 2.</b> Molino de agua romano.....	19
<b>Figura 3.</b> Minicentral hidráulica.....	21
<b>Figura 4.</b> Componentes de una central hidroeléctrica.....	22
<b>Figura 5.</b> Componentes de una mini central.....	25
<b>Figura 6.</b> Obras de conducción.....	25
<b>Figura 7.</b> Aprovechamiento con azud. ....	26
<b>Figura 8.</b> Aprovechamiento de pie de presa.....	26
<b>Figura 9.</b> Aprovechamiento de agua fluuyente. ....	27
<b>Figura 10.</b> Aprovechamiento con túnel de desvío.....	27
<b>Figura 11:</b> Partes de una central hidráulica.....	30
<b>Figura 12.</b> Porcentaje de participación de fuentes de energía en sistema nacional interconectado (SIN) del Ecuador (GWh).....	31
<b>Figura 13.</b> Producción bruta energética anual por fuente en Ecuador, 2020. ....	31
<b>Figura 14.</b> Producción bruta hidráulica anual porcentual del Ecuador (GWh) en 2020. ....	32
<b>Figura 15.</b> Producción bruta de energía por fuente hidráulica en las centrales del Ecuador (GWh), 2020.....	33
<b>Figura 16.</b> Esquema conceptual de una turbina hidráulica. ....	34
<b>Figura 17.</b> Esquema básico de una turbina de reacción Francis [34].....	35
<b>Figura 18.</b> Esquema básico de acción de una turbina [34].....	36
<b>Figura 19.</b> a) Partes continuas de turbina Peltón, b) distribuidor c) inyectores. ....	36
<b>Figura 20.</b> a) Componentes de turbina Francis, b) distribuidor Francis.....	37
<b>Figura 21.</b> a) Componentes de turbina Kaplan, b) distribuidor Kaplan. ....	38
<b>Figura 22.</b> Turbina Michell Banki.....	39
<b>Figura 23.</b> Campo operativo de la turbina Michell Banki.....	39
<b>Figura 24.</b> Etapas de transferencia de energía en una turbina Michell Banki.....	39
<b>Figura 25.</b> Esquema de turbina de flujo cruzado patentado por la casa OSSBERGER.....	40
<b>Figura 26.</b> Esquema de mecanismo principal de turbina Michell Banki. ....	41
<b>Figura 27.</b> Componentes de una turbina Michell Banki. ....	42
<b>Figura 28.</b> Etapas de funcionamiento de una turbina Michell Banki.....	44
<b>Figura 29.</b> Entrada del agua al rodete de la turbina, (a) horizontal, (b) vertical. ....	44

<b>Figura 30.</b> Esquema para definir los diversos saltos de agua.....	45
<b>Figura 31.</b> Comportamiento de fluido donde laminar (a) y turbulento (b). .....	53
<b>Figura 32.</b> Metodología para el diseño de la turbina.....	56
<b>Figura 33.</b> Ubicación geográfica del emplazamiento.....	56
<b>Figura 34.</b> Embalse del agua en sitio de interés .....	58
<b>Figura 35.</b> Válvula de compuerta de seguridad hacia la turbina .....	59
<b>Figura 36.</b> Medición de rpm de la turbina y voltaje del generador .....	60
<b>Figura 37.</b> Esquema de alábe de la turbina .....	75
<b>Figura 38.</b> Esquema del Rodete en software inventor.....	76
<b>Figura 39.</b> Esquema de la carcasa en software inventor .....	76
<b>Figura 40.</b> Esquema del alabe directriz en software inventor .....	77
<b>Figura 41.</b> Esquema del eje del Rodete en software inventor .....	77
<b>Figura 42.</b> Esquema del inyector en software inventor.....	78
<b>Figura 43.</b> Esquema de la turbina Michell Banki.....	79
<b>Figura 44.</b> Curva de rpm vs apertura de la válvula sin carga. ....	80
<b>Figura 45.</b> Curva de voltaje vs apertura de la válvula sin carga.....	80
<b>Figura 46.</b> Curvas del voltaje sin carga y con carga vs la apertura de la válvula.....	81
<b>Figura 47.</b> Curvas rpm sin carga y con carga eléctrica vs apertura de válvula .....	82
<b>Figura 48.</b> curvas de rpm vs voltaje .....	82
<b>Figura 49.</b> Potencia mecánica vs rpm y voltaje con carga .....	83
<b>Figura 50.</b> Curva de la eficiencia vs rpm.....	83
<b>Figura 51.</b> curva de RPM vs Torque. ....	84
<b>Figura 52.</b> Trayectoria del flujo en turbina .....	84
<b>Figura 53.</b> Condiciones de frontera .....	85
<b>Figura 54.</b> Grafica de resultados velocidad y presión. ....	85

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla 1:</b> Clasificación de centrales hidroeléctricas según el salto de agua y potencia. ....	28
<b>Tabla 2.</b> Clasificación para pequeños aprovechamientos hidroenergéticos según la capacidad instalada y el tipo de usuario. ....	29
<b>Tabla 3.</b> Distribución porcentual de los costos de construcción de una Central hidráulica. ...	29
<b>Tabla 4.</b> Turbinas y su factor K. ....	49
<b>Tabla 5.</b> Datos obtenidos de la prueba sin carga .....	59
<b>Tabla 6:</b> Datos obtenidos de la prueba con carga de 1550 W .....	60
<b>Tabla 7.</b> Cargas utilizadas para determinar la potencia de la turbina .....	68
<b>Tabla 8.</b> Potencia mecánica con las distintas cargas eléctricas. ....	69
<b>Tabla 9.</b> Resultado del torque aplicado a la carga mecánica .....	70
<b>Tabla 10.</b> Rugosidad relativa .....	73

## **RESUMEN**

En el presente trabajo de investigación aplicada se estudió mediante simulación de las características operativas de una pico turbina de aprovechamiento. Se ha propuesto como solución dos metodologías en la verificación mediante simulación.

En la primera metodología trata sobre el levantamiento de información del lugar de emplazamiento considerando las condiciones del terreno en la que se encuentra instalada la pico turbina de aprovechamiento.

En la segunda instancia con levantamiento de la información se realiza el análisis, modelamiento y simulación del sistema a través de softwares de ingeniería especializados como AUTODESK INVENTOR para la simulación en 3D y el software ANSYS Discovery live para el modelamiento dinámico del sistema. Con el fin de analizar los datos obtenidos del ensayo y determinar la validación del sistema instalado.

Con estas consideraciones se establece el método cuantitativo, la cual consiste en encontrar los parámetros y datos detallados, al realizar el análisis y simulación del flujo de agua se verifica que el rendimiento de la turbina es el necesario para activar el generador sin carga y con carga ya que los resultados muestran este comportamiento.

Para finalizar se realizó una comparación de resultados para demostrar el comportamiento de la turbina montada. Dando buenos beneficios para el lugar que se enfoca el proyecto.

**Palabras Clave:** Turbina Michell Banki, modelamiento, rendimiento, potencia mecánica, potencia hidráulica eficiencia.



## **ABSTRACT**

In the present applied research work, the "Verification by simulation of the operating characteristics of a peak utilization turbine" will be studied. Two methodologies in verification through simulation have been proposed as a solution.

In the first methodology, it deals with the gathering of information from the location of the location, considering the conditions of the land in which the peak exploitation turbine is installed.

In the second instance, with information gathering, the analysis, modeling and simulation of the system is carried out through specialized engineering software such as AUTODESK INVENTOR for 3D simulation and ANSYS discovery software for dynamic modeling of the system. In order to analyze the data obtained from the test and determine the validity of the installed system.

With these considerations, the quantitative method is established, which consists of finding the parameters and detailed data, when carrying out the analysis and simulation of the water flow, it is verified that the performance of the turbine is necessary to activate the generator without load and with load. since the results show this behavior.

Finally, a comparison of results was made to demonstrate the behavior of the assembled turbine. Giving good benefits to the place that the project is focused on.

**Keywords:** Michell Banki turbine, modeling, performance, efficiency.

## 1 Introducción

La energía hidráulica se obtiene a partir del agua que fluye de las montañas y ríos, puede ser aprovechada a través de la energía cinética por la velocidad del caudal, como también por la energía potencial a través de un salto de agua y en combinación de estas dos. Es una fuente de energía renovable de alto rendimiento, puede utilizarse para otros fines como el abastecimiento humano o el riego, por otra parte, se trata del único recurso renovable almacenable. La mayoría de las presas hidráulicas se destinan a la producción de energía eléctrica utilizando turbinas hidráulicas y que cada vez es más extendida en la sociedad actual dado su versatilidad de acuerdo a la necesidad existente, en lo que se refiere al tamaño de sus instalaciones [1].

El Ecuador representa el quinto país del mundo en seguridad eléctrica a partir de energía renovable [2]. Existen zonas rurales marginales que presentan inconvenientes en el suministro de energía eléctrica, es notorio la falta de capacitación por parte de las empresas prestadoras del servicio eléctrico hacia las comunidades rurales ya que poseen un alto costo y por ser zonas muy alejadas. Por lo tanto, la energía eléctrica ha sido postergada por años por factores económicos y por la concesionaria que no ve importante la electrificación en estas zonas por no ser rentables [3] [4].

La producción de energía eléctrica en las zonas rurales puede realizarse aprovechando la energía disponible en un salto hidráulico por medio de una turbina hidráulica y un generador. La turbina hidráulica producirá más energía mecánica mientras mayor sea el producto entre la altura del salto hidráulico y el caudal disponible [5]. La turbina de reducida potencia se denomina pico turbina hidráulica y son de potencia menores a 10KW. Para la selección de la más adecuada turbina se tiene en cuenta las disponibilidades de altura y caudal, los requerimientos de la velocidad de giro y el torque necesario para satisfacer las demandas de acuerdo a la capacidad del generador [6].

Una de las turbinas más utilizadas en el pico central hidroeléctrica es la turbina Michell-Banki es una turbina rotodinámica de flujo axial, se caracteriza por poder operar a bajos regímenes. Este tipo de turbomáquina es favorable para aprovechamientos a pequeña escala y es una buena opción para electrificación en las zonas rurales con la ventaja de rápida respuesta a corto plazo en la demanda eléctrica [7] [8].

## **2 Planteamiento de problema**

### **2.1 Antecedentes**

De acuerdo a la investigación “Diseño y análisis para la implementación de un sistema pico aprovechamiento en generación hidroeléctrica”, tiene el propósito de diseñar y analizar la implementación de una pico central hidroeléctrica (PCH) para el aprovechamiento de recursos hídricos de las zonas rurales aisladas, la cual utilizo modelos de ingeniería para su diseño y análisis. La investigación fue cuantitativa con enfoques de tipo exploratorio y descriptivo. Como resultados se realizó el diseño de los componentes para que puedan soportar las cargas de presión y esfuerzos que se genera en su aplicación, y es viable la implementación de la PCH, se estima con esta investigación que en el austro ecuatoriano se puede generar energía hidroeléctrica utilizando las fuentes de energía renovables a pequeña escala [9].

A partir de esta investigación se realizó la construcción de la turbina Michell Banki para ser emplazada en el terreno de diseño, cuya ubicación es en el campus Juan Lunardi de la Universidad Politécnica Salesiana del cantón Paute, aprovechando una laguna artificial localizada en la parte alta que abastece de agua de riego a los terrenos del campus, de esta se aprovecha un salto hidráulico existente de aproximadamente 10 m que ha permitido dirigir por una tubería de aproximadamente 100 m el caudal hacia la turbina. Así mismo se logró analizar los principales componentes de una minicentral hidroeléctrica al implementarla de manera física. La turbina Michell Banki tiene un diseño y construcción sencillo que al resto de turbinas la cual hace que el precio sea aproximadamente un 50% inferior a las convencionales [10] [11] [12].

### **2.2 Problema General**

¿Es posible analizar el comportamiento a través del modelamiento de la pico turbina de aprovechamiento para identificar los factores del terreno y variables presentadas en la construcción del sistema?

### **2.3 Problemas Específicos**

¿Se podrá analizar los datos de la implementación real de la pico turbina para establecer los factores del terreno que permite modelar el sistema?

¿Es posible modelar la pico turbina con software de ingeniería para determinar el comportamiento dinámico de los elementos, considerando variables tomadas directamente en el sector de intervención?

¿Se podrá analizar los datos obtenidos del análisis dinámico y compararlos con los datos tomados del funcionamiento real de la pico turbina para determinar los factores que afectan el cálculo teórico de la eficiencia del sistema?

## **2.4 Importancia y alcances**

La importancia que radica el presente proyecto es la oportunidad de validar una instalación real de una pico central hidráulica de aprovechamiento para generación eléctrica que se encuentra instalada en el campus Juan Lunardi del cantón Paute, para identificar su comportamiento en función del abastecimiento del fluido proveniente de la laguna teniendo en cuenta las condiciones reales del emplazamiento y poder comprobar su eficiencia, la capacidad de generación en función del abastecimiento de agua de la laguna, el torque necesario para generar energía en función de la carga requerida del generador.

El alcance del proyecto radica en aplicar los conocimientos en Ingeniería Mecánica en la búsqueda de nuevas formas de generar energías renovables para su aplicación en el abastecimiento de energía eléctrica principalmente en zonas rurales. Con la ayuda de software de ingeniería realizar un modelado para obtener datos que permitirá validar estos sistemas de energía eléctrica de manera experimental y justificarla en la práctica.

## **2.5 Delimitación**

El presente proyecto será ejecutado en el campus Juan Lunardi ubicado en el Cantón Paute, forma parte de una investigación del grupo de investigación en energías GIE de la Universidad Politécnica Salesiana, se realiza el estudio, con los cálculos analizados, y el sistema construido y emplazado, se lleva a cabo el modelamiento, con la ayuda de un software, para así determinar los diferentes factores de operación de la pico turbina.

# **3 Objetivos**

## **3.1 Objetivo general**

Analizar el comportamiento a través del modelamiento de la pico turbina de aprovechamiento identificado los factores del terreno y variables presentadas en la construcción del sistema.

### **3.2 Objetivos específicos**

- Levantar los datos de la implementación real de la pico turbina para establecer los factores del terreno que permitan modelar el sistema.
- Modelar el pico turbina con software de ingeniería para determinar el comportamiento dinámico de los elementos considerando variables tomadas directamente en el sector de intervención.
- Analizar los datos obtenidos del análisis dinámico y compararlos con los datos tomados del funcionamiento real de la pico turbina para determinar factores que afecten el cálculo teórico de la eficiencia del sistema.

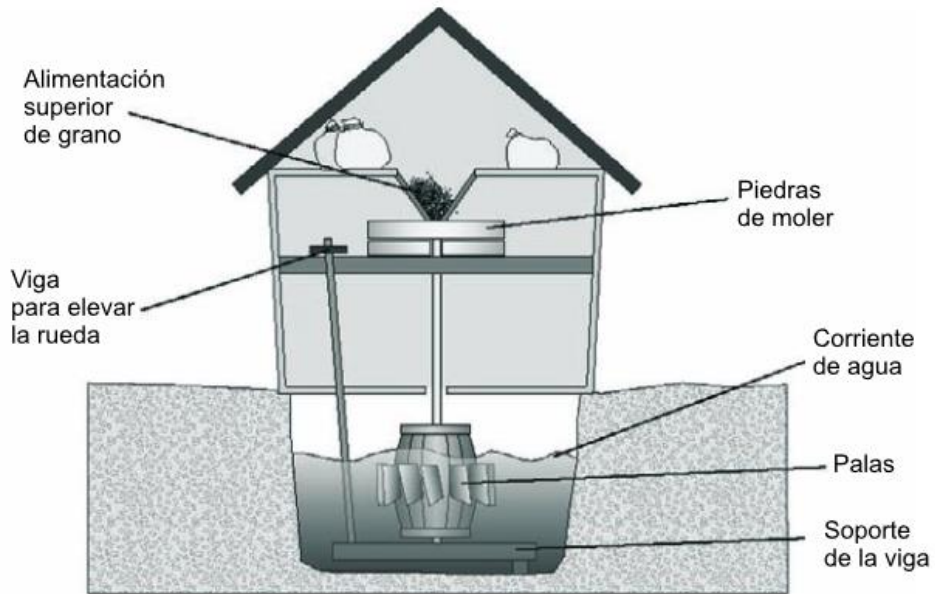
## **4 Marco Teórico**

Se presenta el fundamento teórico que hace referencia a la evolución histórica de la energía hidráulica y su aprovechamiento, para continuar con la aplicación actual los tipos de centrales y específicamente la composición de pequeñas centrales hidroeléctricas, en la que se identificarán su principio de funcionamiento, partes principales de las turbinas, sus aplicaciones y finalmente se da a conocer, las características de una turbina Michell Banki.

### **4.1 Evolución histórica de la Energía hidráulica.**

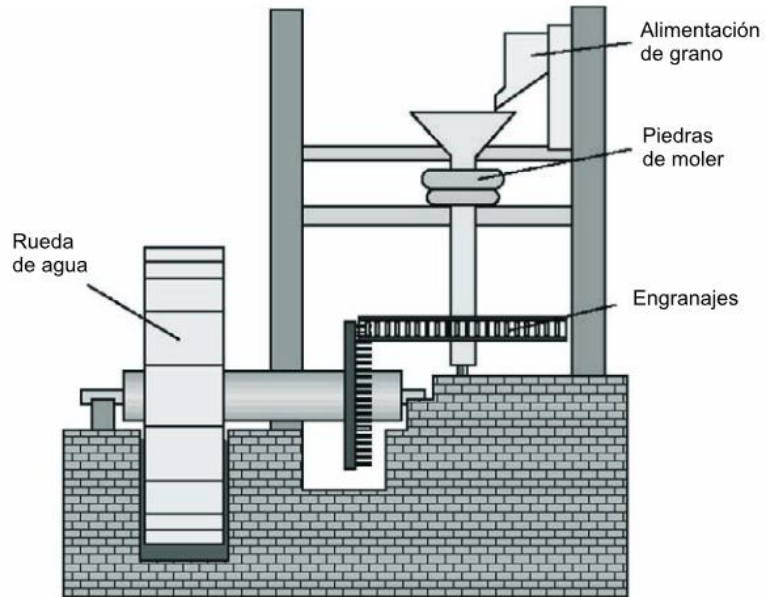
Los antiguos Romanos y griegos utilizaban las ruedas de agua para realizar tareas laboriosas aprovechando la energía del agua. La primera central hidroeléctrica se construyó en 1880 en Northumberland Gran Bretaña. El renacimiento de la energía hidráulica se produjo por el desarrollo del generador eléctrico, seguido del perfeccionamiento de la turbina hidráulica y debido al aumento de la demanda de electricidad a principios del siglo XX. A principios de la década de los noventa, las primeras potencias productoras de hidroelectricidad eran Canadá y Estados Unidos [12].

Los primeros molinos de agua fueron probablemente molinos de eje vertical destinados a la molienda de grano, conocidos como molinos nórdicos o molinos griegos (Figura 1) los cuales se aprecia durante el primero o segundo ciclo antes de cristo en el medio este y unos siglos después de Escandinavia [13].



**Figura 1.** Molino de agua nórdico o griego.

Posteriormente, en Roma se utilizaron molinos de eje horizontal más sofisticados, los cuales se destinaban a la molienda de grano y que disponían de engranes que permitían cambiar la dirección del movimiento (Figura 2).



**Figura 2.** Molino de agua romano.

Actualmente, la energía hidráulica se destina fundamentalmente a la generación de electricidad. Las plantas hidroeléctricas actuales son el resultado de 2000 años de avance tecnológico, desde la rueda de madera que convertía un bajo porcentaje de energía hidráulica en energía mecánica

útil, a los modernos turbogeneradores que giran a 1500 revoluciones por minuto (rpm) y producen energía eléctrica con muy altos rendimientos la energía hidroeléctrica constituye una tecnología muy bien establecida [14].

## **4.2 Centrales minihidráulicas.**

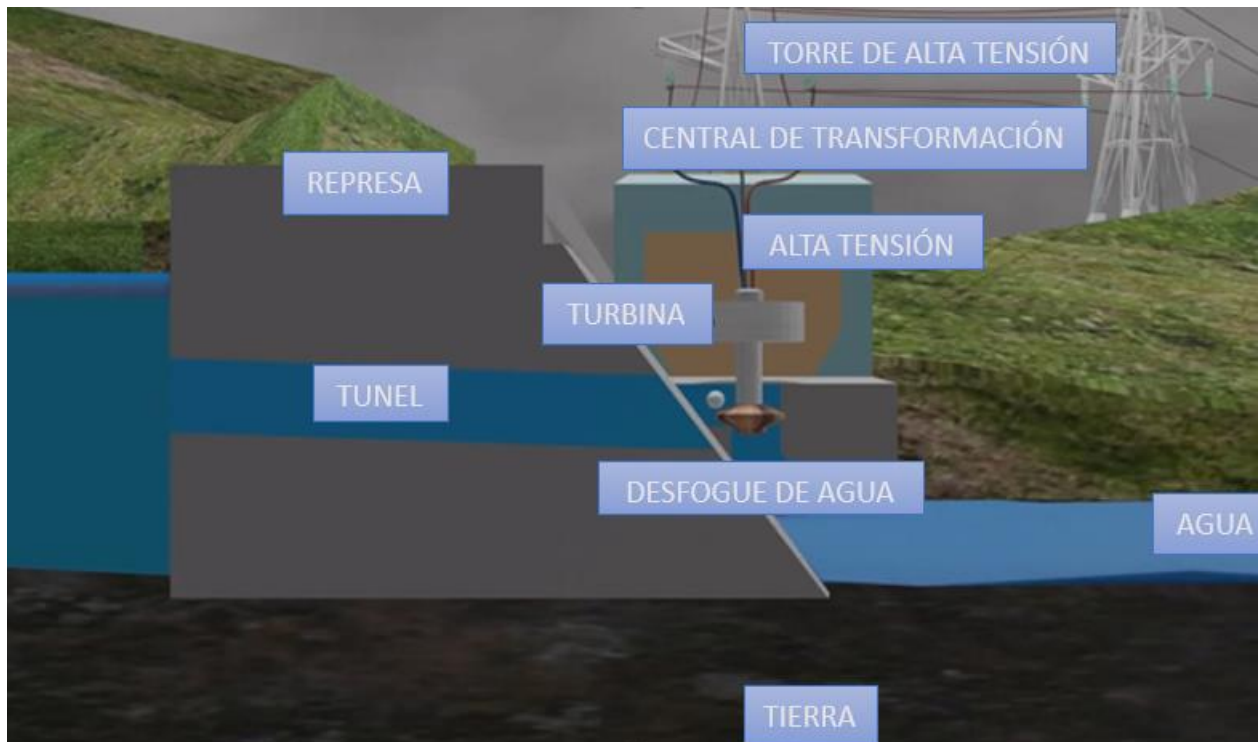
Según la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE), una mini central hidroeléctrica es una planta generadora de energía eléctrica que aprovecha de un salto de agua y caudal que esta produce una potencia igual o menor a 500 (kilovatios). Para que un proyecto sea útil a pequeña escala es necesario que cumpla con las siguientes condiciones:

- Que exista un cauce natural que presente características topográficas adecuadas y un régimen de caudales conveniente.
- Que exista un potencial de energía eléctrica: pequeñas zonas rurales, ciertas actividades agropecuarias, talleres e instalaciones de la pequeña industria, servicios públicos y básicos, etc.

La energía eléctrica a partir de su aplicación comercial ha sido un factor determinante para la economía y el desarrollo social, que fue utilizada para comunidades, ciudades, industrias, alumbrado público, etc. La energía eléctrica tiene muchas funciones y es así que se convirtió en un servicio básico para la comodidad de los ciudadanos [15].

### **4.2.1 Definición básica de una minicentral hidráulica**

Las minicentrales hidroeléctricas son pequeñas centrales que constituye de un conjunto de obras civiles y de algunos componentes, las mismas que aprovecha de la energía potencial del agua almacenada, ya sea en un reservorio o embalse, se aprovecha de la caída del agua para transformar en energía cinética, donde es necesario para girar el rotor de un generador y a la vez convertir en energía eléctrica [16], existen diferentes lugares con potencialidad para el desarrollo de la energía hidráulica. El aprovechamiento hidroeléctrico en pequeña escala representa por lo tanto una forma de energía valiosa, porque con un impacto medioambiental muy bajo utilizan una fuente energética renovable, que de otra manera se perdería (Figura 3).



**Figura 3.** Minicentral hidráulica.

Los problemas ambientales han inducido a la creciente atracción por las fuentes de energía renovable estas son fundamentales para el desarrollo humano y económico de un país, ya que por sus características y disponibilidad su aprovechamiento no causa alteraciones graves al medio ambiente [17].

Las minicentrales hidráulicas varían según su tamaño y su forma de operación. Estas minicentrales hidráulicas de pequeña potencia, se utilizan bajo un rango menor de 10MW, poseen algunas ventajas, la más importante ser consideradas dentro de las energías renovables, esta energía es limpia y autosustentable, aunque por otro lado presenta algunos inconvenientes, según los tipos de energías renovables que se tome presente.

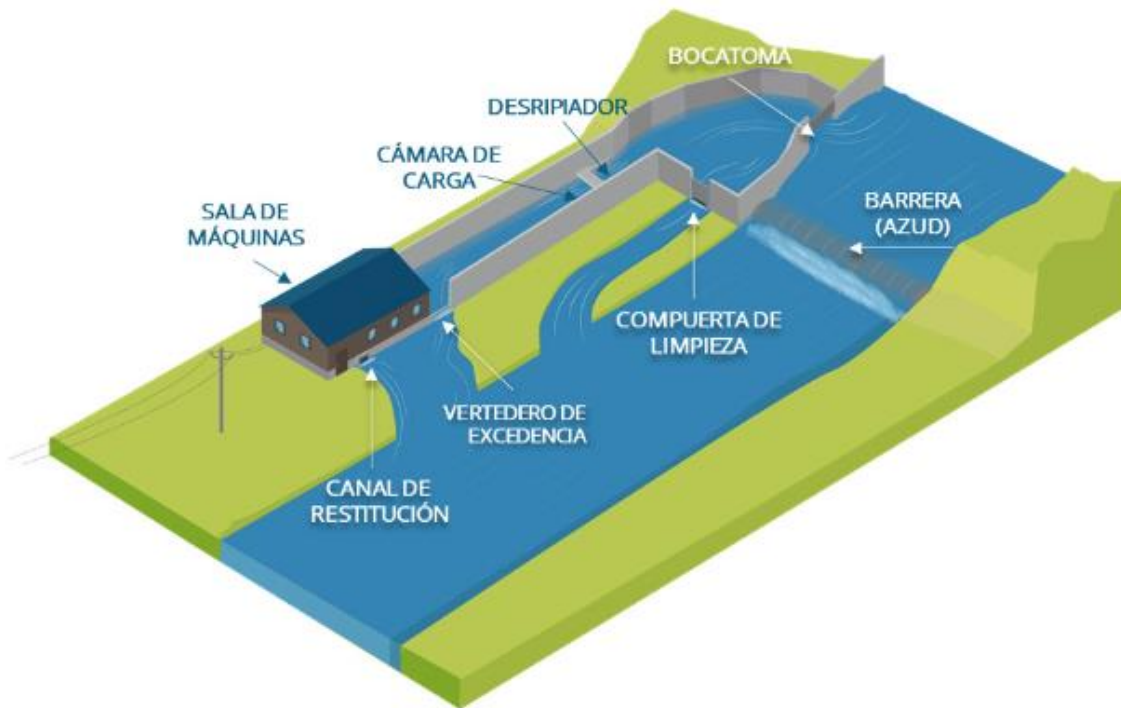
De todas las energías renovables, la mayor parte de la energía eléctrica generada proviene de las tres tipos de centrales: energía térmica, energía hidráulica y energía nuclear [18].

#### **4.2.2 Componentes principales de una mini central hidráulica.**

Una central hidroeléctrica tiene como finalidad, transformar la energía potencial del agua en energía eléctrica, para esto emplea una serie de componentes existentes en una instalación hidroeléctrica. Este tipo de centrales son aquellas en las que se desvía una parte del cauce de un



afluente mediante una toma y a través de canales se lleva hasta la central donde será turbinada. Una vez obtenida la energía eléctrica el agua es devuelta al cauce del río (Figura 7) [19].



**Figura 4.** Componentes de una central hidroeléctrica.

#### 4.2.3 Captación o bocatomas

Son estructuras hidráulicas construidas sobre un río o canal, la función es regular o captar un determinado caudal de agua para producción de hidroenergía, aprovechando el caudal natural y la fuerza de la gravedad.

El diseño de estas estructuras es complejo ya debe recurrir tanto a métodos analíticos como la investigación en modelos hidráulicos, también es necesario tener presente que la bocatoma es una estructura muy importante para el éxito de un proyecto. En los grados aprovechamientos hidráulicos el costo de la bocatoma representa solo un porcentaje muy pequeño del costo total del proyecto. La consecuencia práctica de este hecho es que no debe obtener una estructura económica, sino buscar la máxima seguridad. Para el estudio de una bocatoma se debe tener en cuenta lo siguiente [20]:

- Agua proveniente de la precipitación que ocurre en la cuenca
- Sólidos, también llamados sedimentos, provenientes de la erosión de la cuenca
- Hielos e horas que existe

- Cuerpos extraños como árboles, plantas, basura y desperdicios.

#### **4.2.4 Canal**

Conduce el agua desde la toma o bocatoma hasta la cámara de carga, se caracteriza por ser tipo abierto y por tener una unión de material hidrofugo que impide la pérdida de agua por percolación, y mejor acabado para mitigación de efectos por fricción [21].

#### **4.2.5 Aliviadero o vertedero**

Los aliviaderos son elementos vitales de la presa ya que son los encargados de liberar parte del agua detenida sin que este pase por la sala de máquinas, su misión es liberar grandes cantidades de agua. Se encuentra en la pared principal de la presa y puede ser fondo o de superficie. Para evitar que el agua pueda producir desperfectos al caer desde la gran altura, los aliviaderos se diseñan para que la mayoría se pierda en una cuenca que se encuentra en el pie de la presa, llamada de amortiguación. Para conseguir que el agua salga por los aliviaderos existe grandes compuertas, de acero que se pueden maniobrar a voluntad, según como lo demande la situación [19].

#### **4.2.6 Desarenador**

Es el sistema encargado de evitar que ingrese partículas sólidas a la tubería de presión. Esta puede instalarse como parte de la obra de toma o cámara de carga, según el caudal, el terreno y el material de canal [22].

#### **4.2.7 Cámara de turbinas**

Se denomina cámara de turbina al espacio destinado en una central hidroeléctrica para el alojamiento de las turbinas hidráulicas. Dentro de las cámaras cerradas, la cámara en espiral es la más utilizada, en la cámara en espiral, se va estrechando la sección del paso del agua a medida que va entrando parte de esta en el distribuidor de la turbina y así se puede conseguir igual velocidad en toda la longitud de la cámara [19].

#### **4.2.8 Tuberías de presión**

Es la encargada de conducir el agua desde las bocatomas a las turbinas para la generación de energía mecánica. Esta tubería representa la mayor cantidad de pérdidas en el sistema, esto debido a la fricción entre el fluido y las paredes de la misma. Esta tubería está apoyada en anclajes que le ayudan a soportar la presión generada por el agua y la dilatación que ocurre por

variación de temperatura. En la tubería de presión, la velocidad puede variar entre los 3 – 8 m/s [21].

Para el diseño de la tubería de presión se debe de considerar lo siguiente:

- Diámetro óptimo: Costo de tubería, pérdidas por fricción, etc.
- Las posibilidades técnicas de fabricación
- Velocidad del agua
- Abrasión del flujo: Material y revestimientos.
- Golpe de ariete (Espesor del tubo): Velocidad, tiempo de cierre distribuidor de la tubería.

#### **4.2.9 Casa de máquinas**

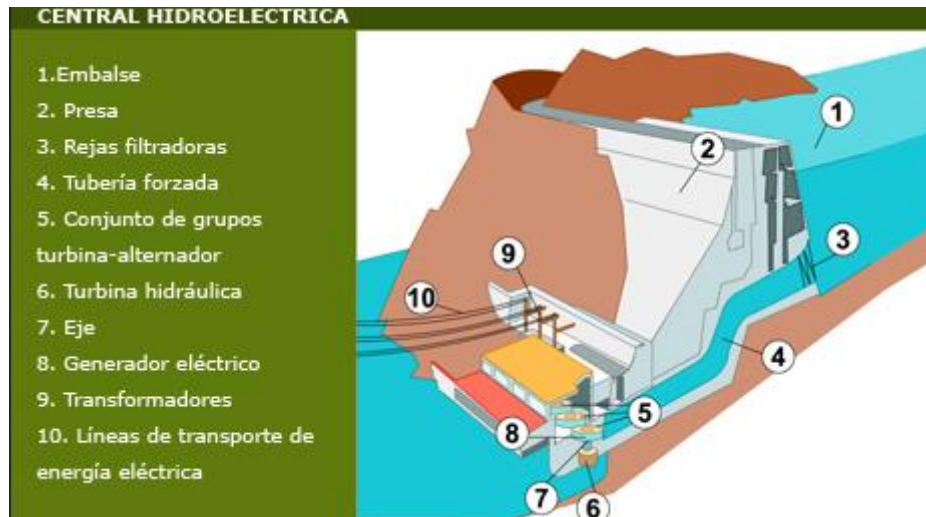
En este lugar es en donde se encuentra ubicado el grupo de generador y la turbina, estas máquinas se encargan de transformar la energía potencial en mecánica y de esta en eléctrica para atender la demanda, (Figura 5) [22].

#### **4.2.10 Transformadores**

Son dispositivos encargados de convertir la corriente de bajo voltaje en corriente de alto voltaje y reducir la intensidad de la corriente. De esta forma se reduce el desperdicio de energía en el transporte.

#### **4.2.11 Canal de descarga**

Es una tubería o una obra de conducción que conecta a la sala de máquinas con el río para descargar el agua utilizada al cauce natural, (Figura 6) [20].



**Figura 5.** Componentes de una mini central.



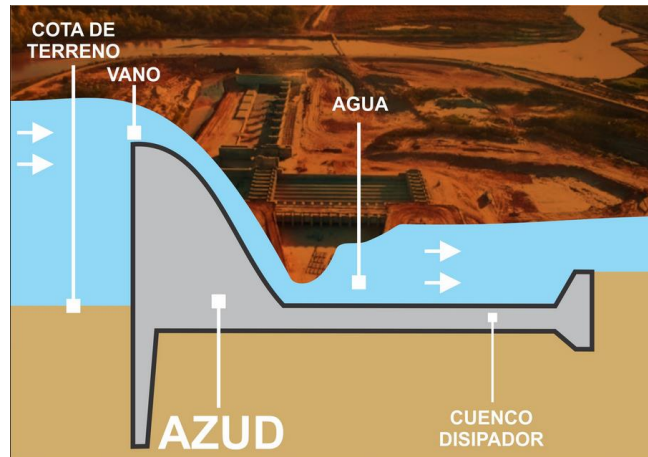
**Figura 6.** Obras de conducción.

### 4.3 Tipos de aprovechamiento

Existen varios tipos de centrales, las cuales están destinadas a acoplarse a las características propias de cada sitio y así obtener un mejor aprovechamiento de los recursos [23].

#### 4.3.1 Aprovechamiento con azud.

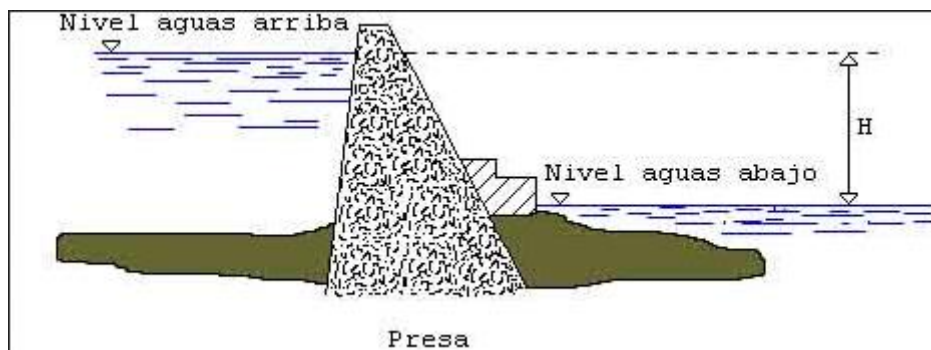
Consta con una cámara de carga y tubería de presión como se muestra en la Figura 7.



**Figura 7.** Aprovechamiento con azud.

### 4.3.2 Aprovechamiento de pie de presa

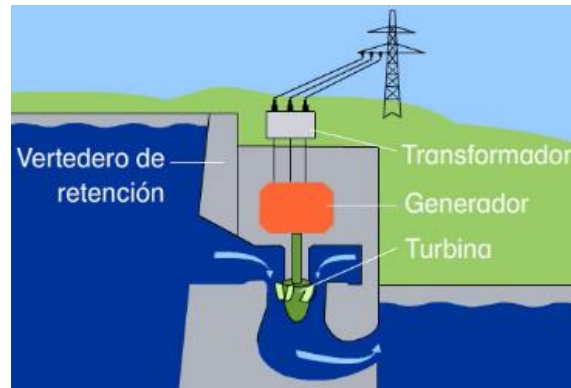
En este tipo de aprovechamiento existe la posibilidad de construir un embalse en el cauce de un río en el que el flujo se almacenará, proveniente de montañas o lluvia. Las características de este aprovechamiento tienen la posibilidad de regular el caudal entrante hacia la turbina. Las minicentrales hidráulicas suelen tener el volumen de almacenamiento pequeño por lo que produce energía eléctrica por unas horas del día y estará en función de la capacidad y tamaño del reservorio (Figura 8).



**Figura 8.** Aprovechamiento de pie de presa.

### 4.3.3 Aprovechamiento de agua Fluyente.

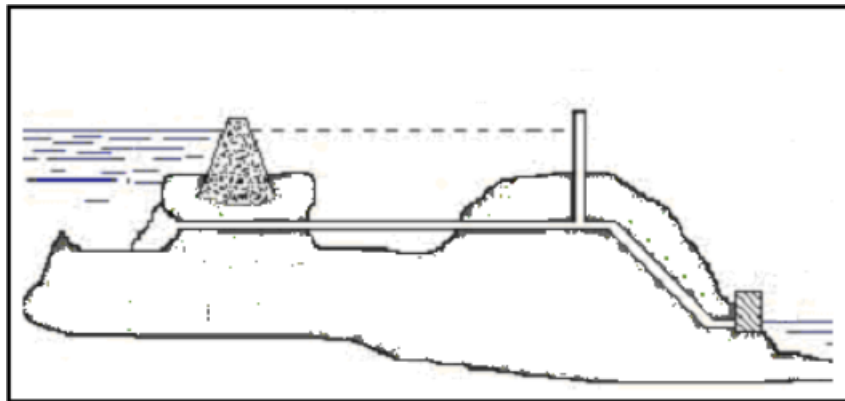
Donde la turbina esta incorporada en la presa (Figura 9).



**Figura 9.** Aprovechamiento de agua fluyente.

#### 4.3.4 Aprovechamiento con túnel de desvío.

Solo consta de un túnel y la casa de máquinas al final del mismo (Figura 10).



**Figura 10.** Aprovechamiento con túnel de desvío.

#### 4.3.5 Clasificación de pequeñas centrales hidroeléctricas según la capacidad instalada.

Considerando las características constructivas y de operación de las centrales hidroeléctricas se pueden clasificar en picocentrales, microcentrales, minicentrales, pequeñas centrales y centrales hidroeléctricas se muestra en la Tabla 1 [24].

- **Picocentrales**

Capacidad instalada entre 0.5 y 5 kW, operación a filo de agua, aplicable a zonas no interconectadas o casos aislados de zonas interconectadas.

- **Microcentrales**

Capacidad instalada entre 5 y 50 kW operación a filo de agua, aplicable a zonas no interconectadas o casos aislados de zonas interconectadas.

- **Minicentrales**

Capacidad instalada entre 50 y 500 kW, operación a filo de agua, aplicable a zonas no interconectadas o casos aislados de zonas interconectadas.

- **Hidroeléctricas (PCH)**

Capacidad instalada entre 500 y 20.000 kW, operación a filo de agua, aplicable a zonas no interconectadas y zonas interconectadas (sin posibilidad de participar en el despacho eléctrico menores a 500kW, y con posibilidad de hacerlo las mayores a 10.000 kW).

- **Centrales hidroeléctricas (CH).**

Capacidad instalada mayor de 20 MW, aplicable a zonas interconectadas con participación obligada en el despacho eléctrico.

**Tabla 1:** Clasificación de centrales hidroeléctricas según el salto de agua y potencia.

Tipo de central hidroeléctrica	Rango de potencia (kW)	Salto (m)		
		Bajo	Medio	Elevado
Micro	Hasta 50	$\leq 15$	15-50	$\geq 50$
Mini	50 – 500	$\leq 20$	20-100	$\geq 100$
Pequeñas centrales	500 – 5000	$\leq 25$	25-130	$\geq 130$

#### 4.4 Desarrollo de la energía eléctrica a pequeña escala en zonas no interconectadas.

Los aprovechamientos hidroeléctricos a pequeña escala han ganado popularidad en el desarrollo rural porque a menudo el costo y el diseño e implementación del sistema es competitivo en relación a la generación de energía fuera de la red a partir de combustibles fósiles tradicionales o a soluciones energéticas conectadas a la red en zonas rurales. Estas también se utilizan para el suministro de energía eléctrica en zonas no interconectadas (ZNI). Para determinar el alcance de suministro de energía eléctrica de una pequeña central hidroeléctrica a una comunidad la Organización Latinoamericana de Energía y del Caribe OLADE en función de la capacidad instalada y el tipo de usuario ha propuesto la clasificación indicada en la Tabla 2 [21].

**Tabla 2.** Clasificación para pequeños aprovechamientos hidroenergéticos según la capacidad instalada y el tipo de usuario.

<b>Tipo</b>	<b>Potencia (kW)</b>	<b>Usuario</b>
Picocentrales (PicoCHE)	0,5 y 5	Finca o similar
Microcentrales (MicroCHE)	5 y 50	Caserío
Minicentrales (MiniCHE)	50 y 500	Cabecera municipal
Pequeñas Centrales (PCH)	500 y 10000	Municipio

Los equipos eléctricos y mecanismos convencionales para este tipo de aprovechamientos son, turbinas y generadores sincrónicos, no tienen una gama amplia que se ajuste a los requerimientos de altura y caudal para diferentes potencias, lo cual incrementa los costos de este tipo de instalación. A continuación, se muestra en la Tabla 3 de la distribución porcentual de los costos de construcción de una instalación para generar energía a pequeña escala [26].

**Tabla 3.** Distribución porcentual de los costos de construcción de una Central hidráulica.

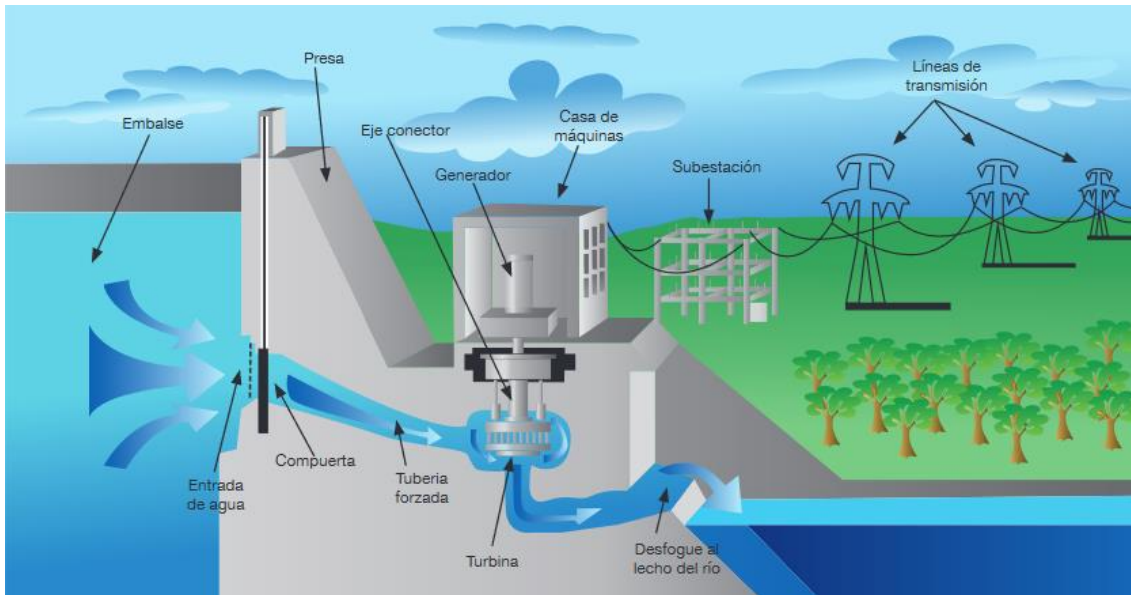
<b>Aspectos</b>	<b>PCH (1,5 MW, 14 m)</b>
Trabajos de montaje y construcción	30 – 35
Equipos electromecánicos	50 – 60
Estudio y diseño	10 – 15

#### **4.5 Principio de funcionamiento de una pequeña central hidroeléctrica**

Una Pequeña central hidroeléctrica es un sistema de intercambio de energía potencial a energía rotacional mecánica, que se da gracias al intercambio de momento entre el agua y la turbina. La energía potencial del agua dada gracias a una diferencia de alturas es convertida en energía cinética. Cuando el agua es impactada contra los alabes de la turbina, se genera un movimiento rotacional que es transferida al rotor del generador el cual lo transforma en energía eléctrica a través de la inducción electromagnética [27].

En la Figura 11 se puede identificar las partes principales de una central hidráulica, se puede ver una bocatoma que conduce al agua del río a las tuberías y pasa por un filtro donde se retira las principales impurezas. El agua filtrada avanza hasta las tuberías de presión que la dirige a la sala de máquinas donde se encuentra la turbina y el generador, estos son equipos que producen energía dando que extraen la energía del fluido y transforma en energía mecánica. De la turbina se transfiere la misma al generador, el cual genera la energía eléctrica.

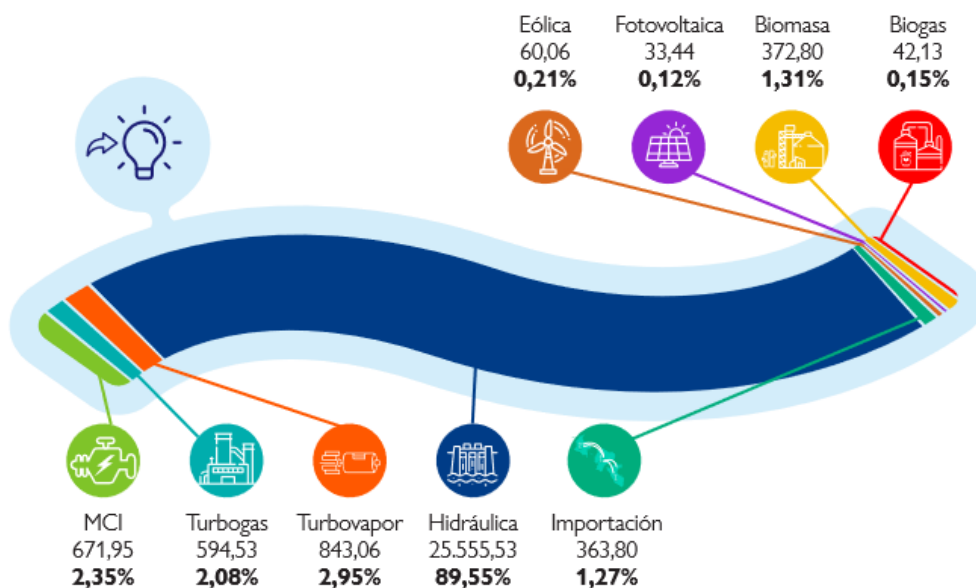




**Figura 11:** Partes de una central hidráulica.

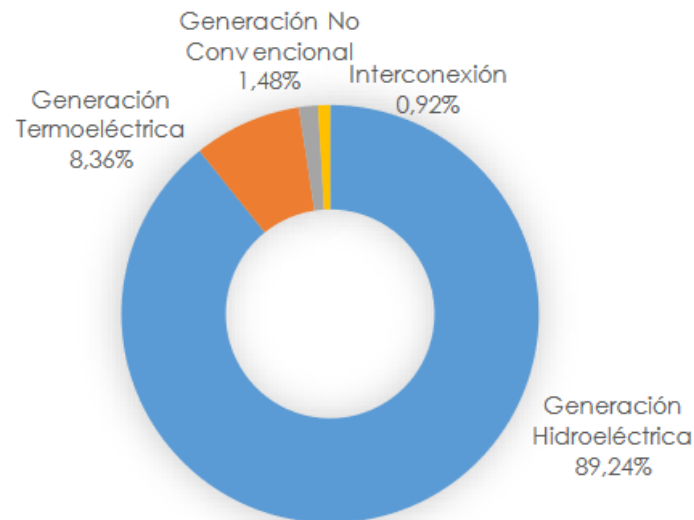
#### 4.6 Producción de energía e importación

La producción energía en el Ecuador más las importaciones alcanzaron un valor de 32.570,68 GWh. Del total de esta cantidad 26.088,42 GWh que es del (80,10 %) se generaron con fuentes renovables, 6.118,46 GWh (18,79 %) es producida de fuentes no renovables y 363,80 GWh (1,12 %), corresponde a importaciones. La generación de energía eléctrica con base al recurso hídrico fue la más representativa, con 25.574,61 GWh, equivalente al 89,55% de la producción total de energía e importación (Figura 12) [28] [29].



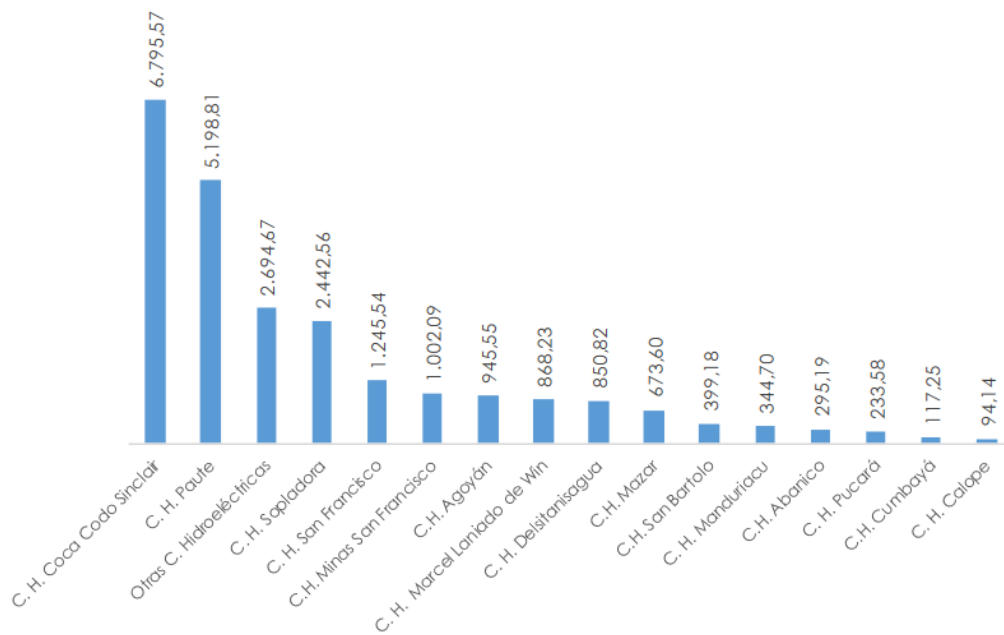
**Figura 12.** Porcentaje de participación de fuentes de energía en sistema nacional interconectado (SIN) del Ecuador (GWh).

Según el aporte del parque generador nacional y las importaciones por los enlaces internacionales, la energía bruta producida en el 2020 alcanzó los 27.120 GWh, este valor presenta una reducción del 2,21% respecto al anterior, cuya reducción se produjo en la generación hidroeléctrica, termoeléctrica y no convencional (Figura 13) [28].



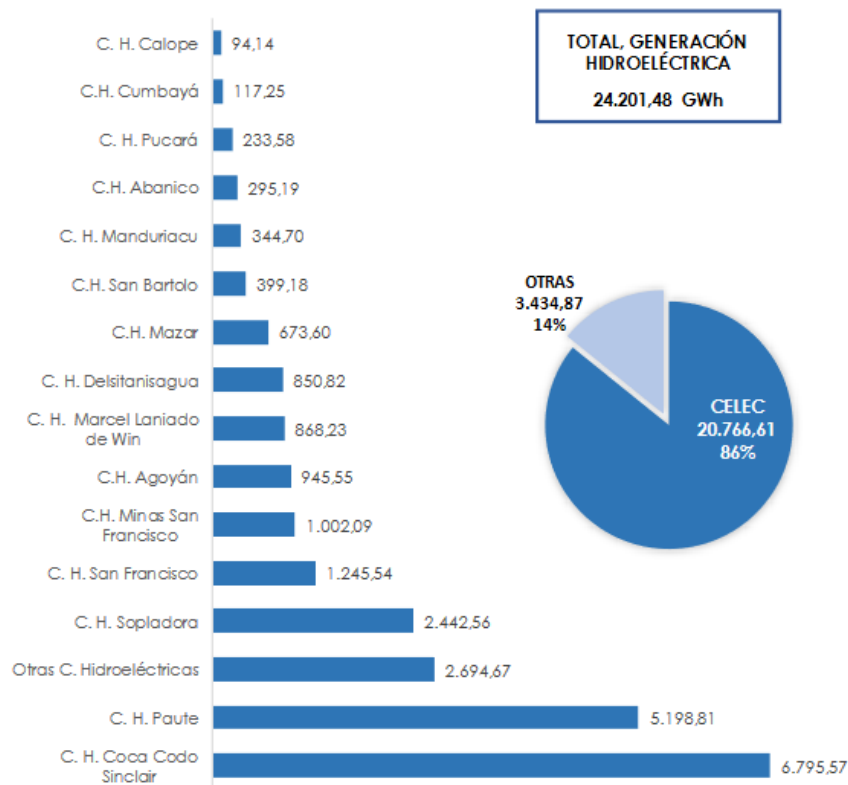
**Figura 13.** Producción bruta energética anual por fuente en Ecuador, 2020.

Las centrales hidroeléctricas en su total aportación son de alrededor de un 59,65% de la producción energética, sus porcentajes de producción fueron del 28,08%, 21,48% y 10,09% respectivamente. Las energías producidas por las centrales se muestran en la Figura 14.



**Figura 14.** Producción bruta hidráulica anual porcentual del Ecuador (GWh) en 2020.

La producción del complejo Mazar Paute Soladora alcanzó los 8.314,96 GWh que representa el 34,36% de la producción total. La cadena Aگویán San Francisco generó 2.191,09 GWh que representa el 9,05% de la producción total. Entre los dos complejos mencionados y conjuntamente con las Centrales Coca Codo Sinclair, se cubrió el 71,49% de la energía total producida. (Figura 15) [30].



**Figura 15.** Producción bruta de energía por fuente hidráulica en las centrales del Ecuador (GWh), 2020.

#### 4.6.1 Proyecto de minicentrales hidroeléctricas en Ecuador

El consejo Nacional de Electrificación (Conelec), las centrales que no tienen una potencia mayor a 50 megavatios (1% de la capacidad instalada en el país está entre la categoría de no convencionales). Existen 10 proyectos aprobados por el Conelec de acuerdo con el Plan de Electrificación 2012 – 2022 [31].

Todas las centrales implicarán una potencia total de 170 megavatios (MW) y tendrá una inversión cercana a los USD 300 millones. Ya que esta energía representa el 4% del total de su capacidad instalada en el país. De los 10 proyectos mencionados, seis son construidos por empresas privadas con un 65% del total de inversión. A continuación, se describe los grupos:

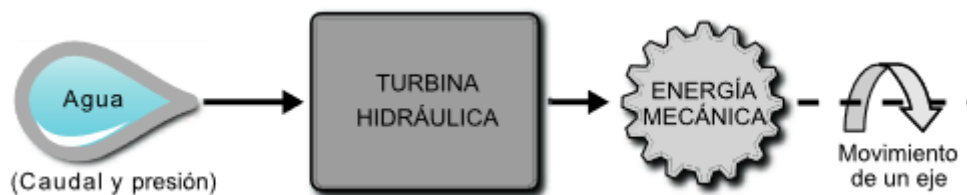
- Central topo
- San José de Minas,
- Victoria
- Sigchos

- Pilaló 3
- Apaqui
- Rio Luis
- La Merced de Jondachi
- Sabanilla
- Huapamala.

Estos proyectos serán instalados en las provincias de Tungurahua, Pichincha, Napo, Cotopaxi, Carchi, El Oro, Zamora Chinchipe y Loja. Estas centrales tienen la finalidad de satisfacer las necesidades energéticas a las comunidades que carecen del tendido de la red eléctrica y son nombradas zonas no interconectadas.

#### 4.7 Equipos de una central hidroeléctrica.

La turbina hidráulica es el elemento más importante de una mini central, ya que aprovecha la energía cinética y potencial que contiene el agua. Esta energía se puede aprovechar para realizar el trabajo para producción de energía eléctrica, al acoplar el eje de salida a un generador eléctrico. También las turbinas hacen referencia como principio fundamental a las ruedas hidráulicas que se las denomina rodete, estas giran con una velocidad constante accionada por la energía potencial con una inclinación de corriente de agua y que transmite la energía mecánica al eje de giro para su aprovechamiento (Figura 16) [32].



**Figura 16.** Esquema conceptual de una turbina hidráulica.

##### 4.7.1 Clasificación de las turbinas hidroeléctricas.

###### Tipos y denominaciones características de turbinas hidráulicas.

Las turbinas pueden clasificarse de acuerdo a sus características, su tipo de funcionamiento y dependiendo del caudal de agua y de la diferencia de altura, por lo tanto estas se clasifican en dos grupos: turbinas de acción y turbinas de reacción [33].

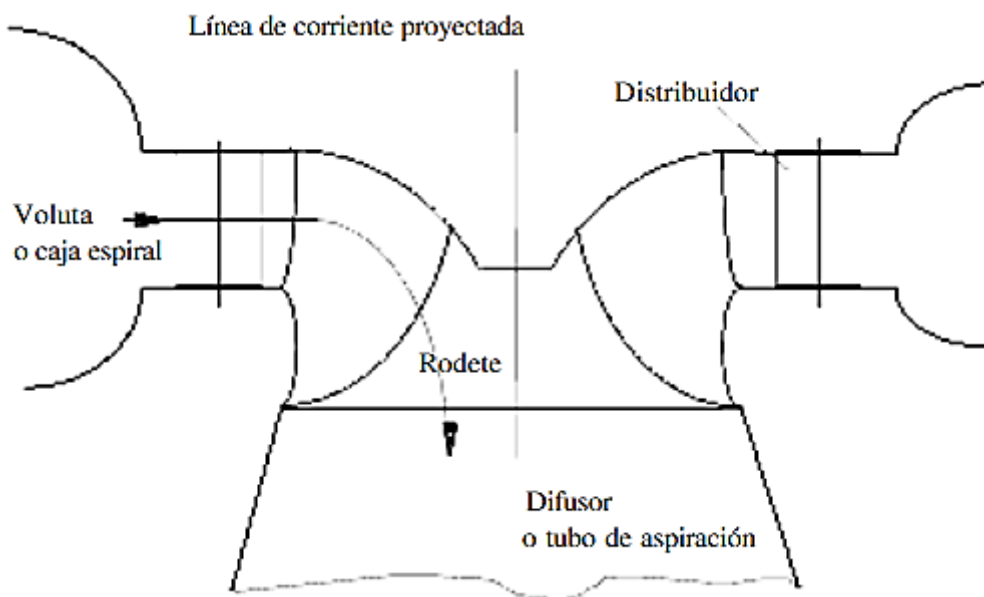
En la turbina de acción el empuje y la acción del agua coinciden.

En la turbina de reacción, el empuje y la acción del agua son opuestos.

El empuje es consecuencia de la diferencia de la velocidad a la entrada y salida del agua en el rodete, según la proyección de la misma sobre la perpendicular al eje de giro.

#### 4.7.2 Turbina de reacción.

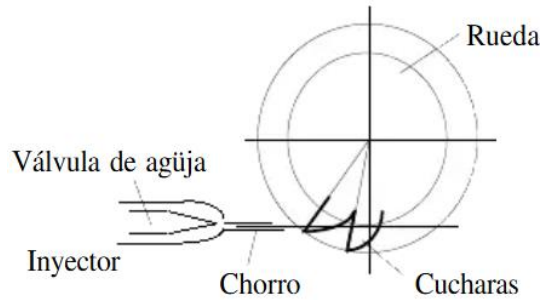
El agua sale del distribuidor con una cierta presión que va disminuyendo a medida que el agua atraviesa el alabe del rodete, en la salida la presión puede ser nula o negativa. En estas turbinas el agua circula a presión en el distribuidor, por lo tanto, la energía potencial del salto se transforma en dos, en energía cinética y energía a presión (Figura 17) [34].



**Figura 17.** Esquema básico de una turbina de reacción Francis [34]

#### 4.7.3 Turbina de acción o impulsión

Son turbinas en las que toda la energía potencial del flujo de agua se transforma en energía cinética en una tobera, esta produce un chorro a gran presión, cuyo caudal se regula mediante una válvula de aguja (Figura 18). Esta se utiliza en saltos grandes entre 10 a 1200 m, dado que nuestra instalación tiene un salto de 10m [34].

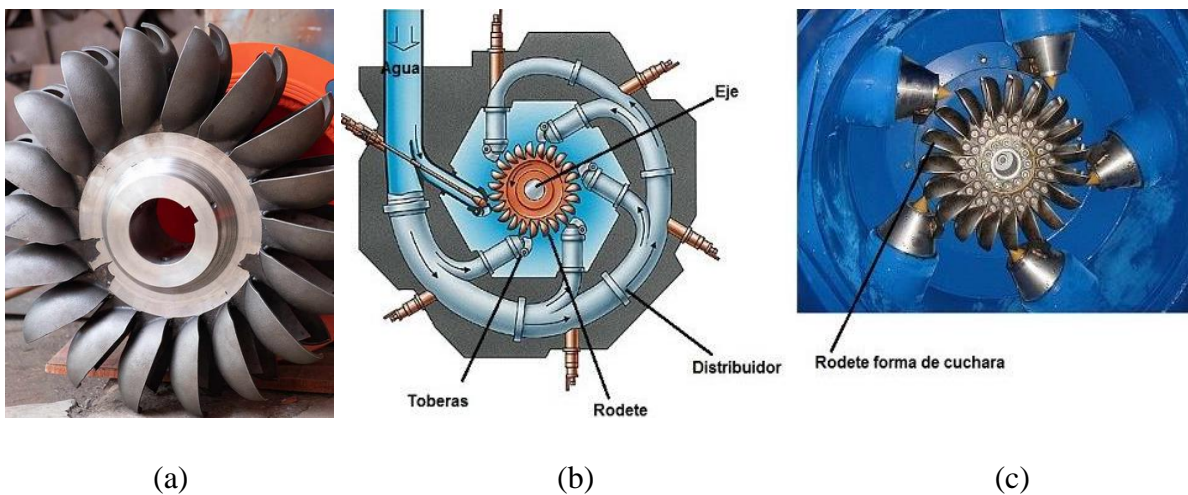


**Figura 18.** Esquema básico de acción de una turbina [34]

## 4.8 Turbina Pelton.

### 4.8.1 Historia de la turbina Pelton

La turbina Pelton (Figura 19) fue introducida en 1879 por el carpintero e inventor americano Lester Allan Pelton. Su principio de funcionamiento refleja el de la clásica noria con paletas de los antiguos molinos de agua, reelaborada para aumentar su eficiencia el agua se transporta a la tubería forzada, que cuenta con una boquilla en el extremo, una obturación que aumenta la velocidad del agua. El chorro de agua que sale de la boquilla golpea las palas del rotor, que tiene forma de cuchara. La turbina Pelton se utiliza para grandes saltos (entre 300 y 1400 m) y caudales de menos de  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ , con el fin de obtener mayores velocidades [35] [36].



**Figura 19.** a) Partes continuas de turbina Pelton, b) distribuidor c) inyector.

## 4.9 Turbina Francis:

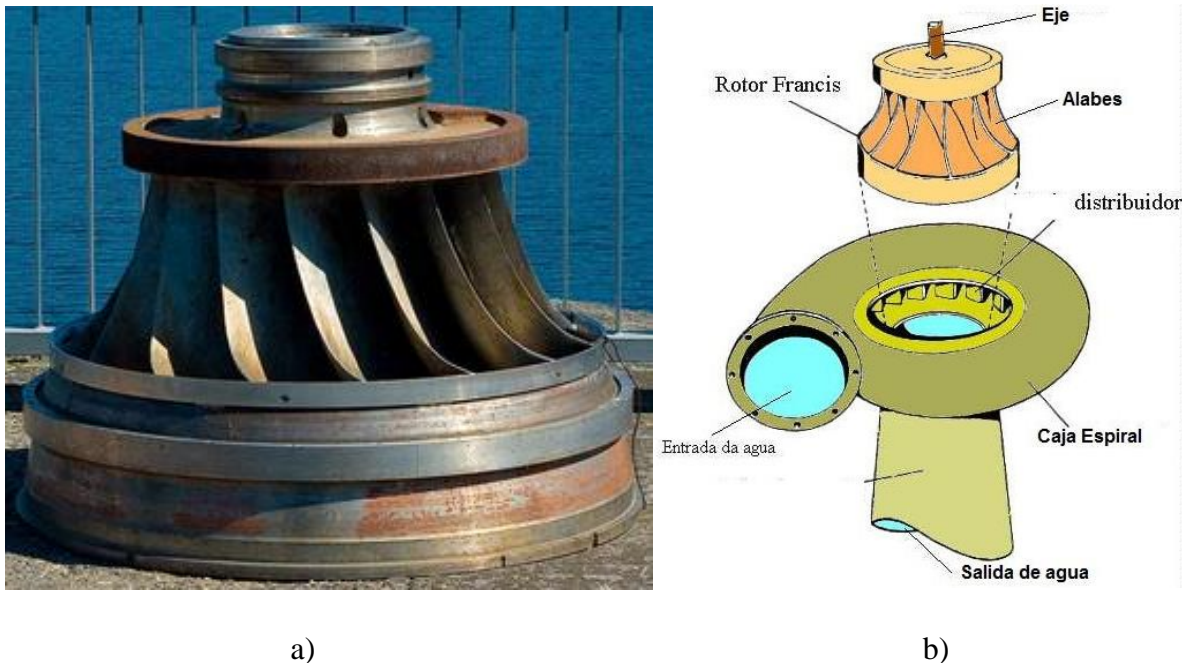
### 4.9.1 Historia de las turbinas Francis

La turbina Francis fue desarrollada en 1848 (Figura 20), por el ingeniero angloamericano James B. Francis y es el tipo de turbina hidráulica más utilizado. Es una turbina de flujo centrípeto en



la que el agua llega al rotor a través de un conducto en espiral. Después un rodillo en la parte fija dirige el caudal para invertir las palas del rotor. Este diseño presentaba el problema de requerir mayores diámetros del rodete antes mayores caudales.

La solución a este tipo de problema fue hacer que el agua siguiera una dirección radial-axial, a medida que el agua se mueve a través del rodete, su radio de giro disminuye aumentando la velocidad del agua. El resultado fue el tipo de turbina de flujo mixto que actualmente es el modelo más habitual, aun guarda poca semejanza con la maquina Francis original, cuenta con un principio de funcionamiento similar y conserva el mismo nombre. Es utilizada para saltos de altura media (de 10 a 300/400 m) y caudales de agua (de 2 a 100  $m^3/s$ .) [37],



**Figura 20.** a) Componentes de turbina Francis, b) distribuidor Francis.

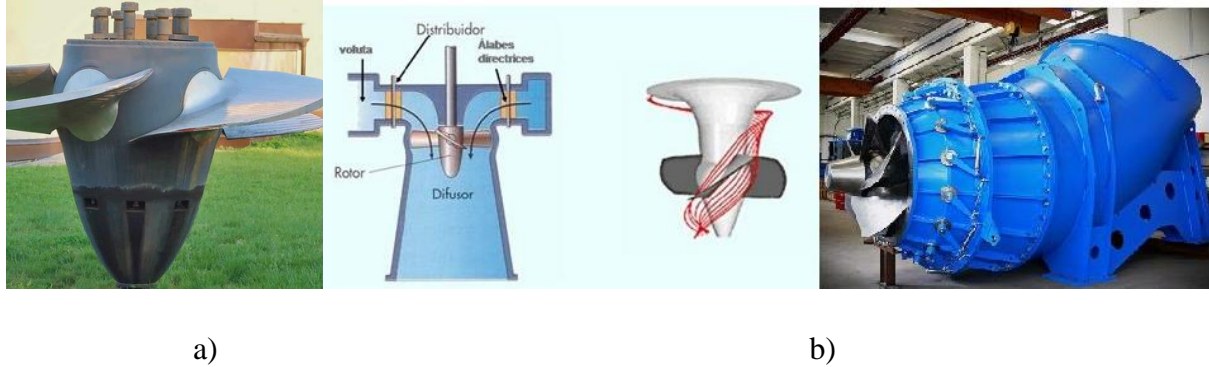
## 4.10 Turbina Kaplan

### 4.10.1 Historia de la turbina Kaplan.

La turbina Kaplan, vio la luz en 1913 gracias al profesor austriaco Víctor Kaplan (Figura 21), sigue el principio de las hélices de un barco. La turbina Kaplan es una turbina de tipo axial en la que el caudal de agua hace que los alabes de la hélice giren hacia adentro y hacia afuera en dirección axial con respecto al eje de rotación de la hélice. Gracias a la posibilidad de ajustar el ángulo de incidencia de las alas, tiene la ventaja de proporcionar un excelente rendimiento con pequeños saltos, pero también con grandes variaciones en el caudal ( $200 \frac{m^3}{s}$  para subir).



Las palas del rodete tienen forma de hélice se emplean en saltos de pequeña altura, obteniéndose con ellas elevados rendimientos, siendo las palas orientables lo que implica paso variable. Si las palas son fijas se denomina turbinas de hélice [38].

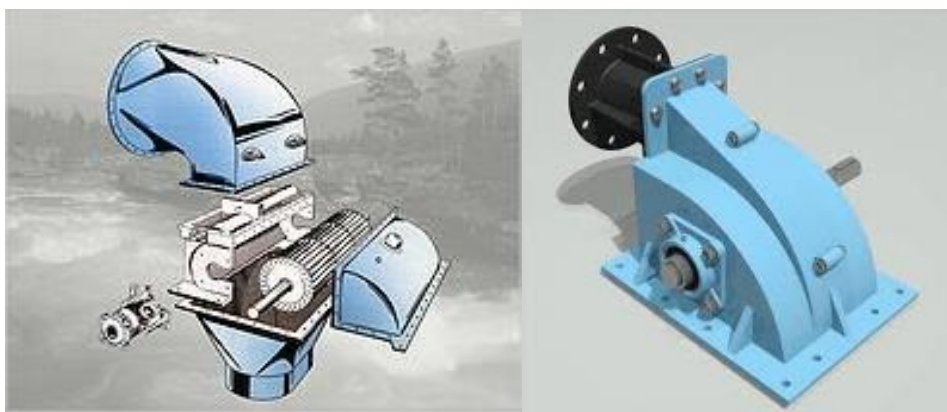


**Figura 21.** a) Componentes de turbina Kaplan, b) distribuidor Kaplan.

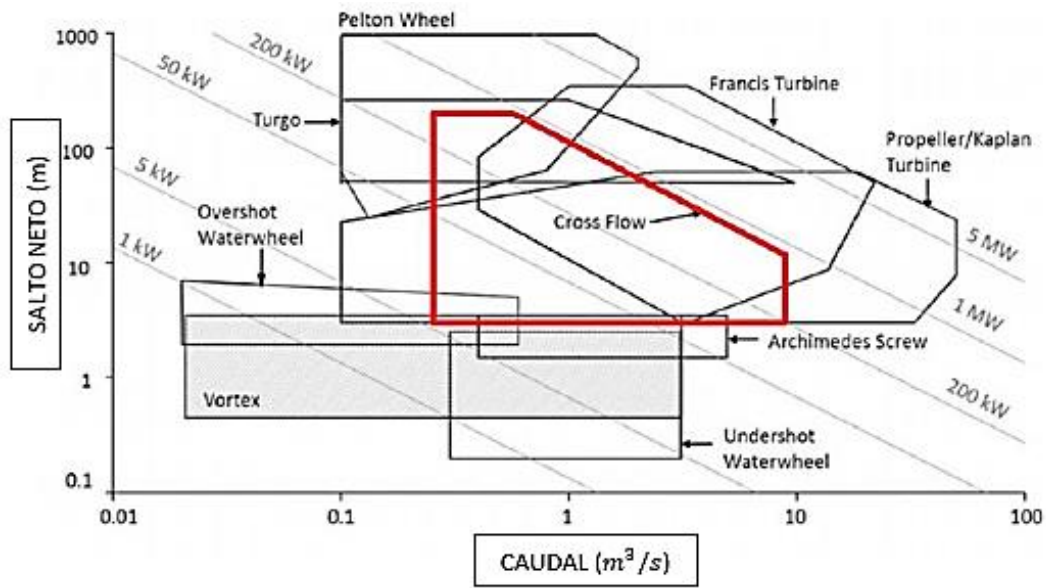
## 4.11 Turbina Michell-Banki

### 4.11.1 Historia de la turbina Michell Banki

La turbina Michell-Banki, también conocida como turbina de flujo cruzado (Figura 22), es una turbina de acción de flujo transversal y admisión parcial, fue el ingeniero Australiano Anthony George Maldon Michell, quien obtuvo una patente para esta máquina en 1903. La turbina fue basada en la teoría de Poncelet, ingeniero Frances (1788 – 1867), fue el creador de la rueda hidráulica, en diseño teórico y experimental. La turbina es optimizada para trabajar con caudales entre 0.2 a 10  $\frac{m^3}{s}$ , y con salto mínimo de 5 metros y saltos máximos entre 100 y 200 metros, y con eficiencia máxima comprendidas entre 80% y 85% y pueden generar potencia máxima comprendidas entre 750 y 1MW. Se puede ver (Figura 23), el rango de funcionamiento de la turbina Michell banki [39].

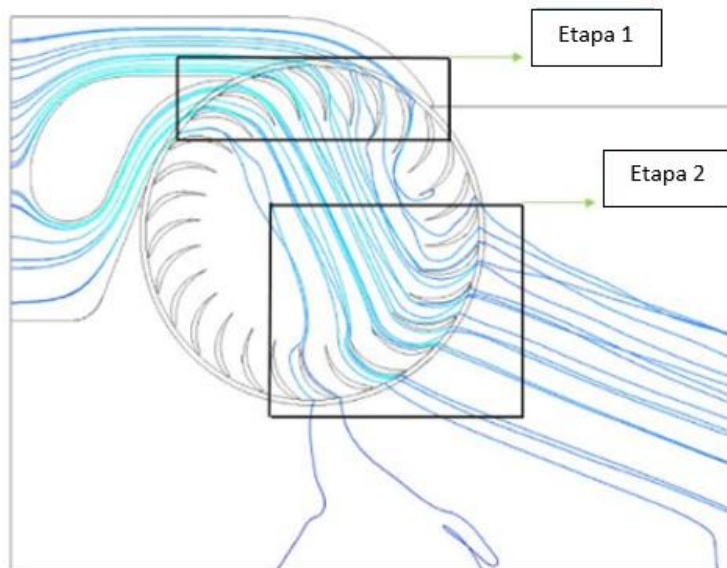


**Figura 22.** Turbina Michell Banki.



**Figura 23.** Campo operativo de la turbina Michell Banki.

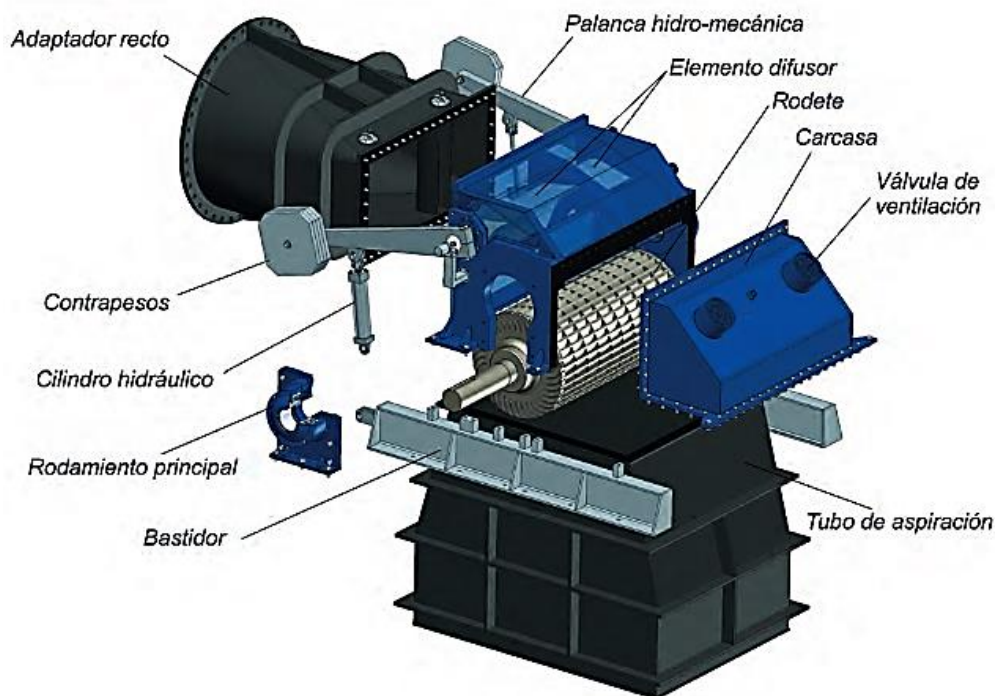
En la turbina Michel Banki la transferencia de energía se produce en dos etapas (Figura 24). La etapa 1, tiene lugar cuando el agua entra con el 70 % de la energía, mientras que la etapa 2, el caudal sale del rodete y transfiere el 30% restante. Debido a este fenómeno de flujo, la turbina se considera de impulsión parcial de dos etapas. Dado que la primera etapa funciona con un grado de reacción según el principio de impulso puro [41].



**Figura 24.** Etapas de transferencia de energía en una turbina Michell Banki.

#### 4.11.2 Campo de aplicación

Las turbinas de flujo cruzado son construidas en acero, soldadas y es compuesta con materiales normalizados. La turbina OSSBERGER de flujo cruzado (Figura 25), es una turbina de admisión radial y parcial de chorro libre, estos tipos de turbinas son montadas en las pequeñas centrales hidroeléctricas, han logrado un alcance en todo el mundo, cumplen con tareas como: la regulación de caudal de descarga y de las aguas residuales, también pueden descargarse el agua almacenada en riego, producción de energía y regulación del caudal, etc., [42].



**Figura 25.** Esquema de turbina de flujo cruzado patentado por la casa OSSBERGER.

#### 4.11.3 Otras áreas de aplicación:

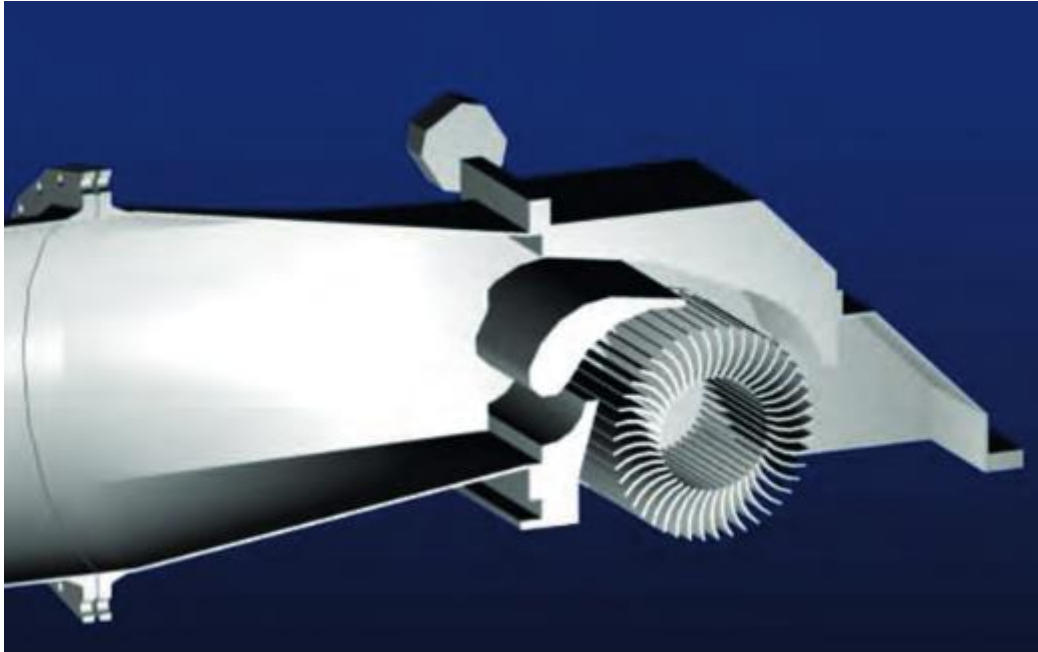
- Suministro de agua potable
- Salidas de plantas de tratamiento.
- Sistema de riego
- Desagües de represas
- Sistema de enfrentamiento en plantas convencionales
- Dosificación de aguas residuales.

#### 4.11.4 Materiales de construcción de la turbina Michell Banki

La utilización de estas turbinas está en función de su campo de aplicación, se requiere de diferentes materiales ya que no todos los campos tienen las mismas condiciones climáticas y

de operación, como la carga mecánica, el agua que viene de diferentes lugares para el embalse que prevé el tipo de material que requerirá la turbina como se muestra en la (Figura 26).

- Acero al carbono
- Acero inoxidable
- Acero resistente al desgaste



**Figura 26.** Esquema de mecanismo principal de turbina Michell Banki.

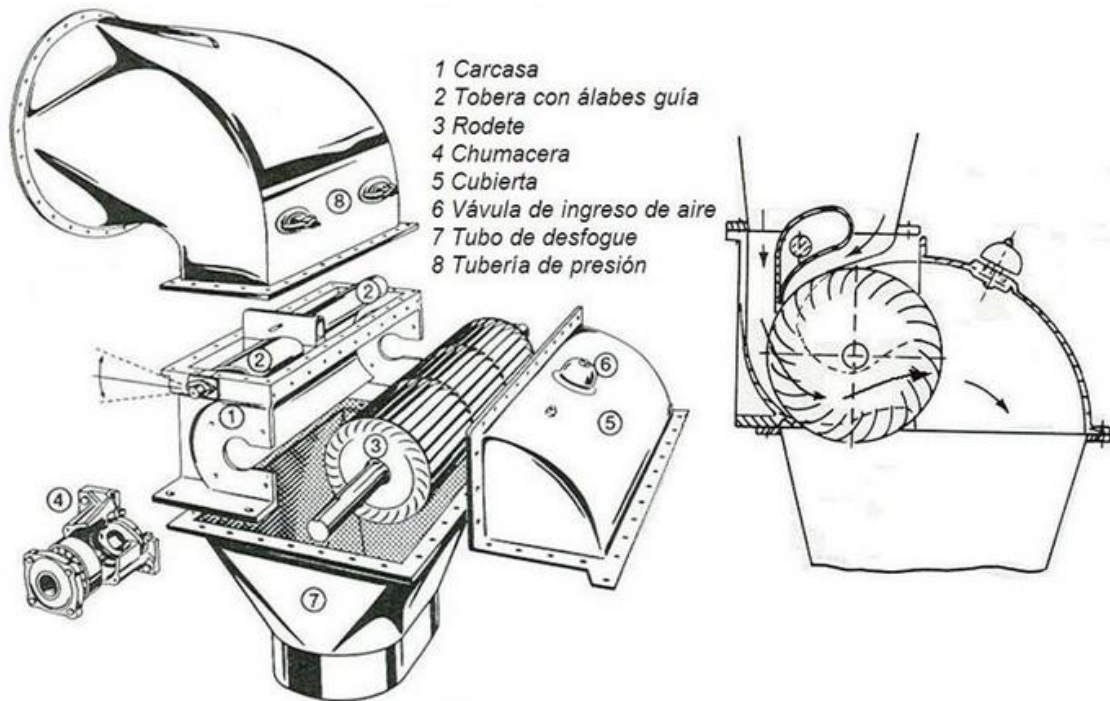
#### **4.11.5 Características principales de la turbina Michell Banki.**

Sus principales características relevantes son las siguientes:

- La velocidad de giro podría ser seleccionado en un amplio rango
- Eficiencia de un 82% para un rango abundante de caudales.
- Menores costos en operación y mantenimiento.
- Turbina que puede ser usada en poblaciones rurales.
- Diseño sensible y fácil para la fabricación.
- Bajo costo de operación y mantenimiento.

#### **4.11.6 Componentes de la turbina Michell Banki**

La turbina Michell-Banki está compuesta principalmente por los elementos que se muestran en la **Figura 27**.



**Figura 27.** Componentes de una turbina Michell Banki.

- **Inyector:** Es el componente de la turbina que regula y orienta el agua que ingresa a la turbina, este elemento está diseñado de manera tal que el chorro impacte los alabes del rodete con un ángulo denominado ángulo de ataque ( $\alpha$ ). El inyector posee una pared superior envolvente la cual guía el fluido con la menor pérdida obteniendo mayor aprovechamiento de la energía de flujo. Actualmente se puede usar dos posiciones relativas de instalación del inyector vertical y horizontal [43].
- **Rodete:** Es el elemento más importante de la turbina encargada de la transformación de energía cinética del fluido en energía mecánica rotacional. Este se encuentra compuesto por dos discos paralelos los cuales se encuentran unidos entre si por una serie de alabes curvados con forma de sector circular, generalmente con bordes afilados para lograr una reducción en la resistencia al flujo [44].
- **Carcasa:** Elemento cuya finalidad fundamental es evitar el aspergeo del fluido en su trayectoria a través del rodete, además de soportar la estructura de la turbina o parte de ella y transmitir los efectos o parte de ellos, a los apoyos o soportes de la turbina [45].
- **Tubería de conducción:** Es el componente cuya función es la de transportar el fluido desde la captación hasta el inyector. Su diseño y construcción influye en el desempeño y durabilidad de la turbina, dado que las pérdidas de cabeza por efecto de la rugosidad



del material y la trayectoria puede llegar a ser considerablemente altas, reduciendo la altura neta  $H_n$ , variable de la cual depende la potencia útil del conjunto que viene dada por la ecuación (1).

$$P_{(u)} = \rho g Q H_n \quad (1)$$

donde:

$\rho$ : Densidad del fluido.

$g$ : Aceleración de la gravedad.

$Q$ : Caudal.

$H_n$ : Altura neta.

- **Considerando las pérdidas**, producto del fluido a través del inyector y el rodete, Banki concluyo que el rendimiento teórico máximo de la turbina esta dado por la ecuación (2).

$$\eta_{\max} = 0.771 - 0.384 \frac{D}{H_n} \quad (2)$$

donde:

$D$ : Diámetro exterior del rodete.

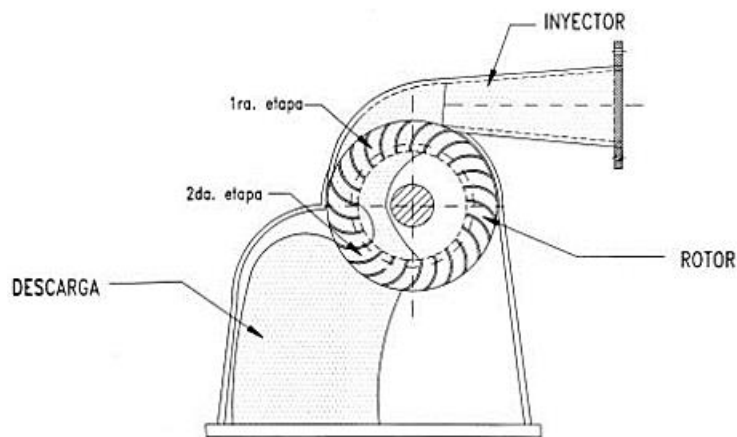
$H_n$ : Altura neta.

#### 4.11.7 Funcionamiento de la turbina Michell Banki

00

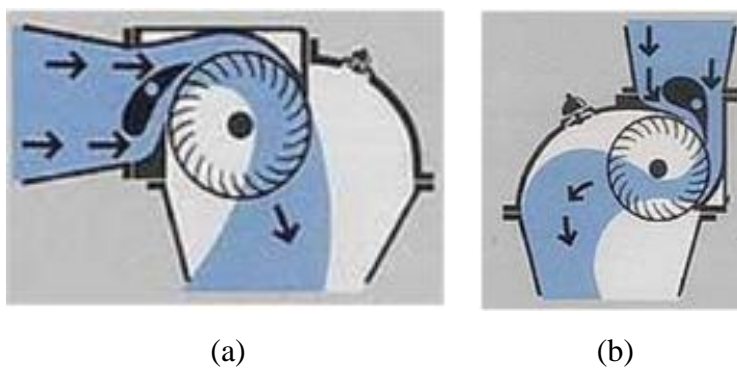
La turbina consta de dos etapas, en la primera el agua ingresa a través del inyector en donde se encuentra la válvula reguladora de caudal, mediante la cual se controla la rotación de eje de salida, de acuerdo a la necesidad de generación que se presenta. Luego el agua ingresa al rotor por su parte externa son donde entrega parte de su energía.

En la segunda etapa el agua realiza un nuevo contacto con el rotor haciendo una última entrega de energía, finalmente el agua abandona la turbina mediante una descarga a presión atmosférica (Figura 28) [46] [47].



**Figura 28.** Etapas de funcionamiento de una turbina Michell Banki.

La forma de instalación puede adoptarse a través de disposición de entrada de caudal horizontal y vertical como se muestra en la Figura 29.



**Figura 29.** Entrada del agua al rodete de la turbina, (a) horizontal, (b) vertical.

#### 4.12 Aspectos de instalación de una central hidroeléctrica y ecuaciones.

##### 4.12.1 Determinación del salto del agua

El salto neto es una parte fundamental para el diseño de una minicentral hidráulica (Figura 30). Debe ser el máximo permitido por la topografía del terreno, teniendo en cuenta los límites que marcan la afección al medio ambiente y la viabilidad económica de la inversión [48].

Conceptos básicos de salto:

- **Salto Bruto ( $H_b$ ):** Es la altura existente entre el punto de la forma de agua del azud y el punto de descarga del caudal turbinado al río.
- **Salto útil ( $H_u$ ):** Es el desnivel existente entre la superficie libre del agua en el cámara de carga y el nivel de desagüe en la turbina. Es decir, la altura que hay desde el punto

en que el canal pasa el agua a la tubería forzada y en punto donde la central devuelve el agua al cauce del río.

- **Salto neto ( $H_n$ ):** Es la diferencia entre el salto útil y las pérdidas de carga producidas a lo largo de todas las conducciones. Estas representan la máxima energía que se podrá transformar en trabajo en el eje de la turbina.
- **Pérdidas de cargas ( $H_p$ ):** Son las pérdidas por fricción de agua con las paredes de la tubería forzada, más las pérdidas ocasionadas por turbulencia, al cambiar de dirección el flujo, al pasar a través de una rejilla o de una válvula, etc. Se miden como pérdidas de presión (o alturas de salto) y se calcula mediante la mecánica de fluidos.

El agua se dirige a la turbina a través de zanjas o canales y tuberías, en estos casos, se existirá pérdidas por fricción, la cual hace que el salto real disminuya, por lo tanto, se deben determinar las dimensiones de los canales y tuberías para minimizar estas pérdidas.

Por lo general los canales se construyen de hormigón, entre ellos la velocidad de circulación es aproximadamente entre los 15 m/s la pendiente es de 0,5 a 1/1000. En el caso de las tuberías, cuando más lisa sea la superficie interior de la tubería, menor es la pérdida por fricción. Para el diseño de la tubería de debe a que la pérdida de fricción sea inferior al 4% de la altura disponible [49].

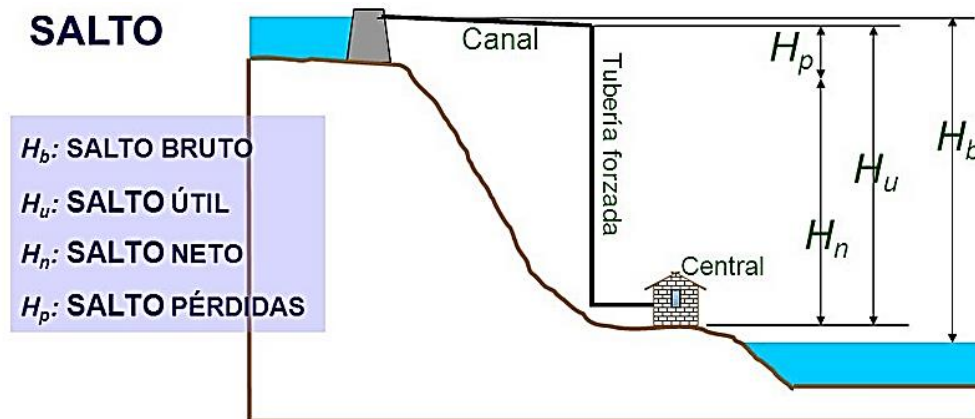


Figura 30. Esquema para definir los diversos saltos de agua.

#### 4.12.2 Potencia a instalar y producción

Las minicentrales hidráulicas cuentan con una potencia disponible que varía en función del caudal de agua disponible para ser turbinada y el salto existente en cada instante [50].



Para hacer un cálculo aproximado existe un formula sencilla que expresa la energía en forma de potencia en caballos de vapor, se analizará esta, en presión hasta simplificar a una expresión más fácil y como resultado en KW.

La expresión que nos proporciona la potencia instalada se muestra en la ecuación (3).

$$P = 9,81 * Q * Hn * e \quad (3)$$

- P: Potencia en kW
- Q: Caudal de equipamiento en m<sup>3</sup>/s
- Hn: Salto neto existente en m
- e: Factor de eficiencia de la central que es igual al producto de los rendimientos de los diferentes equipos que intervienen en la producción de la energía.

El rendimiento de la turbina y el alternador se supone en un rango entre 0.8 a 0.95, mientras que para la turbina entre 0.92 a 0.98, estos rendimientos dependen del tamaño de las maquinas.

Haciendo una estimación de los rendimientos, se concluye que el valor del rendimiento  $\eta_{total} = 0.9$  y de esta forma se simplifica a una ecuación lineal simple de aplicar con la potencia expresada en kW, se muestra en la ecuación (4):

$$P = 9 * Q * Hn \quad (4)$$

Donde:

- P: Potencia en kW
- Q: Caudal en m<sup>3</sup>/s
- Hn: Salto neto existente en m
- 9: Resultado de realizar la operación.

#### 4.12.3 Producción

Una vez calculada la potencia se procede a calcular la cantidad de energía que aporta la instalación cuyo valor viene dado por la ecuación (5) en kWh.

$$E = P * T * \eta \quad (5)$$

- P: Potencia de la central(kW)
- T: n° de horas de funcionamiento cn caudal y saltos fijos.
- $\eta$ : Coeficiente de imporables que refleja las perdidaas de energia.

Según el tipo de equipo y el fabricante, el rendimiento de la maquina varia, pero a efecto de una primera aproximación, se puede tomar como factor de eficiencia para una minicentral hidroeléctrica moderna el valor de 0,85.

Una vez obtenida la potencia es posible calcular la producción media de la minicentral hidroeléctrica, como producto de la potencia en cada momento por horas de funcionamiento.

La producción se puede calcular por la ecuación (6).

$$E (kWh) = 9,81 * Q * H_n * T * e * \eta \quad (6)$$

- T: Numero de horas de funcionamiento
- $\eta$ : Coeficiente de imponderables que reflejan a las pérdidas de energía debidas al mantenimiento y reparación de la central, incluso la disponibilidad de agua y la necesidad del mercado eléctrico.

Para la simulación del cálculo de la producción de energía se debe tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- El caudal es variable en función del tiempo, la energía se calcula en periodos de tiempo en los que el caudal puede considerarse constante.
- Respecto al salto, se podrá considerar constante en centrales fluyentes y será variable en centrales de pie de presa (Curva Q-H del embalse).

#### 4.12.4 Energía producida y horas equivalentes.

La energía producida es la potencia producida multiplicada por el número de horas que el generador funciona a esa potencia. Las centrales hidroeléctricas se caracterizan por horas equivalentes, esta cifra se obtiene del cociente entre energía anual producida y la potencia nominal [51].

Considerando las horas equivalentes, las centrales hidroeléctricas se puede dividir en centrales eléctricas básicas, con horas equivalentes aproximadas a 5000 horas, centrales eléctricas de media punta, con horas equivalentes aproximadamente de 3000 horas, y los periodos pico centrales equivalen aproximadamente a la cantidad de horas de 2000 horas o menos.

Otro concepto es el factor de ocupación  $f$ , que determina el porcentaje entre las horas equivalentes de 365 días al año y 8.760 horas, que se muestra en la ecuación (7).

$$h_e = \frac{E_{\text{anual}}}{P_{\text{nominal}}} \quad (7)$$
$$f_c = \frac{h_e}{8760}$$

- $h_e$ : Numero de horas equivalentes (h)
- $E_{\text{anual}}$ : Energia genera anualmente (kWh)
- $P_{\text{nominal}}$ : Potencia nominal de la instalacion (kW)
- $f_c$ : Factor de carga

#### 4.12.5 Caudal

Es la cantidad de fluido que circula por un conductor por unidad de tiempo o el producto de la velocidad de un fluido que pasa por una sección de un conducto.

Su unidad en el sistema internacional es:  $\frac{m^3}{s}$

Por lo general, el flujo experimenta grandes cambios tanto estacionales y anuales.

Por lo tanto, resulta conveniente tener suficiente información para asegurar que los datos estén cubiertos. Debe haber al menos un dato de caudal diario durante 15 a 20 años, aunque esto dependerá de la cuenca especifica que se está analizando [52].

A partir de estos datos se obtienen:

- ✓ La curva de caudales medios diarios de un año tipo.
- ✓ La curva de caudales medios clasificados, de esta manera se obtienen los siguientes caudales.
  - Caudal máximo (QM) alcanzado en el año.
  - Caudal mínimo (Qm) del año.
  - Caudal de servidumbre o ecológico (Qsr).
  - Caudal de equipamiento (Qe) (ecuación (8)).

$$Q_e = Q_{\text{medio}} * Q_{sr} \quad (8)$$

- Caudal mínimo técnico (Qmt), es directamente proporcional al caudal de equipamiento con un factor de proporcionalidad “K” que depende del tipo de turbina (ecuación (9)).

$$Q_{mt} = k * Q_e \quad (9)$$

El factor K es un factor que depende del tipo de turbina utilizada, generalmente, si no se dispone de otro valor se puede utilizar de la siguiente Tabla 4:

**Tabla 4.** Turbinas y su factor K.

<b>Turbinas</b>	<b>K</b>
Pelton	0,1
Michell Banki	0,015
Kaplan	0,22
Semi-Kaplan	0,35
Francis	0,35
Hélice	0,65

El caudal de equipamiento se elegirá de forma que el volumen turbinado sea el máximo.

#### **4.12.6 Cálculo del tiempo de drenado de la laguna**

Ecuación (10) de volumen.

$$V = \frac{4 \cdot \pi \cdot r^3}{3} \quad (10)$$

#### **4.12.7 Ecuaciones diferenciales**

Ecuación (11) de Modelo Matemático.

$$A(h) \cdot h^{-1/2} \cdot dh = -k \cdot a_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot dt \quad (11)$$

Ecuación (12) área del orificio ( $a_{tuberia}$ ).

$$a_0 = \pi(r_{tuberia})^2 \quad (12)$$

#### **4.12.8 Salto neto (ecuación (13))**

$$H_n = H_b - \Delta h \quad (13)$$

#### **4.12.9 Diámetro interior del rodete (ecuación (14))**

$$D_i = 0.66 * D_e \quad (14)$$

#### **4.12.10 Velocidad de rotación (ecuación (15))**

$$N = \frac{39.85(H)^{1/2}}{D_e} \quad (15)$$

#### 4.12.11 Número específico de revoluciones Nq (ecuación (16)) y Ns (ecuación (17)).

Donde:

P: Potencia al freno de la turbina en C. V

Q: el caudal máximo que fluye por la turbina en  $m^3/s$

H: salto neto de la central en metros

N: velocidad de giro de la turbina en RPM

$$Nq = N \frac{\sqrt{Q}}{H^{\frac{5}{4}}} \quad (16)$$

$$Ns = N \frac{\sqrt{P}}{H^{\frac{5}{4}}} \quad (17)$$

#### 4.12.12 Número de álabes

Los álabes varían entre 20 y 30 álabes dependen del tamaño del diámetro.

#### 4.12.13 Coeficiente de velocidad absoluta Kc del inyector

El coeficiente de velocidad afecta a la velocidad absoluta de entrada, tomando en cuenta las pérdidas que se generan dentro del inyector, también el coeficiente afecta al rendimiento hidráulico de la turbina. Varios investigadores han realizado pruebas y se han obtenido valores de kc desde 0.95 a 0.98. los investigadores que han trabajado con este tipo de turbinas establecen valores como  $kc = 0.967$ .

#### 4.12.14 Potencia de la turbina

La potencia aplicada a las turbinas Michell Banki se determina por la ecuación (18).

$$P_{turbina} = \tau * \omega \quad (18)$$

De acuerdo a la ecuación (19).

$$\tau = Fi * r (eje) \quad (19)$$

De acuerdo a la ecuación (20).

$$Fi = R * \mu (\text{coeficiente de rozamiento}) \quad (20)$$

Donde:

R: Fuerza aplicada -sobre el eje.

$\mu$ : coeficiente de rozamiento (caucho o metal = 0.56)

#### 4.12.15 Cálculo de la Potencia hidráulica (ecuación (21))

$$P_{hidraulica} = \rho * g * H * Q \quad (21)$$

#### 4.12.16 Rendimiento hidráulico (ecuación (22))

$$\eta = \frac{H_n}{H_u} \quad (22)$$

El rendimiento hidráulico de la turbina es de  $0.76 * 100 \% = 76\%$

#### 4.12.17 Rendimiento del generador (ecuación (23))

Donde:

$P_S$ : Potencia de salida en la turbina.

$P_E$ : Potencia de entrada en la turbina

$$\eta = \frac{P_S}{P_E} \quad (23)$$

#### 4.12.18 Calculo eficiencia mecánica (ecuación (24))

$$\eta = 0.771 - 0.384 \left(\frac{D_e}{H}\right) \quad (24)$$

#### 4.12.19 Cálculo de la potencia mecánica (ecuación (25))

$$Potencia_{elecgrica} = Potencia_{mecanica} * \eta \quad (25)$$

#### 4.12.20 Cálculo del torque (ecuación (26))

$$T = \frac{974 (P_t)}{N} * 9.81 \quad (26)$$

donde:

T: Torque producido en el eje del rodete

$P_t$ : Potencia de la turbina en kW

N: Numero es3pecifico de revoluciones de giro de la turbina, en rpm.

#### 4.12.21 Cálculo de la presión (ecuación (27))

$$Q = V_s * A \quad (27)$$

#### 4.12.22 Tubería forzada

Con la ecuación de Bernoulli se muestra la presión de salida en la tubería con la ecuación (28).

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + h_1 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_2 \quad (28)$$

donde:

$P_1$ : Presión inicial

$P_2$ : Presión final

$\gamma$ : Peso específico

$h_1$ : Altura Punto 1

$h_2$ : Altura punto 2

$V_1$ : Velocidad del fluido inicial

$V_2$ : Velocidad del fluido final

$g$ : es la aceleración de la gravedad = 9.81 m/s<sup>2</sup>

#### 4.12.23 Cálculo de las pérdidas primarias ( $h_{f1}$ ) (ecuación (29))

$$h_{f1} = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2 * g} \quad (29)$$

$f$ : factor de fricción (adimensional)

$L$ : Longitud de la tubería (m)

$D$ : diámetro interior de la tubería (m)

$V$ : Velocidad (m/s).

#### 4.12.24 Rugosidad relativa (ecuación (30))

$$\varepsilon = \frac{k}{D} \quad (30)$$

#### 4.12.25 Reynolds (ecuación (31))

$$Re = \frac{\text{fuerzas inerciales}}{\text{fuerzas viscosas}} = \frac{\rho * D * V_s}{\mu} = \frac{V_s * D}{\nu} \quad (31)$$

Donde:

$V_s$ : Velocidad característica del fluido

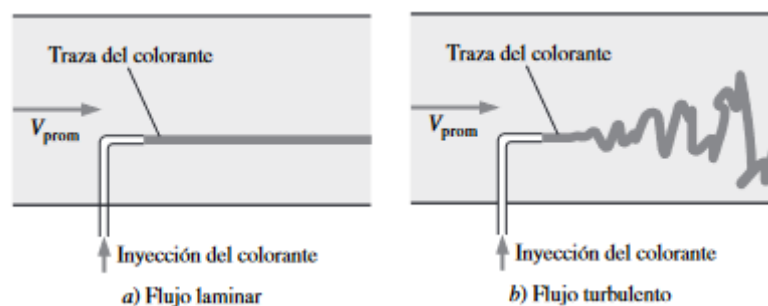
D: Diámetro de la tubería a través de la cual circula el fluido o longitud característica del sistema

$\nu$ : Viscosidad cinemática del fluido

Q: caudal

#### 4.12.26 Flujo laminar, transitorio y turbulento.

En una tubería se revela que el flujo de fluidos es en línea de corriente aproximadamente paralelas a bajas velocidades, pero se vuelve turbulento conforme la velocidad aumenta sobre un valor crítico (Figura 31). El régimen del flujo en el primer caso es laminar a), se caracteriza por las líneas de corriente suaves y movimientos ordenados, mientras que el flujo turbulento b), se caracteriza por fluctuaciones de velocidad y movimientos también desordenados.



**Figura 31.** Comportamiento de fluido donde laminar (a) y turbulento (b).

En la mayoría de las condiciones el flujo en una tubería circular se comporta de la siguiente manera:  $Re \leq 2300$ , laminar, mientras que para  $Re \geq 4000$  turbulento y la zona transicional entre ellos. Es decir.

$Re \leq 2300$	Flujo laminar
$2300 \leq Re \leq 4000$	Flujo transicional
$Re \geq 4000$	Flujo turbulento

#### 4.12.27 Pérdidas secundarias (ecuación (32))

$$h_{f2} = k * \frac{v^2}{2g} \quad (32)$$



donde:

$h_{f2}$ : Perdidas menores (accesorios)

V: Velocidad del fluido

g: Velocidad de la gravedad

k: factor de accesorios (adimensional)

## **5 Metodología**

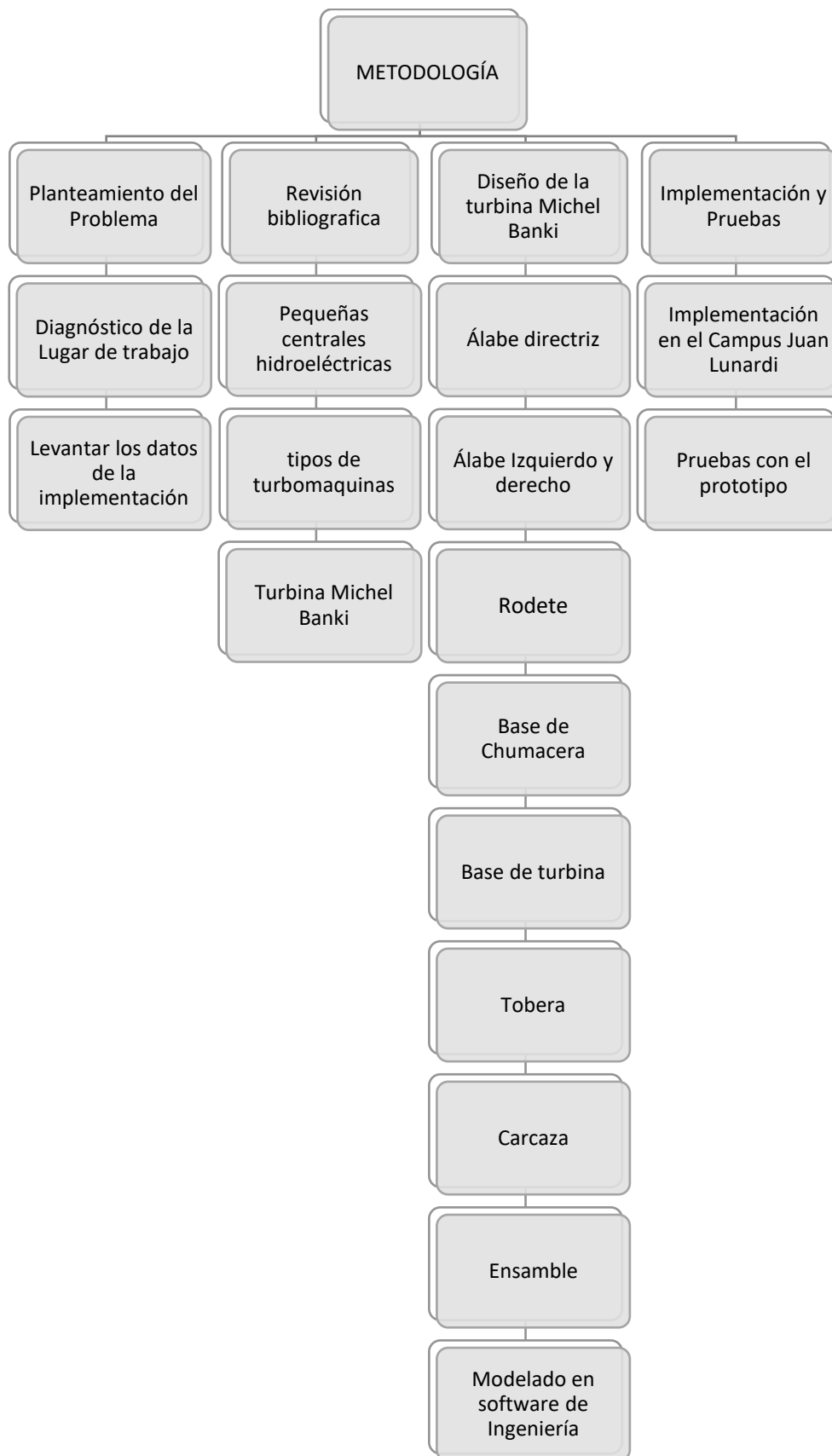
### **5.1 Diseño prototipo de turbina Michell Banki**

En el presente proyecto establecido aplicará la investigación cuantitativa, el cual consiste en encontrar los parámetros y datos detallados y principios teóricos, además de investigación analítica en la que se identifica las leyes generales relacionadas con el caso de estudio. El alcance es exploratorio ya que se trabajará con indagación bibliográfica de sistemas implementando para fundamentar el análisis; también es descriptivo porque se desarrolla el modelamiento y simulación, y correlacional porque se analizan los datos de la simulación respecto a los datos obtenidos con el funcionamiento real del sistema. En una primera fase se realiza el levantamiento de información del lugar de emplazamiento considerando las condiciones del terreno que afectan al funcionamiento del sistema. En segunda instancia con el levantamiento de la información se realizará el modelamiento y simulación del sistema a través de softwares de ingeniería especializados como AUTODESK INVENTOR para la simulación en 3D y ANSYS para el modelamiento dinámico del sistema. En la fase final se realizará la comparación de los resultados numéricos con respecto a los datos experimentales de la instalación, teniendo en cuenta las modificaciones que se realizaron en la fase de construcción por las condiciones propias del terreno del emplazamiento.

### **5.2 Diseño de investigación**

En el desarrollo y análisis se realiza inicialmente un levantamiento de planos de la pico central hidroeléctrica, para lo cual el estudio se basa en el siguiente diagrama de proceso (Figura 32).

El proceso se basa en levantar los datos de la implementación real, para así establecer los factores del terreno que permita obtener datos de partida del sistema, posteriormente se realiza el diseño, luego se llevara a cabo el modelamiento con software de ingeniería, luego se desarrollara los cálculos previos a la turbina, y finalmente se realiza la modelación y validación del sistema.



**Figura 32.** Metodología para el diseño de la turbina

### **5.3 Parámetros de selección y construcción de la Turbina Hidráulica Michel Banki**

La turbina de aprovechamiento Michell-Banki se encuentra instalada en el Cantón Paute en los predios del campus Juan Lunardi de la Universidad Politécnica Salesiana, el emplazamiento es el siguiente: existe una laguna en la parte alta de los terrenos de aproximadamente 4219.12 m<sup>3</sup>, la principal función de esta laguna es de abastecer a los predios agrícolas agua de riego de la comunidad salesiana del cantón Paute; a 2.40 m sobre el nivel del suelo se encuentra emplazada la tubería de conducción de 25.4 cm de diámetro dirige el caudal aguas abajo, a una distancia de 100 m de longitud de tubería y 10 m de salto de agua aproximadamente se encuentra ubicada la casa de máquinas en el cual está emplazada la tubería Michell-Banki.

#### **5.3.1 Ubicación geográfica del proyecto.**

Con la ayuda de la Google Earth se ha extraído la imagen satelital en donde se muestra en amarillo la laguna en la parte superior y la ubicación de la casa de máquinas en la parte inferior, donde se encuentra montada la turbina y demás componentes descritos, en la que se realizarán las pruebas para validar su funcionamiento (Figura 33).



**Figura 33.** Ubicación geográfica del emplazamiento

### **5.3.2 Técnicas e instrumentos de recolección de datos, validez y confiabilidad.**

#### **Estudio hidrológico**

El estudio se basa en el trabajo de titulación “Diseño y análisis para la implementación de un Sistema de Pico-Aprovechamiento en Generación Hidroeléctrica”, en el que se diseñó la picoturbina de aprovechamiento para el emplazamiento de análisis, de este se toman diversos parámetros como el caudal, dimensionamiento de tubería, diseño de la turbina y los cálculos necesarios para estimar la eficiencia real.

Con la ayuda de dispositivos de posicionamiento y su contraste con aplicaciones como Google earth se estima los niveles de altura de la turbina instalada y el reservorio en la parte alta del terreno, esto permite obtener el salto neto real.

- Nivel de la casa de turbina: 2189 msnm
- Nivel del reservorio: 2199 msnm

Se estima un salto neto real de 10 m.

El reservorio de 4219.12 m<sup>3</sup> se alimenta de varias vertientes naturales, de este se tiene un caudal de diseño de 0.13 m<sup>3</sup>/s, este se conduce por la tubería de longitud de 100 m que dirige a la turbina.

### **5.3.3 Análisis para la simulación de software.**

Para instalar una pequeña central, se realiza el estudio topográfico del terreno, la cual influye la mano de obra y los equipos necesarios para la instalación. También la central depende de los aspectos técnicos como:

- Altura útil del salto.
- Capacidad de generación
- Tipo de turbina
- Tipo de tubería.

Se analiza las características mencionadas y los planos del diseño de la turbina para obtener las medidas de los diferentes componentes para su respectivo diseño, y ver sus parámetros y condiciones iniciales de calculo que fueron procesados.

Con estos planos se diseña en el software Inventor 2021, cada componente y posteriormente es ensamblada para el modelamiento. Seguidamente se lleva a cabo la simulación con el software ANSYS Discovery live 2023 para obtener los resultados y observar su comportamiento del flujo aplicando volúmenes finitos.

#### **5.3.4 Instrumentos utilizados**

- Tacómetro
- Multímetro
- Cinta de medición
- Software de diseño: Inventor 2021
- Software de simulación: ANSYS Discovery 2023

#### **5.3.5 Maquinaria para realizar pruebas.**

- Amoladora pequeña de 800 Watts
- Amoladora grande de 1800 Watts
- Taladro de 750 Watts
- Pistola de calor de 1500 Watts

#### **5.3.6 Proceso para medición**

En la Figura 34 se muestra el reservorio que alimenta la turbina con caudal con una altura neta de 10 m.



**Figura 34.** Embalse del agua en sitio de interés

La tubería que dirige el caudal hasta la turbina posee dos válvulas de compuerta, la primera que se muestra en la Figura 35, la función de esta es de permitir la circulación de caudal a la tubería de conducción, así como de seguridad para mantenimientos cumple la función de una válvula de paso, esta válvula tiene un recorrido de aproximadamente 36 vueltas este dato servirá para estimar los distintos porcentajes de apertura de la válvula, permite que el fluido recorra una distancia de 70 m aproximadamente por la tubería hasta la válvula de control de la turbina.



**Figura 35.** Válvula de compuerta de seguridad hacia la turbina

Para empezar la toma de datos se abre la válvula de control de la turbina con varios porcentajes de apertura de acuerdo a la Tabla 5. Con estos porcentajes de apertura se mide las rpm de la turbina inicialmente y el voltaje en el generador, inicialmente en vacío es decir sin carga eléctrica (Figura 36), dado que el dimensionamiento de la turbina se realizó para 500 rpm máximo, se puede apreciar que sobre el 50% de apertura de la válvula las rpm se estabilizan con valores cercanos a 470 rpm.

**Tabla 5.** Datos obtenidos de la prueba sin carga

SIN CARGA			
Apertura (vueltas)	Apertura (%)	RPM	Voltaje
0	0	0	0
9	25	300	180
18	50	426	260
27	75	465	267
36	100	465	270





**Figura 36.** Medición de rpm de la turbina y voltaje del generador

En la Tabla 6 se muestra los valores tomados con carga eléctrica inicial de 1550 W, cabe mencionar que el generador tiene una capacidad de 5000 W, con esta carga se toman mediciones de las rpm de la turbina y el voltaje del generador eléctrico.

**Tabla 6:** Datos obtenidos de la prueba con carga de 1550 W

CARGA DE 1550 (W)			
Vueltas de la válvula	Apertura %	rpm con carga	voltaje con carga
0	0	0	0
9	25	300	180
18	50	355	194
27	75	365	215
36	100	368	202

#### 5.4 Cálculos matemáticos

##### Datos iniciales de diseño y del reservorio

$$Q: 0.13 \frac{m^3}{s}$$

$$V_{laguna}: 4\ 219.12\ m^3$$

$$g: 9.81\ m/s^2$$

$$H_{neto}: 10\ m$$

$$r_{tuberia} = 10\ in = 0.254\ m$$

#### 5.4.1 Cálculo del tiempo de vaciado de la laguna

Con los datos obtenidos se determina el tiempo en el que la laguna disminuirá su altura a nivel de la tubería, este tiempo será de trabajo de la turbina.

$$\text{Volumen de laguna} = 4219.12\ m^3$$

De la ecuación de (11)

$$A(h) \times h^{-1/2} \times dh = -k \times a_0 \times \sqrt{2 \times g} \times dt$$

Ecuación área del orificio ( $a_{tuberia}$ ) (3)

$$a_0 = \pi(r_{tuberia})^2$$

$$a_0 = \pi(0.127\ m)^2$$

$$a_0 = \mathbf{0.051\ m^2}$$

Teorema de Pitágoras

$$A(h) = \pi r^2$$

$$R^2 = r^2 + (R - h)^2$$

$$(12.4975)^2 = r^2 + (12.4975 - h)^2$$

$$156.1875 = r^2 + 156.1875 - 24.995h + h^2$$

$$\mathbf{r^2 = -h^2 + 24.995h}$$

Se reemplaza en la ecuación  $r^2$

$$A(h) = \pi r^2$$

$$\mathbf{A(h) = \pi(-h^2 + 24.995h)}$$



Se reemplaza en la ecuación (11).

$$A(h) \cdot h^{-1/2} \cdot dh = -k \cdot a_0 \cdot \sqrt{2 \cdot g} \cdot dt$$

$$\pi(-h^2 + 24.995h) \cdot h^{-1/2} \cdot dh = -\pi \cdot 0.051 \sqrt{2(9.81)} \cdot dt$$

$$\left(-h^{\frac{3}{2}} + 24.995h^{\frac{1}{2}}\right) \cdot dh = -0.051 \cdot \frac{3\sqrt{218}}{10} \cdot dt$$

Al integrar:

$$\int \left(-h^{\frac{3}{2}} + 24.995h^{\frac{1}{2}}\right) \cdot dh = -\int 0.2244 \cdot dt$$

$$-\frac{2}{5}h^{\frac{5}{2}} + \frac{4999}{300}h^{\frac{3}{2}} + C = -0.2244t + C$$

Se tiene que cuando  $h$  = altura del agua sobre la tubería, en el estado inicial la laguna se encuentra completamente llena, por lo tanto,  $h = 3$  m en ese instante.

$t$  = tiempo de drenado y al inicio, cuando está completamente lleno  $t = 0$ s.

condiciones iniciales:  $t = 0$  ;  $h = 3$

Se reemplaza las condiciones iniciales en la ecuación (11):

$$-\frac{2}{5}h^{\frac{5}{2}} + \frac{4999}{300}h^{\frac{3}{2}} + C = -0.2244t + C$$

$$-\frac{2}{5}(2.40)^{\frac{5}{2}} + \frac{4999}{300}(2.40)^{\frac{3}{2}} + C = -0.2244(0) + C$$

$$C = \frac{2}{5}(2.40)^{\frac{5}{2}} + \frac{4999}{300}(2.40)^{\frac{3}{2}}$$

$$C = -58.385$$

Ecuación que predice la altura del líquido vaciado en función del tiempo.

Reemplazando  $C$ .

$$-\frac{2}{5}(h)^{\frac{5}{2}} + \frac{4999}{300}(h)^{\frac{3}{2}} - 58.385 = -0.2244t + C$$

Se encontramos el tiempo de vaciado.

Condiciones:  $t = ?$  ;  $h = 0$

$$-\frac{2}{5}(0)^{\frac{5}{2}} + \frac{4999}{300}(0)^{\frac{3}{2}} = -0.2244t - 58.386$$

$$t = \frac{-58.386}{-0.2244}$$

$$t = 32400 \text{ s}$$

Se convierte a horas.

$$32\,400 \text{ s} \times \frac{1\text{h}}{3.600\text{s}} = 9 \text{ h}$$

El tiempo que tarda en vaciarse el embalse hasta la altura límite de la tubería es de 9 horas.

## 5.5 Diseño mecánico de la turbina

Para el siguiente cálculo se debe de tener en cuenta los siguientes parámetros de diseño.

### Datos de turbina

$$Q: 0.13 \frac{m^3}{s}$$

$$D_e: 0.3 \text{ m}$$

$$H_{neto}: 10 \text{ m}$$

### 5.5.1 Salto neto

Se analiza la ecuación (13) que considera el salto bruto entre los niveles, considerando las pérdidas englobando un valor  $\Delta h$ , se tiene el salto resultante.

La energía potencial de un salto de agua se puede aprovechar mediante el peso de la masa del agua y la presión del agua, la velocidad del agua.

Factor de fricción de la turbina = 0.25

$$\Delta H_t = 0.25 * 10\text{m}$$

$$\Delta H_t = 2 \text{ m}$$

$$H_{neto} = H_{bruto} - \Delta H_t$$

$$H_{neto} = 10 \text{ m} - 2 \text{ m}$$

### 5.5.2 Diámetro interior del rodete

De la ecuación (14) se tiene:

$$D_i = 0.66 * 0.3 \text{ m}$$

$$D_i = 0.198 \text{ m}$$

### 5.5.3 Velocidad de rotación.

De la ecuación (15) se tiene lo siguiente:

$$N = \frac{39.85(10 \text{ m})^{1/2}}{0.3 \text{ m}}$$

$$N = 420.055 \text{ rpm}$$

### 5.5.4 Número específico de Revoluciones (Nq) y (Ns).

El rango de aplicación se define los número específicos de revoluciones Nq y Ns, los cuales se obtienen como se mencionó anteriormente con las ecuaciones (16) y (17):.

donde:

P: Potencia al freno de la turbina en C. V

Q: el caudal máximo que fluye por la turbina en  $m^3/s$

H: salto neto de la central en metros

N: velocidad de giro de la turbina en RPM

$$Nq = N \frac{\sqrt{Q}}{H^4} \quad \text{ecuación (7)}$$

$$Nq = 420.055 \text{ rpm} \frac{\sqrt{0.13 \text{ m}^3/s}}{(10 \text{ m})^4}$$

$$\mathbf{Nq = 26.9326}$$

$$Ns = N \frac{\sqrt{P}}{H^4} \quad \text{ecuación (8)}$$

$$Ns = 420.055 \text{ rpm} \frac{\sqrt{12.753 \text{ kW}}}{(10)^4}$$

$$\mathbf{Nq = 84.355}$$

En la tabla siguiente se puede observar el rango de aplicación de la turbina Michell Banki. El rango que se indica se ha definido en base a las limitaciones de su diseño mecánico en el límite superior y la eficiencia en su rango inferior. Estos rangos pueden variar de acuerdo a las experiencias articularas que se presenten.

**Tabla 7:** Rango de aplicación de la turbina hidráulicas según su número específico de revoluciones.

RANGO DE APLICACION DE TURBINAS HIDRAULICAS		
TIPO DE TURBINA	$N_q$	$N_s$
Turbina Pelton de 1 tobera	Hasta 9	Hasta 30
Turbina Pelton de 2 toberas	4-13	14-42
Turbina Pelton de 3 toberas o más	5-22	17-73
Turbina Michell-Banki	18-60	60-200
Turbina Francis Lenta	18-38	69-125
Turbina Francis Normal	38-68	125-225
Turbina Francis Rápida	68-135	225-450
Turbinas axiales	105-300	350-1000

De acuerdo al cálculo obtenido en base a las ecuaciones, los resultados están dentro del rango permitido de la turbina Michell Banki, con las condiciones de diseño un salto neto de 10 m, y con eficiencias máximas comprendidas entre 80 y 85 %.

### 5.5.5 Número de alabes

Los alabes varían entre 20 y 30 alabes dependen del tamaño del diámetro.

Por lo tanto, los alabes calculados en el diseño de la turbina es de 24 alabes por dar su mayor eficiencia y el tamaño calculado.

### 5.5.6 Coeficiente de velocidad absoluta $K_c$ del inyector

El coeficiente de velocidad afecta a la velocidad absoluta de entrada, tomando en cuenta las pérdidas que se generan dentro del inyector, también el coeficiente afecta al rendimiento hidráulico de la turbina. Varios investigadores han obtenido valores de  $k_c$  desde 0.95 a 0.98, mientras que para este tipo de turbinas existen valores tales como  $k_c = 0.967$ .

### 5.5.7 Potencia de la turbina

Para este tipo de turbinas Michell Banki se procede con ecuación (18).

$$P_{turbina} = 0.245 N m * 4.40 rad/s$$

$$P_{turbina} = 11.04 W$$

De acuerdo a la ecuación (19).

$$\tau = F_i * r (eje)$$

$$\tau = 10.686 N * 0.023 m (eje)$$

$$\tau = 0.245 N m$$

De acuerdo a la ecuación (20).

$$F_i = R * \mu \text{ (coeficiente de rozamiento)}$$

$$F_i = 19.083 N * 0.56$$

$$F_i = 10.686 N$$

Donde:

R: Fuerza aplicada -sobre el eje.

$\mu$ : coeficiente de rozamiento (caucho metal = 0.56)

$$\omega = rpm * \frac{\pi}{30} \left(\frac{rad}{s}\right) \text{ ecuación (21)}$$

$$\omega = 420.055 * \frac{\pi}{30} \left(\frac{rad}{s}\right)$$

$$\omega = 4.40 rad/s$$

### 5.5.8 Cálculo de la Potencia hidráulica (P)

datos:

$$H_{bruto} = 10m$$

$$H_{neto} = 8 m$$

$$P_{hidráulica} = \rho * g * H * Q \text{ ecuación (22)}$$

$$P_{hidráulica} = \left(1000 \frac{kg}{m^3} * 10 m * 0.13 \frac{m^3}{s} * 9.81 \frac{m}{s}\right)$$

$$P_{hidráulica} = 12.753 W$$

### 5.5.9 Rendimiento hidráulico

$$\eta = \frac{H_n}{H_u} \text{ ecuación (23)}$$

$$\eta = \frac{10}{13}$$

$$\eta = 0.76$$

El rendimiento hidráulico de la turbina es de  $0.76 * 100 \% = 76\%$

### 5.5.10 Rendimiento del generador

El generador entrega una potencia de 5 000W y con carga nos genera una potencia de salida de 4 800 W consumido. Ahora con la siguiente ecuación calculamos el rendimiento del generador.

donde:

$P_S$ : Potencia de salida en la turbina.

$P_E$ : Potencia de entrada en la turbina

$$\eta = \frac{P_S}{P_E} \text{ ecuación (23)}$$

$$\eta = \frac{5000 \text{ W}}{4800 \text{ W}}$$

$$\eta = 0.96$$

### 5.5.11 Calculo eficiencia mecánica

$$\eta = 0.771 - 0.384 \left( \frac{D_e}{H} \right) \text{ ecuación (24)}$$

$$\eta = 0.771 - 0.384 \left( \frac{0.3 \text{ m}}{10 \text{ m}} \right)$$

$$\eta = 0.75$$

## 5.6 Toma de datos 1

### 5.6.1 Potencia mecánica

Se analiza la potencia mecánica partiendo de la capacidad eléctrica del generador, en la ecuación (33) se muestra la expresión que relaciona la potencia mecánica con la potencia eléctrica de diseño.

$$\text{Potencia}_{\text{eléctrica}} = \text{Potencia}_{\text{mecánica}} * \eta \quad (33)$$

Para determinar la potencia mecánica se conectan varias cargas de acuerdo a la Tabla 7, para estimar la potencia mecánica que trabaja con distintas cargas conectadas al generador teniendo en cuenta que al trabajar con su máxima capacidad el generador va a generar oposición al giro de la turbina, en la Tabla 8 se muestran las potencias mecánicas con las cargas analizadas.

**Tabla 7.** Cargas utilizadas para determinar la potencia de la turbina

Maquinas	Potencia eléctrica (W)
Taladro	750
Amoladora pequeña	800
Pistola de calor	1 500
Amoladora grande	1 800

$$P_{\text{mecánica}} = \frac{P_{\text{eléctrica}}}{\eta}$$

$$P_{\text{mecánica}} = \frac{750 \text{ W}}{0.8}$$

$$P_{\text{mecánica}} = 937.5 \text{ W}$$

$$P_{\text{mecánica}} = \frac{800 \text{ W}}{0.8}$$

$$P_{\text{mecanica}} = 1\ 000\ \text{W}$$

$$P_{\text{mecanica}} = \frac{1550\ \text{W}}{0.8}$$

$$P_{\text{mecanica}} = 1875\ \text{W}$$

$$P_{\text{mecanica}} = \frac{1800\ \text{W}}{0.8}$$

$$P_{\text{mecanica}} = 2250\ \text{W}$$

**Tabla 8.** Potencia mecánica con las distintas cargas eléctricas.

<b>CARGA (W)</b>	<b>Potencia mecánica (W)</b>
0	0
750	937.5
800	1 000
1500	1 875
1800	2 250
4800	6062.5

### 5.6.2 Cálculo del torque

De la ecuación (26) mencionada anteriormente se calcula el torque necesario al que trabaja la turbina para satisfacer las potencias eléctricas utilizadas que demanda el generador, en la Tabla 9 se muestran los resultados obtenidos.

$$T = \frac{974 (2\ 250\ \text{W})}{347.4\ \text{rpm}}$$

$$T = 68.249\ \text{N m}$$

$$T = \frac{974 (2\ 750\ \text{W})}{261\ \text{rpm}}$$



$$T = 121.08 \text{ N m}$$

$$T = \frac{974 (5\,125 \text{ W})}{238 \text{ rpm}}$$

$$T = 205.75 \text{ N m}$$

$$T = \frac{974 (6\,000 \text{ W})}{215 \text{ rpm}}$$

$$T = 266 \text{ N m}$$

**Tabla 9.** Resultado del torque aplicado a la carga mecánica

Potencia mecánica (W)	Torque (N m)
0	0
2250	68.249
2750	121.08
5125	205.75
6000	266

### 5.6.3 Cálculo de la presión

**Datos:**

$$Q: 0.13 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$H_b: 10 \text{ m}$$

$$A_0: 0.234 \text{ (diámetro interno de tubería)}$$

$$\rho: 997 \text{ kg/m}^3$$

$$g: 9.81 \text{ m/s}^2$$

$$P_1: 0$$

$$P_2: ?$$

Con los datos obtenidos, partimos al cálculo de la presión en la tubería donde debemos conocer la velocidad partiendo de la ecuación de caudal.

$$Q = V_s * A$$

$$A = \pi * r^2$$

$$A = \pi * (0.127 \text{ m})^2$$

$$A = 0.0506 \text{ m}^2$$

Ahora en función de la velocidad de la salida en la tubería

$$V_s = \frac{A}{Q}$$

$$V_s = \frac{0.0506 \text{ m}^2}{0.13 \text{ m}^3/\text{s}}$$

$$V_s = 2,57 \text{ m/s}$$

#### 5.6.4 Tubería forzada

Con la ecuación de Bernoulli, la presión de salida en la tubería se identifica a continuación.

#### 5.6.5 Principio de Bernoulli

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + h_1 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_2 \text{ ecuación (20)}$$

Donde:

$P_1$ : Presión inicial

$P_2$ : Presión final

$\gamma$ : Peso específico

$h_1$ : Altura Punto 1

$h_2$ : Altura punto 2

$V_1$ : Velocidad del fluido inicial

$V_2$ : Velocidad del fluido final

$g$ : es la aceleración de la gravedad =  $9.81 \text{ m/s}^2$

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + h_1 + \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + h_2$$

De la ecuación  $\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g}$  es cero ya que al principio no hay presión en la tubería y la altura  $h_2$  es cero. Despejamos  $P_2$ , la ecuación queda:

$$P_2 = \left(h_1 - \frac{V_2^2}{2g}\right) \gamma$$

Reemplazando datos:

$$P_2 = \left(10 - \frac{2.57^2}{2(9.81)}\right) 998$$

$$P_2 = 9.839 \frac{\text{kg}}{\text{m}^2}$$

Para pasar a pascal multiplicamos el valor por 9.807 Pa que es = 96.488 Pa

### 5.6.6 Cálculo de las pérdidas primarias (hf1)

Con la ecuación de Darcy se calcula las perdidas primarias.

$$h_{f1} = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2 * g} \text{ ecuación (21)}$$

f: factor de fricción (adimensional)

L: Longitud de la tubería (m)

D: diámetro interior de la tubería (m)

V: Velocidad (m/s).

### 5.6.7 Rugosidad relativa

$$\varepsilon = \frac{k}{D} \text{ ecuación (22)}$$

$$\varepsilon = \frac{0,02 \text{ mm}}{234 \text{ mm}}$$

$$\varepsilon = 8.547 \times 10^{-5}$$

Con la ecuación de la rugosidad relativa k se muestra en la tabla 10

**Tabla 10.** Rugosidad relativa

<b>Material de construcción</b>	<b>Rugosidad (k: mm)</b>
<u>Tuberías de plástico</u> Poliétileno (P.E.)..... Cloruro de polivinilo (PVC) .....	0,002 0,02
<u>Tuberías metálicas</u> Tuberías estiradas, sin soldaduras de latón, cobre, plomo..... Aluminio.....	0,0015 - 0,01 0,015 - 0,06
<u>Acero estirado sin soldaduras:</u> Nuevas..... Después de muchos años en servicio.....	0,02 - 0,10 1,2 - 1,5
<u>Acero galvanizado:</u> Nuevas, buena galvanización..... Galvanización ordinaria.....	0,07 - 0,10 0,10 - 0,15
<u>Fundición:</u> Nuevas..... Nuevas con revestimiento bituminoso..... Asfaltadas..... Después de varios años en servicio.....	0,25 - 1,00 0,10 - 0,15 0,12 - 0,30 1,00 - 4,00
<u>Hormigón y fibrocemento:</u> - <u>Hormigón:</u> Superficie muy lisa..... Condiciones medias..... Superficie rugosa..... Hormigón armado..... - <u>Fibrocemento (F.C.):</u> Nuevas..... Después de varios años en uso.....	0,3 - 0,8 2,5 3 - 9 2,5 0,05 - 0,10 0,60

### 5.6.8 Reynolds

Con las variables calculadas anteriormente se tiene:

donde:

A: 0.0506 m<sup>2</sup>

V<sub>s</sub>: 2,57 m/s

#### Cálculo de Reynolds

Se calcula Reynolds (ecuación (31)) para encontrar el factor de fricción en el diagrama de Moody Anexo 1.

$$Re = \frac{\text{fuerzas inerciales}}{\text{fuerzas viscosas}} = \frac{\rho * D * V_s}{\mu} = \frac{V_s * D}{\nu}$$

donde:

$V_s$ : Velocidad característica del fluido

D: Diámetro de la tubería a través de la cual circula el fluido o longitud característica del sistema

$\nu$ : Viscosidad cinemática del fluido

Q: caudal

Del Anexo 1, se tiene la viscosidad cinemática ( $\nu$ )

$$\text{Re} = \frac{V_s * D}{\nu}$$
$$\text{Re} = \frac{2.57 \text{ m/s} * 0.254}{1.007 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}}$$
$$\text{Re} = 6.482 \times 10^6$$

Se determina  $f = 0.019$  en el Anexo 2, diagrama de Moody.

**Una vez calculado los valores, se reemplaza en la ecuación**

$$h_{f1} = f * \frac{L}{D} * \frac{V^2}{2 * g}$$
$$h_{f1} = 0.019 * \frac{100 \text{ m}}{0.254 \text{ m}} * \frac{(2.57 \text{ m/s})^2}{2(9.81 \text{ m/s}^2)}$$
$$h_{f1} = 1.063$$

### 5.6.9 Pérdidas secundarias

**Relación entre pérdida de presión y la velocidad del flujo**

$$h_{f2} = k * \frac{V^2}{2g}$$

$h_{f2}$ : Pérdidas menores (accesorios)

V: Velocidad del fluido

g: Velocidad de la gravedad

k: factor de accesorios (adimensional)

Donde k de la válvula de compuerta es de 0.11 de acuerdo al diámetro en pulgadas.

$$h_{f2} = 0.11 * \frac{2.57^2}{2(9.81)}$$

$$h_{f2} = 0.037$$

Ahora sumando la en la ecuación de perdidas en la tubería y accesorios:

$$h_f = h_{f1} + h_{f2}$$

$$h_f = 1.063 + 0.037$$

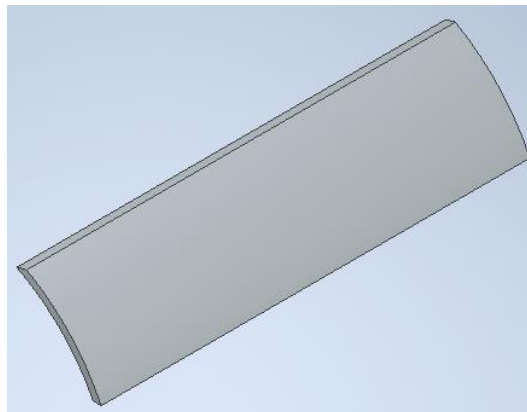
$$h_f = 1.1$$

## 5.7 Diseño de componentes del Sistema.

Se muestran los componentes de la turbina que servirán para el modelamiento del sistema con las variables analizadas.

### 5.7.1 Alabe.

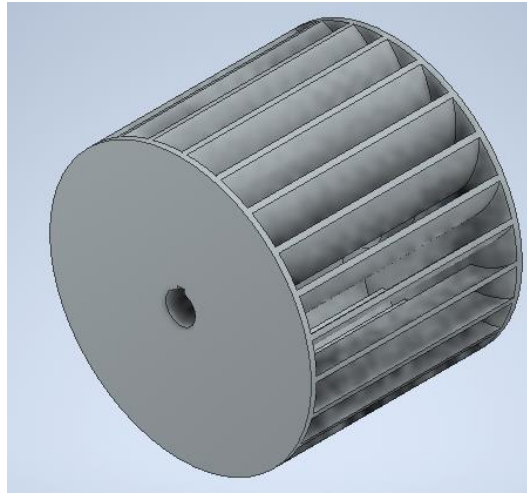
En la Figura 37) se muestra el álabe diseñado en el software Inventor.



**Figura 37.** Esquema de álabe de la turbina

### 5.7.2 Rodete Michell Banki

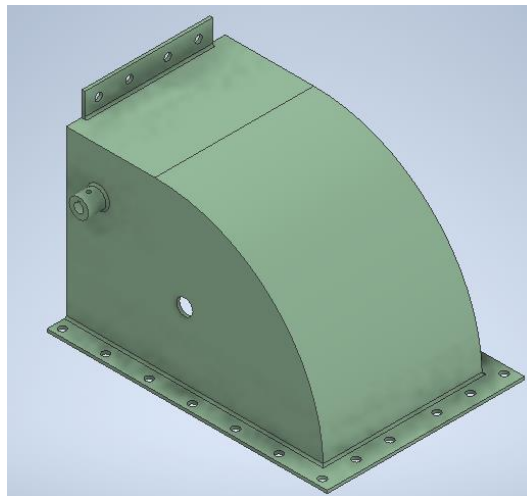
En la (Figura 38), se muestra el rodete ensamblado con los álabes.



**Figura 38.** Esquema del Rodete en software inventor

### 5.7.3 Carcasa

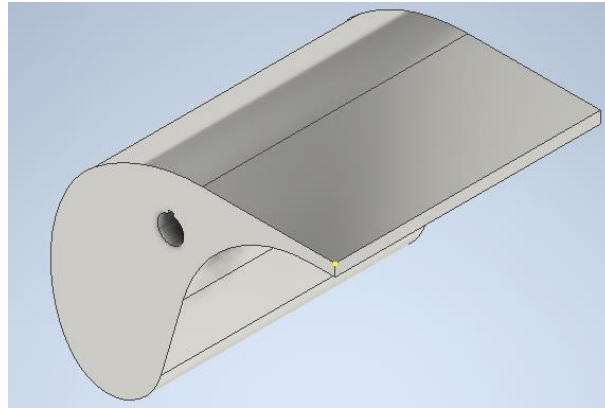
Se muestra el diseño de la carcasa en el software inventor (Figura 39).



**Figura 39.** Esquema de la carcasa en software inventor

#### 5.7.4 Alabe Directriz

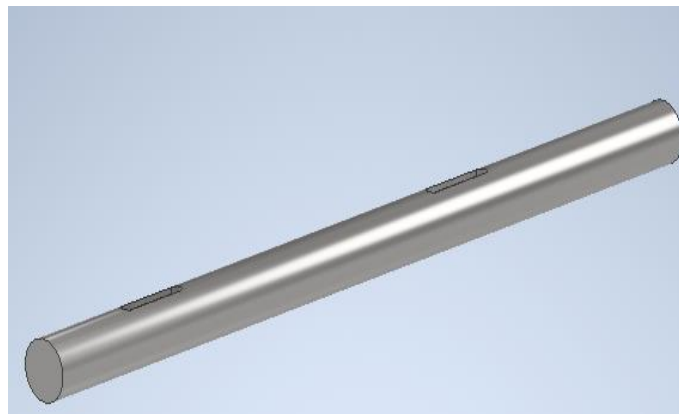
El diseño del alabe en el software inventor se muestra en la (Figura 40).



**Figura 40.** Esquema del alabe directriz en software inventor

#### 5.7.5 Eje del rodete

En la (Figura 41) se muestra el eje del rodete.

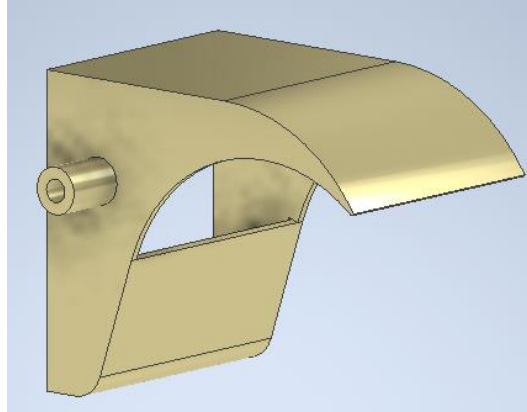


**Figura 41.** Esquema del eje del Rodete en software inventor

#### 5.7.6 Inyector

En la (Figura 42) se muestra el inyector, quien es el encargado de dirigir el caudal hacia el rodete.

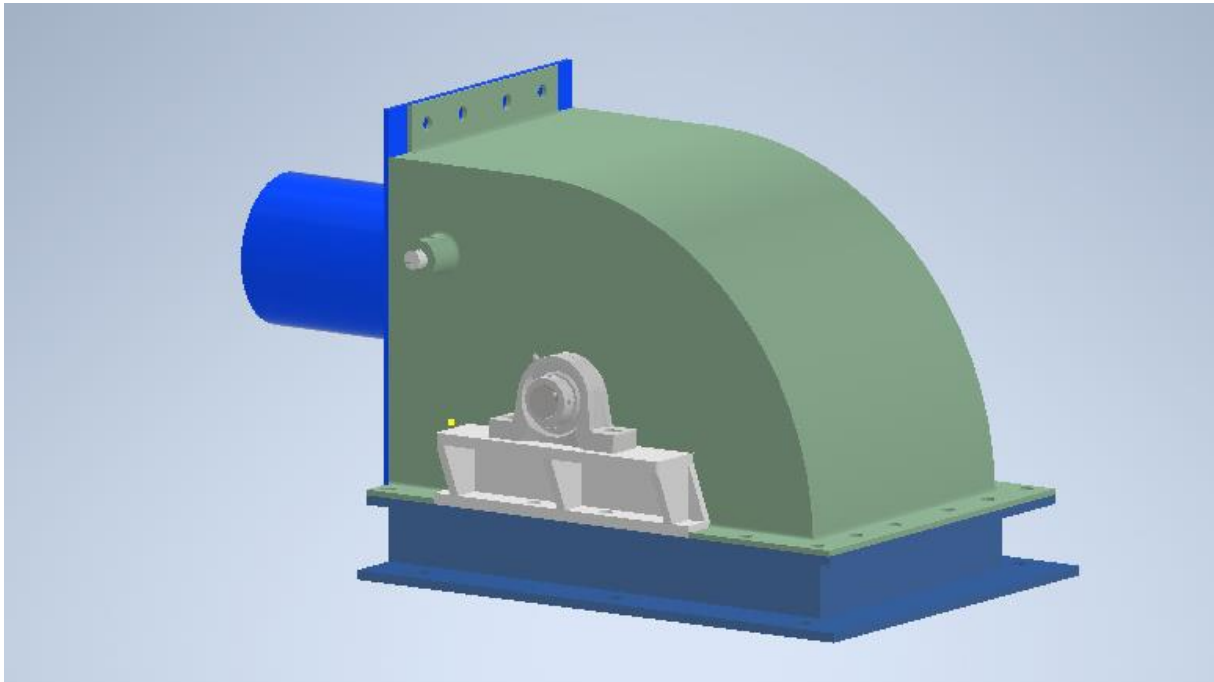


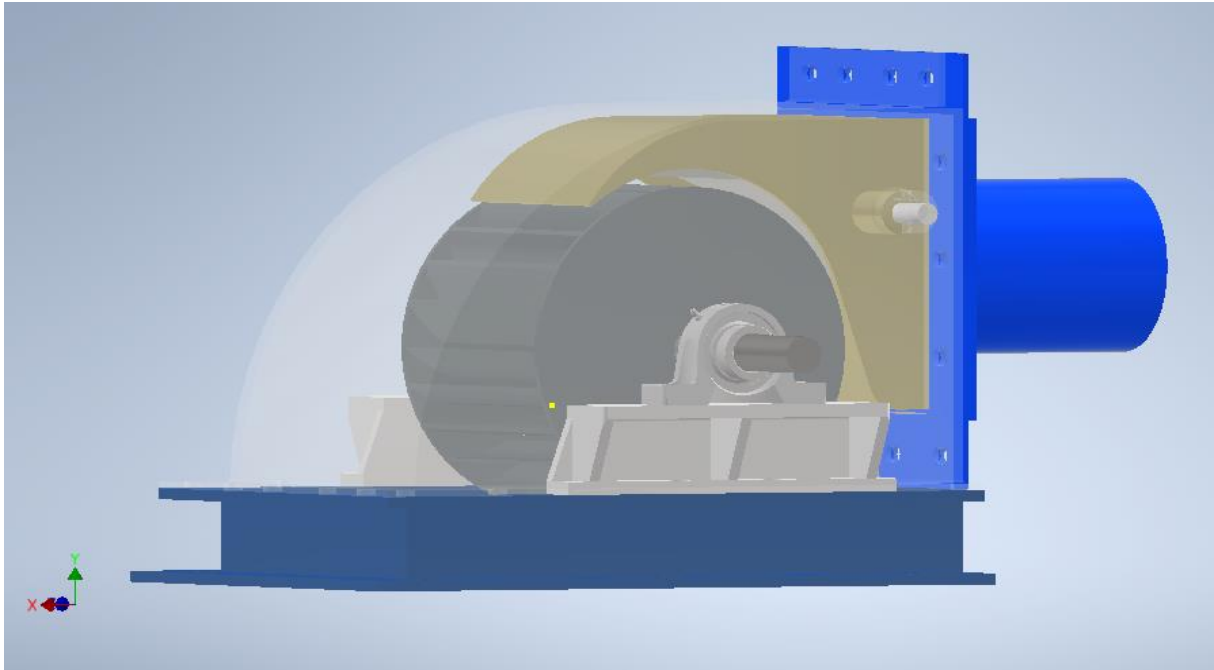


**Figura 42.** Esquema del inyector en software inventor

### **5.7.7** Ensamble de la turbina Michael Banki

En la (Figura 43) se puede observar el ensamble de la turbina con sus respectivos componentes.



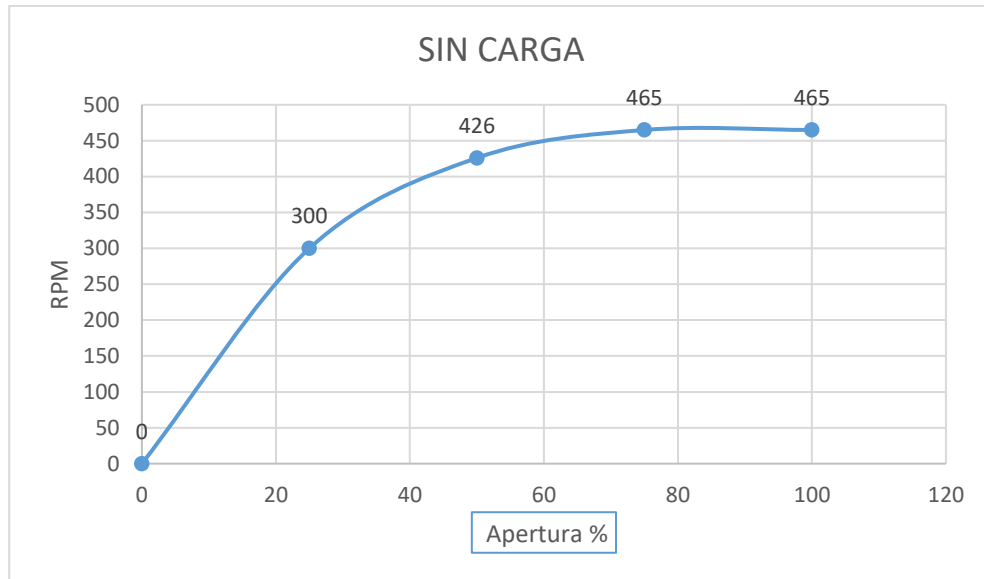


**Figura 43.** Esquema de la turbina Michell Banki.

## **6 Análisis de Resultados**

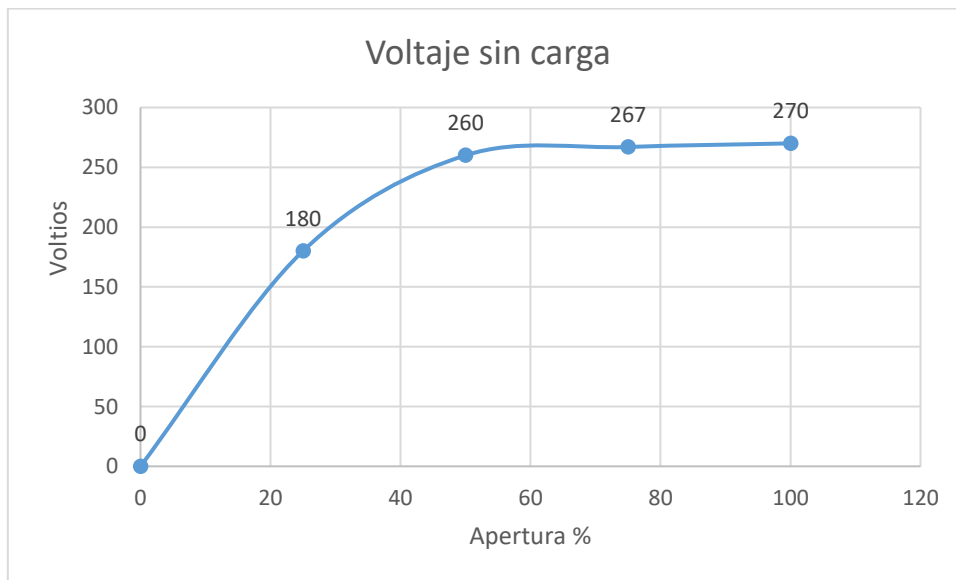
De acuerdo a lo mencionado anteriormente se analizan los resultados obtenidos de las pruebas realizadas a la turbina.

En la Figura 44 se puede apreciar que, posterior al 50% de apertura de la válvula se obtiene las revoluciones máximas que alcanza la turbina llega a 465 rpm, esta se encuentra dentro del rango permitido para esta turbina, no se aplicó ningún tipo de carga eléctrica para esta toma de datos.



**Figura 44.** Curva de rpm vs apertura de la válvula sin carga.

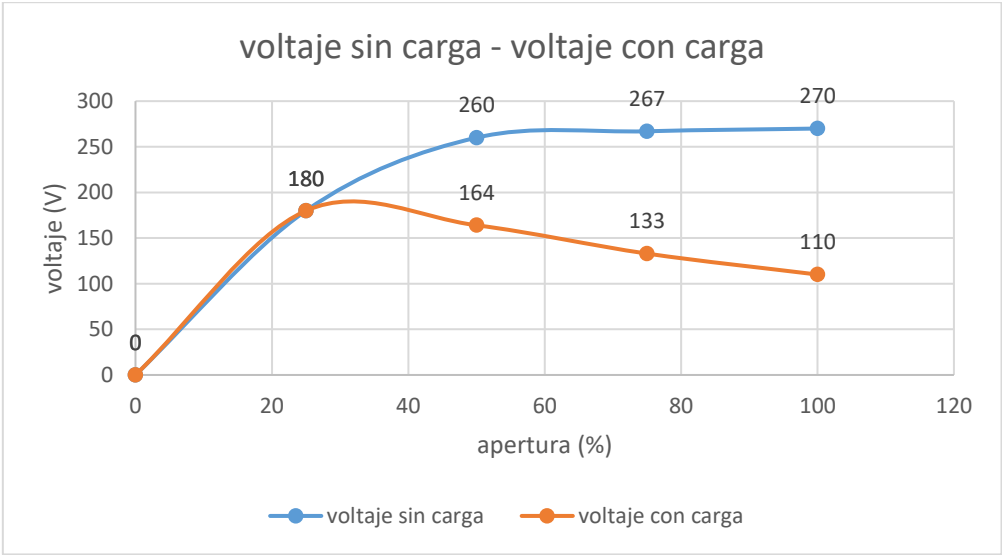
En la Figura 45, se puede observar el comportamiento del generador en función del voltaje generado respecto a la apertura de la válvula, en esta parte no se aplica ninguna carga y al abrir al 100 % de la válvula el generador proporciona 270 V, en vacío se puede apreciar que la turbina proporciona el torque necesario para su generación con las distintas aperturas de la válvula.



**Figura 45.** Curva de voltaje vs apertura de la válvula sin carga.

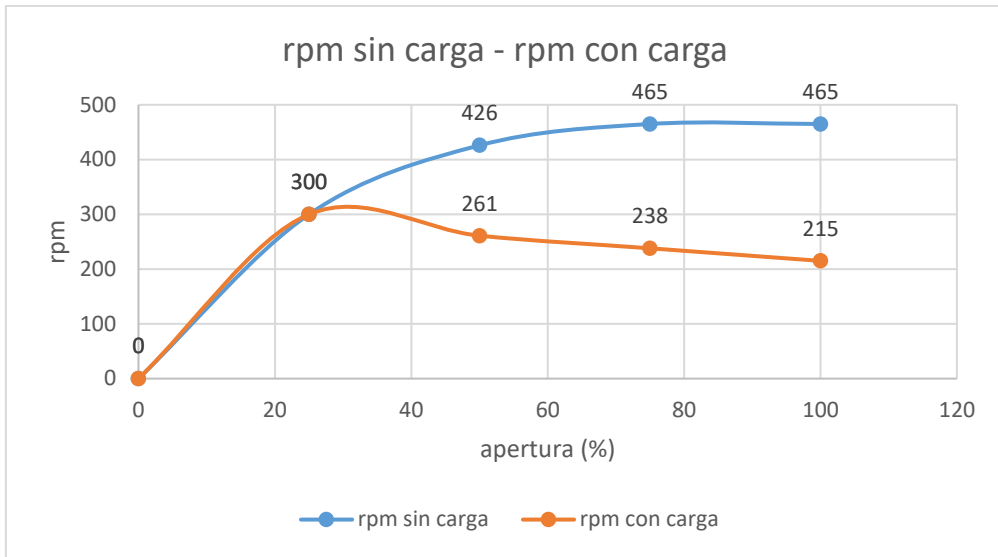
Al realizar las pruebas conectando los elementos descritos anteriormente una carga total de 4800 W, en la Figura 46 se puede observar el comportamiento del generador con la apertura de la válvula vs. voltaje sin carga y con carga eléctrica, se puede apreciar la diferencia del

comportamiento de este con la carga de 4800 W y sin ella; el voltaje sin carga alcanza los 270 V, mientras que con carga el voltaje desciende a 110 V.



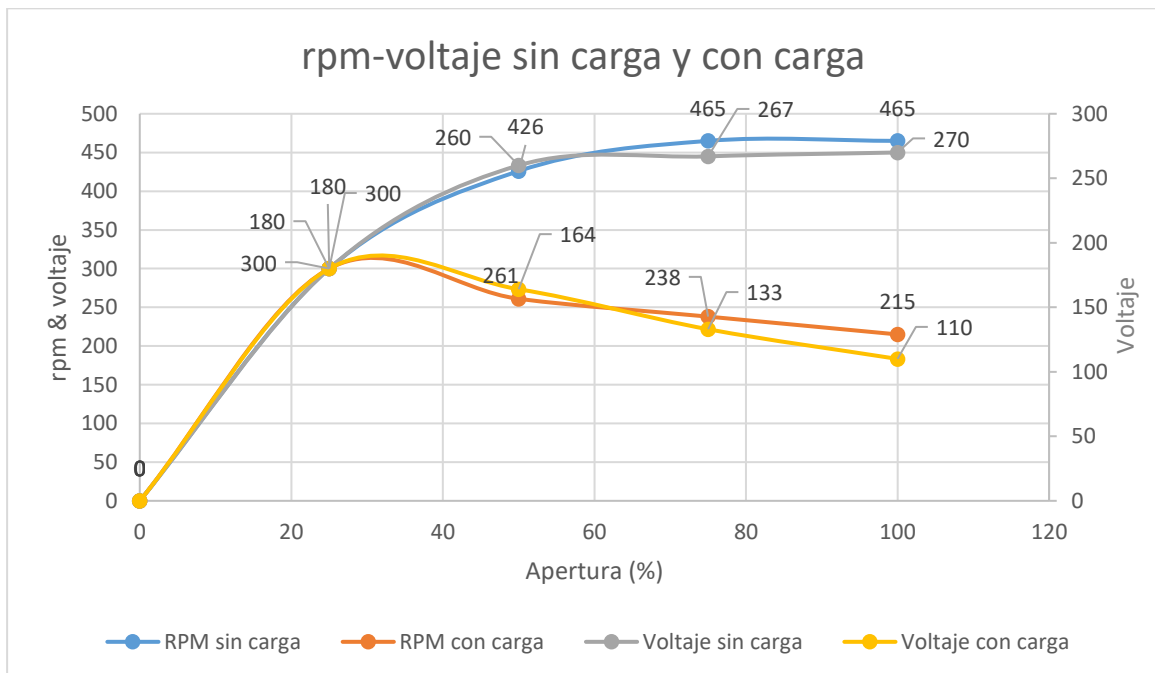
**Figura 46.** Curvas del voltaje sin carga y con carga vs la apertura de la válvula.

En la Figura 47, se muestra el comportamiento de la turbina en función de las rpm respecto al porcentaje de apertura. Como se analizó anteriormente con carga de 4800 W provoca una resistencia al giro del eje de la turbina, sin carga aumenta hasta las 465 rpm, en la que se estabiliza, mientras que con la carga eléctrica determinada, las rpm disminuyen hasta las 215 rpm, en donde se determina una disminución del 53 % debido a la resistencia que la carga ejerce en el generador, sin embargo el torque se eleva manteniendo al generador funcionando con la carga determinada.



**Figura 47.** Curvas rpm sin carga y con carga eléctrica vs apertura de válvula

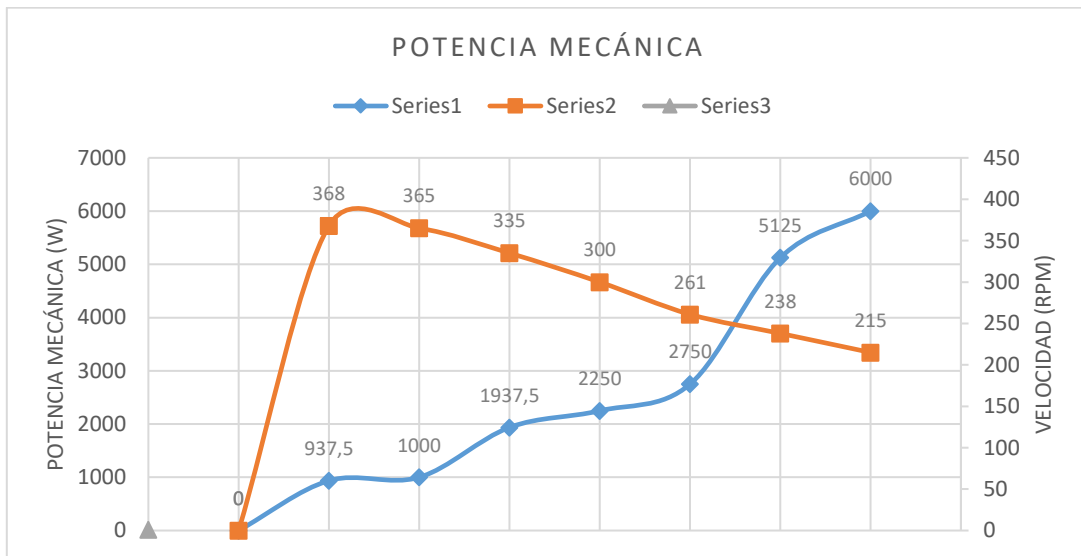
En la Figura 48, se muestra todos los datos graficados, tanto del comportamiento de la turbina en función de las rpm, como el comportamiento del generador en función del voltaje, con la carga de 1500 W.



**Figura 48.** curvas de rpm vs voltaje

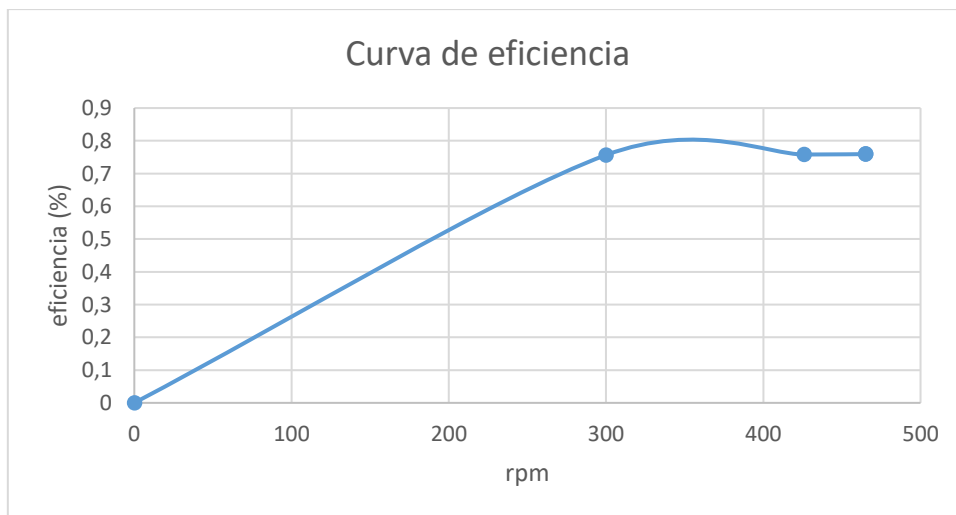
En la Figura 49, se observa la potencia mecánica y rpm con la carga de 4800 W. Se realizó el cálculo para hallar la potencia mecánica respecto los demás parámetros, al abrir al 100% de la

válvula, con todas las cargas determinadas de esta manera se puede apreciar como la turbina abastece el torque necesario para vencer la resistencia eléctrica que provoca frenado el eje.



**Figura 49.** Potencia mecánica vs rpm y voltaje con carga

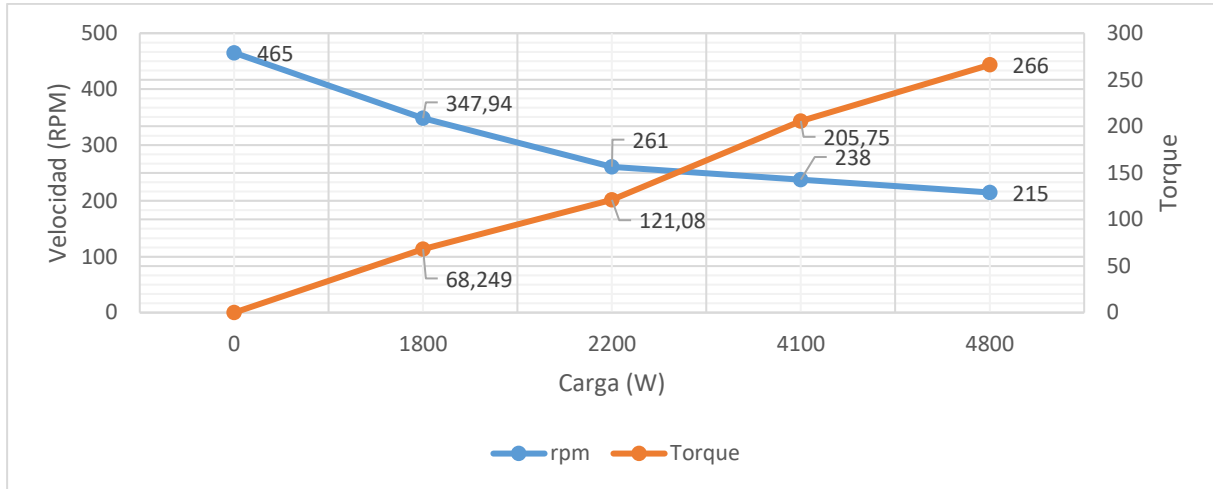
En la Figura 50, se observa la eficiencia de la turbina en función de las rpm, se construye una curva que se relaciona la eficiencia y los rpm, al tener 465 rpm la eficiencia es de 76 %, validando la eficiencia real respecto a la teórica que es del 80%.



**Figura 50.** Curva de la eficiencia vs rpm

En la (Figura 51) se representa la curva de las RPM y torque, graficadas con los resultados obtenidos. Se puede observar que con la apertura de la válvula al 100 % se obtiene 465 rpm, al aplicar la carga máxima de 4 800 W, que es la máxima capacidad del generador, provoca una resistencia mayor y frena la turbina hasta 215 rpm, y el torque respecto al eje del rodete, crece

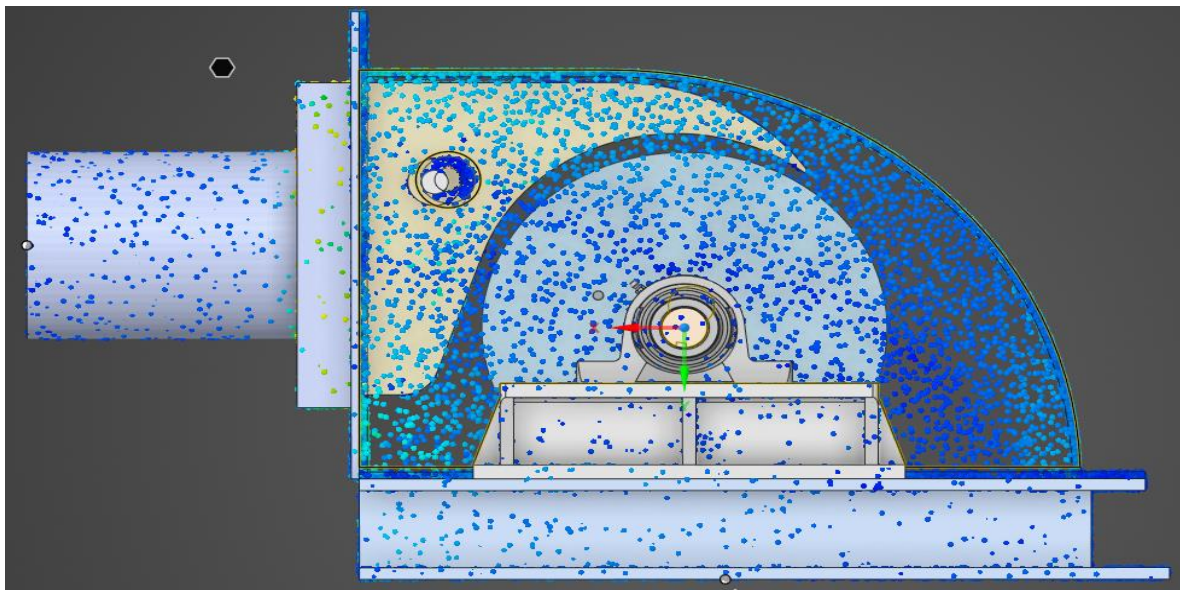
a 266 N\*m y es como se puede observar el comportamiento de los parámetros calculado y realizado pruebas, el rendimiento de la turbina es adecuado para el funcionamiento del generador.



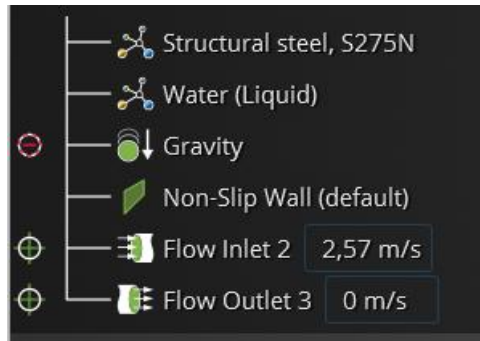
**Figura 51.** curva de RPM vs Torque.

### 6.1.1 Resultados de la simulación.

En la Figura 52, se puede muestra la simulación de la turbina en ANSYS Discovery, el software permite conocer el comportamiento del análisis de fluidos en la entrada y salida de la turbina. Los datos de partida son la velocidad de giro del eje del rodete de 2.57 m/s con el caudal de 0.13 m<sup>3</sup>/s (Figura 53).

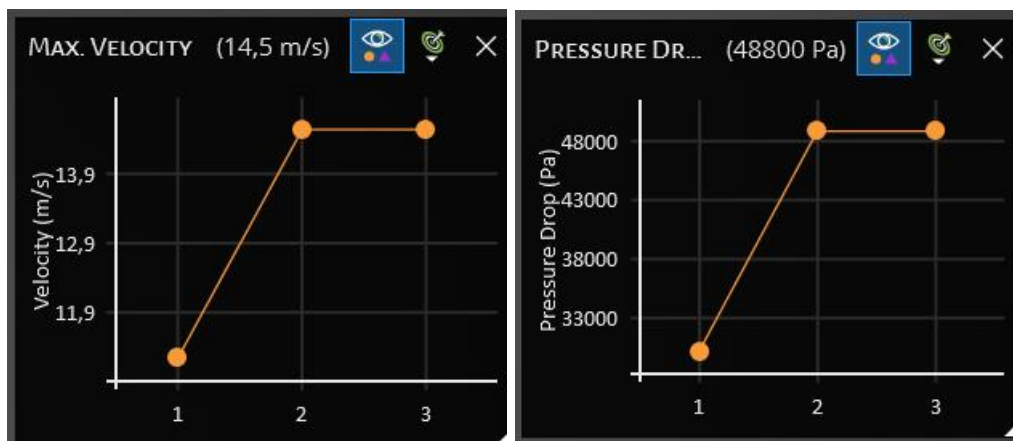


**Figura 52.** Trayectoria del flujo en turbina



**Figura 53.** Condiciones de frontera

En la Figura 54, se puede muestra el comportamiento de la turbina en función de la velocidad y se obtiene una velocidad máxima de 14.5 m/s y una presión de 48 800 Pa. Al utilizar la velocidad máxima, se mantiene constante, hasta cuando se termine el flujo pasar por la tubería. Con estos resultados se validan el comportamiento de la turbina para su operación conectado al generador de 5000 W.



**Figura 54.** Grafica de resultados velocidad y presión.



## 7 Conclusiones

El aprovechamiento de los recursos naturales renovables resulta ser muy útil al momento de solucionar las necesidades energéticas de localidades alejadas, ya que resulta ser una fuente de producción de electricidad, esto permite que los ingenieros busquen alternativas con mejores eficiencias y a bajos costos, en el caso del presente proyecto que puedan aplicar el funcionamiento de las maquinas hidráulicas con fines de generación en comunidades aisladas.

Con el análisis realizado en la presente investigación, se valida y se garantiza el funcionamiento óptimo de la pico turbina de aprovechamiento para generación de una familia promedio (5 kW de consumo), debido a las condiciones del terreno del emplazamiento el comportamiento de la turbina en todos los regímenes de carga conectadas al generador permite su funcionamiento a su máxima capacidad. Con la laguna completamente llena, se tiene una autonomía de aproximadamente 9 horas de generación eléctrica hasta que el nivel del agua sea inferior al de la tubería de captación.

La eficiencia determinada de la pico turbina con la máxima capacidad de carga conectada al generador de 4800 W es de 76%, un rendimiento muy bueno, dado que la eficiencia teórica de diseño de la turbina es del 80%.

A pesar que con la capacidad de carga máxima conectado al generador los 4800 W provoca una resistencia eléctrica que frena al generador sin embargo por las condiciones de la instalación y la eficiencia de la turbina, esta ejerce el torque necesario para garantizar el correcto funcionamiento del generador en todos los regímenes de carga.

Finalmente, a través de la impresión 3D, se fabrica un prototipo validado a escala aprovechando la manufactura aditiva para obtener un resultado muy práctico, en el que se puede apreciar cada parte interna y comprender su funcionamiento.

## **8 Recomendaciones**

Es importante tener en cuenta que la turbina debe tener una correcta alineación con respecto al generador para evitar pérdidas, debido a la vibración por la velocidad de giro del eje.

Se debe tener en cuenta para garantizar las 9 horas estimadas de funcionamiento de la pico turbina el reservorio debe estar completamente lleno, además se debe considerar que el uso de la laguna es para riego en los terrenos bajos de la comunidad salesiana no se tiene control del caudal utilizado, por lo que disminuiría considerablemente las horas de generación.

## 9 Referencias

- [1] «Hacia-un-manejo-integral-del-recurso-hidrico-en-isla-Cozumel-quintana-roo.pdf». Accedido: 10 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Gerardo-Hernandez-23/publication/349958745\\_Hacia\\_un\\_manejo\\_integral\\_del\\_recurso\\_hidrico\\_en\\_isla\\_Cozumel\\_quintana\\_roo/links/6048fe56299bf1f5d83d79c7/Hacia-un-manejo-integral-del-recurso-hidrico-en-isla-Cozumel-quintana-roo.pdf#page=41](https://www.researchgate.net/profile/Gerardo-Hernandez-23/publication/349958745_Hacia_un_manejo_integral_del_recurso_hidrico_en_isla_Cozumel_quintana_roo/links/6048fe56299bf1f5d83d79c7/Hacia-un-manejo-integral-del-recurso-hidrico-en-isla-Cozumel-quintana-roo.pdf#page=41)
- [2] W. E. Guastay Cajo y E. A. Llanes Cedeño, «EL USO DE LA ENERGÍA HIDRÁULICA PARA LA GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA COMO ESTRATEGIA PARA EL DESARROLLO INDUSTRIAL EN EL ECUADOR», *Univ. Cienc. Technol.*, vol. 24, n.º 104, pp. 28-35, sep. 2020, doi: 10.47460/uct.v24i104.363.
- [3] «ELMflaja.pdf». Accedido: 10 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/7214/ELMflaja.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [4] J. A. Niño-Vega, F. H. Fernández-Morales, y J. E. Duarte, «Diseño de un recurso educativo digital para fomentar el uso racional de la energía eléctrica en comunidades rurales», *Saber Cienc. Lib.*, vol. 14, n.º 2, Art. n.º 2, dic. 2019, doi: 10.18041/2382-3240/saber.2019v14n2.5889.
- [5] M. Yupanqui y P. Yampier, «DISEÑO DE GENERADOR HIDROELÉCTRICO PORTABLE PARA ZONAS RURALES».
- [6] F. J. Vélez Hoyos, «Congreso Internacional de Ingeniería con Impacto Social CIISOL 2019», Ediciones Universidad Cooperativa de Colombia, ago. 2020. doi: 10.16925/ecam.02.
- [7] «OPTIMIZACION-DEL-ANGULO-DE-ATAQUE-DEL-ALABE-INYECTOR-DE-UNA-TURBINA-MICHELL-BANKI-EN-PYTHON-CON-PAQUETE-GEKKO.pdf». Accedido: 10 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://www.researchgate.net/profile/Robert-Proano/publication/359539670\\_OPTIMIZACION\\_DEL\\_ANGULO\\_DE\\_ATAQUE\\_DEL\\_ALABE\\_INYECTOR\\_DE\\_UNA\\_TURBINA\\_MICHELL\\_BANKI\\_EN\\_PYTHON\\_CON\\_PAQUETE\\_GEKKO/links/6243222021077329f2dfad2f/OPTIMIZACION](https://www.researchgate.net/profile/Robert-Proano/publication/359539670_OPTIMIZACION_DEL_ANGULO_DE_ATAQUE_DEL_ALABE_INYECTOR_DE_UNA_TURBINA_MICHELL_BANKI_EN_PYTHON_CON_PAQUETE_GEKKO/links/6243222021077329f2dfad2f/OPTIMIZACION)

-DEL-ANGULO-DE-ATAQUE-DEL-ALABE-INYECTOR-DE-UNA-TURBINA-MICHELL-BANKI-EN-PYTHON-CON-PAQUETE-GEKKO.pdf

- [8] E. M. Mejía, «ANÁLISIS ESTADÍSTICO DEL CAUDAL MEDIO DEL ÚLTIMO CUATRIENIO EN LA QUEBRADA ANTIOQUEÑITA DEL MUNICIPIO EL COLEGIO, CUNDINAMARCA PARA EL APROVECHAMIENTO HIDROELÉCTRICO A PEQUEÑA ESCALA.».
- [9] M. Chalan y E. Geovanny, «Diseño y análisis para la implementación de un sistema de pico- aprovechamiento en generación hidroeléctrica».
- [10] «CD 10221.pdf». Accedido: 10 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/20710/1/CD%2010221.pdf>
- [11] M. F. Carrasco Idrovo y M. E. Morocho Lopez, «Diseño de una microcentral hidroeléctrica para las zonas rurales de la parroquia zapotal de la provincia de los ríos», bachelorThesis, Espol, 2016. Accedido: 10 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://www.dspace.espol.edu.ec/handle/123456789/39199>
- [12] S. P. U. Romero y E. H. C. Bohórquez, «Prefactibilidad del suministro de energía eléctrica a zonas rurales no interconectadas, por medio de turbinas eléctricas sumergibles sobre el Río Putumayo», p. 110, 2004.
- [13] «Centrales de Energías Renovables - Libera tu mente Flip PDF | AnyFlip». <https://anyflip.com/xzcp/xuqh/> (accedido 16 de enero de 2023).
- [14] «Tesis I. M. 620 - Acosta Peña Alex Vinicio y Moya Cepeda Raúl Alfredo.pdf». Accedido: 16 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/32147/1/Tesis%20I.%20M.%20620%20-%20Acosta%20Pe%c3%b1a%20Alex%20Vinicio%20y%20Moya%20Cepeda%20Ra%c3%bal%20Alfredo.pdf>
- [15] «TFG.pdf». Accedido: 14 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://academicae.unavarra.es/bitstream/handle/2454/33695/TFG.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- [16] T. Reyna, S. Reyna, M. Lábaque, C. Riha, y E. Giménez, «TURBINAS HIDROELÉCTRICAS MICHELL BANKI PARA APLICACIÓN EN COMUNIDADES AISLADAS.», p. 8.
- [17] «T4611e.pdf». Accedido: 12 de julio de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/30061/1/T4611e.pdf>
- [18] E. N. Sl, «Energías renovables y eficiencia energética», p. 148.
- [19] C. Steven, T. Kevin, y V. Marco, «ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL», p. 20.
- [20] «04 MEL 084 TRABAJO GRADO.pdf». Accedido: 13 de julio de 2022. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/10289/2/04%20MEL%20084%20TRABAJO%20GRADO.pdf>
- [21] A. E. Díaz, C. L. C. Arenas, y J. S. L. Archila, «Pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH): una revisión», *Visión Electrónica*, vol. 1, n.º Extra 1, pp. 111-126, 2018.
- [22] «Maquinas\_termicas\_-\_Marta\_Munoz\_Dominguez-FREELIBROS.ORG-with-cover-page-v2.pdf». Accedido: 20 de octubre de 2021. [En línea]. Disponible en: [https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/47281860/Maquinas\\_termicas\\_Marta\\_Munoz\\_Dominguez-FREELIBROS.ORG-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1634754200&Signature=BkNe9vIhAzyjgl8~n2S18sJ6S-hAm8SPy9LTlyXxxGi7Ttl3SJUQvxyA9iWoIXnXqFqM-z51nIFrKfLoYdw7Q4A7kKf5kikUWzK1sZstMUOzfHlq43Q2upgyQ4Dpe2Wil8I898ezz3jmQ7NKqHdxaReNL5GQ-UanXin7GPrycfNT-HD~gZF9eIjjHEbbnk1Rejwrz-qbaqxSKqDjo4Y8bpKfLpasTB297Nyg03aFBV1DgElg8W1Oj3Rlw4-1kqE9Xv~AZ0BiTLwitsmJgpBwOzgYaO7tGG09ekiCwlUPAqcr7yOjtl8Q0Ee-4u3gCf7v~xm1wVXfMK1Vu4U4POTZdg\\_\\_&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA](https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/47281860/Maquinas_termicas_Marta_Munoz_Dominguez-FREELIBROS.ORG-with-cover-page-v2.pdf?Expires=1634754200&Signature=BkNe9vIhAzyjgl8~n2S18sJ6S-hAm8SPy9LTlyXxxGi7Ttl3SJUQvxyA9iWoIXnXqFqM-z51nIFrKfLoYdw7Q4A7kKf5kikUWzK1sZstMUOzfHlq43Q2upgyQ4Dpe2Wil8I898ezz3jmQ7NKqHdxaReNL5GQ-UanXin7GPrycfNT-HD~gZF9eIjjHEbbnk1Rejwrz-qbaqxSKqDjo4Y8bpKfLpasTB297Nyg03aFBV1DgElg8W1Oj3Rlw4-1kqE9Xv~AZ0BiTLwitsmJgpBwOzgYaO7tGG09ekiCwlUPAqcr7yOjtl8Q0Ee-4u3gCf7v~xm1wVXfMK1Vu4U4POTZdg__&Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA)
- [23] H. R. G. Miranda, «DETERMINACIÓN DE COSTOS UNITARIOS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE MINICENTRALES HIDROELÉCTRICAS».
- [24] D. R. Rodríguez, «Departamento de Ingeniería Hidráulica», p. 67.

- [25] R. O. Flórez, *Pequeñas centrales hidroeléctricas*. Ediciones de la U, 2011.
- [26] J. C. Q. Ramírez, «VIABILIDAD TÉCNICA-ECONÓMICA DE IMPLEMENTAR UNA BOMBA COMO PICO TURBINA PARA SUMINISTRAR ENERGÍA ELÉCTRICA A UNA ESCUELA RURAL», p. 107.
- [27] «Proyecto-observatorio-1.pdf». Accedido: 12 de julio de 2022. [En línea]. Disponible en: <https://observatorioelc.ister.edu.ec/wp-content/uploads/2021/04/Proyecto-observatorio-1.pdf>
- [28] «Informe-Anual-CENACE-2020-Parte-1.pdf». Accedido: 28 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://www.cenace.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2021/04/Informe-Anual-CENACE-2020-Parte-1.pdf>
- [29] «Estadistica2021.pdf». Accedido: 30 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://www.controlrecursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2022/04/Estadistica2021.pdf>
- [30] M. Noristz, «Central Hidroeléctrica Paute Molino cumple 37 años de operación continua 21-MAYO-2020», 22 de mayo de 2020. <https://www.celec.gob.ec/electroguayas/index.php/sala-de-prensa-2/noticias/208-central-hidroelectrica-paute-molino-cumple-37-anos-de-operacion-continua-21-mayo-2020> (accedido 30 de enero de 2023).
- [31] «Balance\_Energético\_Nacional\_2021-VF\_opt.pdf». Accedido: 30 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://www.recursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2022/08/Balance\\_Energe%CC%81tico\\_Nacional\\_2021-VF\\_opt.pdf](https://www.recursosyenergia.gob.ec/wp-content/uploads/2022/08/Balance_Energe%CC%81tico_Nacional_2021-VF_opt.pdf)
- [32] P. F. Díez, «TURBINAS HIDRÁULICAS», p. 149.
- [33] A. V. Robles y B. Z. Parra, *Teoría de máquinas hidráulicas*. EDITUM, 1997.
- [34] J. A. Vazquez, «jny maquinas hydraulicas», Accedido: 20 de octubre de 2021. [En línea]. Disponible en: [https://www.academia.edu/8798063/jny\\_maquinas\\_hidraulicas](https://www.academia.edu/8798063/jny_maquinas_hidraulicas)
- [35] J. Diaz Montenegro, «“RENDIMIENTO DE UNA TURBINA HIDRÁULICA PELTON”», p. 9, dic. 2020.

- [36] «13 Pelton [v6.0] copia - api\_getFile.php».  
[https://files.redsauce.net/js/pdfjs/web/viewer.html?file=https%3A%2F%2Frsml.redsauce.net%2FAppController%2Fcommands\\_RSM%2Fapi%2Fapi\\_getFile.php%3FitemID%3D124%26propertyID%3D20%26RStoken%3D59e8ac1045d03e2ff6564c0638315f38](https://files.redsauce.net/js/pdfjs/web/viewer.html?file=https%3A%2F%2Frsml.redsauce.net%2FAppController%2Fcommands_RSM%2Fapi%2Fapi_getFile.php%3FitemID%3D124%26propertyID%3D20%26RStoken%3D59e8ac1045d03e2ff6564c0638315f38) (accedido 23 de enero de 2023).
- [37] G. Betancur y J. Esteban, «Caracterización de una turbina del tipo Francis utilizada por una empresa local de generación de energía», n.º 2006, 2006.
- [38] «435248.pdf». Accedido: 23 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en:  
<https://repositorio.unican.es/xmlui/bitstream/handle/10902/22073/435248.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [39] «a105111-002(2021).pdf». Accedido: 26 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en:  
[https://wseas.com/journals/mechanics/2021/a105111-002\(2021\).pdf](https://wseas.com/journals/mechanics/2021/a105111-002(2021).pdf)
- [40] S. Morales, L. Corredor, J. Paba, y L. Pacheco, «Stages in the development of a small hydropower project: Context and implementation basic criteria Etapas de desarrollo de un proyecto de pequeñas centrales hidroeléctricas: Contexto y criterios básicos de implementación».
- [41] J. A. S. D. Rio, S. Galvis-Holguin, D. H. Zuluaga, y E. C. Arrieta, «Effect of Hydrodynamically Designed Blades on the Efficiency of a Michell-Banki Turbine», *Int. J. Renew. Energy Res. IJRER*, vol. 10, n.º 3, Art. n.º 3, sep. 2020.
- [42] «Turbina OSSBERGER® de flujo cruzado: Ossberger».  
<https://ossberger.de/es/tecnologia-hidraulica/turbina-ossbergerr-de-flujo-cruzado/>  
(accedido 5 de enero de 2023).
- [43] «Universidad Central Marta Abreu de Las Villas. Facultad de Ingeniería Mecánica. Título: Estandarización de modelos de turbinas hidráulicas - PDF Free Download».  
<https://docplayer.es/56560934-Universidad-central-marta-abreu-de-las-villas-facultad-de-ingenieria-mecanica-titulo-estandarizacion-de-modelos-de-turbinas-hidraulicas.html> (accedido 13 de julio de 2022).
- [44] A. R. Marchegiani, «TURBINA DE FLUJO TRANSVERSAL O MICHELL - BANKI», p. 25.

- [45] «moreno\_sr.pdf». Accedido: 5 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: [https://web.archive.org/web/20180504025343id\\_/http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/3619/1/moreno\\_sr.pdf](https://web.archive.org/web/20180504025343id_/http://cybertesis.uni.edu.pe/bitstream/uni/3619/1/moreno_sr.pdf)
- [46] P. Restrepo y J. Diego, «Estudio del funcionamiento y propuesta de rediseño de un prototipo de picoturbina Michell-Banki», n.º 2012, 2012.
- [47] J. alfonso Cabrera, «PROCEDIMIENTOS METODOLÓGICOS PARA EL DISEÑO ESTANDARIZADO DE TURBINAS MICHELL-BANKI.», Universidad Central «Marta Abreu» de las villas.
- [48] «CENTRAL HIDROELÉCTRICA - VAF», *calameo.com*.  
<https://www.calameo.com/read/00448443006c8f4687ebb> (accedido 18 de enero de 2023).
- [49] «IEzemara.pdf». Accedido: 18 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12773/12606/IEzemara.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [50] «García García, Alain.pdf». Accedido: 23 de enero de 2023. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.uclv.edu.cu/bitstream/handle/123456789/8486/Garc%c3%ada%20Garc%c3%ada%2c%20Alain.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [51] J. J. SANTILLAN SUIN, H. F. CHANATAXI SUNTAXI, y M. A. MONTALVAN SOLORZANO, «CENTRALES HIDROELÉCTRICAS DEL ECUADOR», INSTITUTO TECNOLÓGICO SUPERIOR RUMIÑAHU, 2018. [En línea].  
Disponible en: <https://observatorioelc.ister.edu.ec/wp-content/uploads/2021/04/Proyecto-observatorio-1.pdf>
- [52] J. D. CRESPIAN POLO, «“ANÁLISIS DE VIABILIDAD EN EL DISEÑO DE UNA MINI CENTRAL HIDROELÉCTRICA PARA REDUCIR EL COSTO DE CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN LA EMPRESA HORTIFRUT-TAL S.A.”», UNIVERSIDAD CESAR VALLEJO.

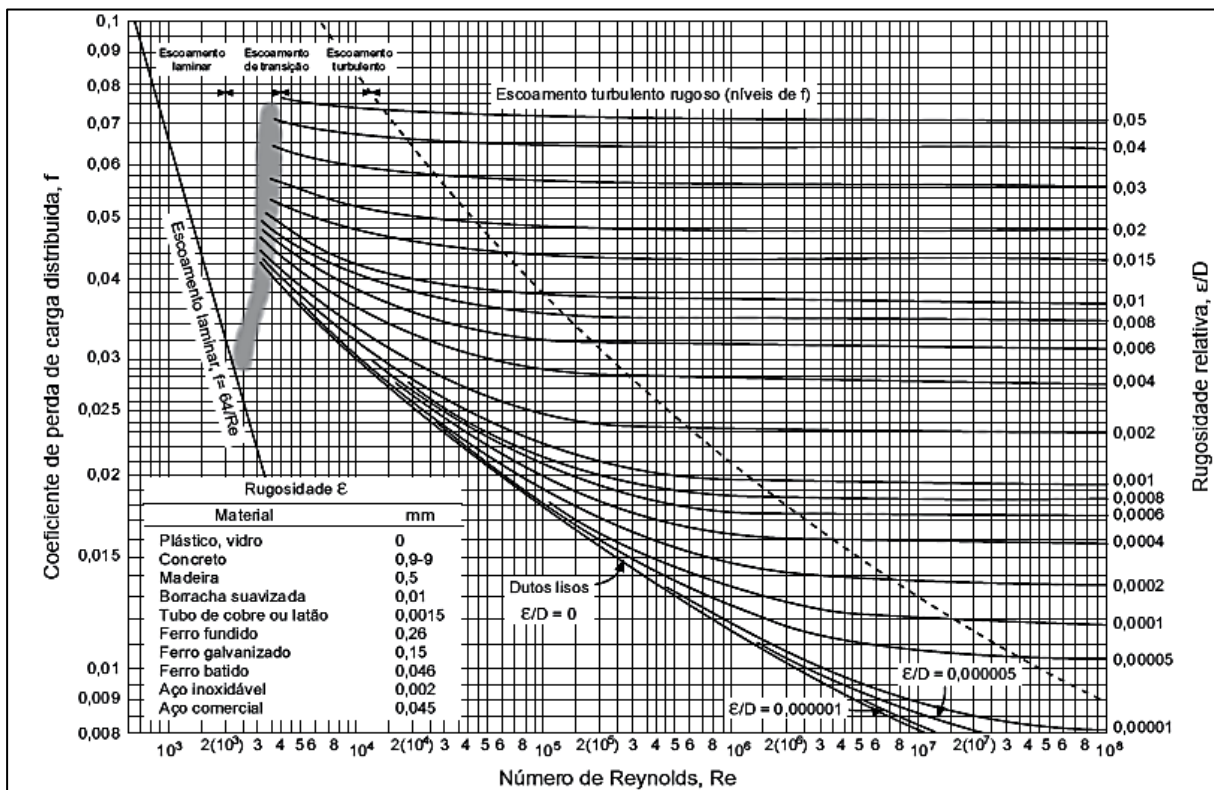


## 10 Anexos

### Anexo 1. Propiedades del agua

Unidades SI						
Temperatura (°C)	Densidad $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Viscosidad $\mu$ (N · s/m <sup>2</sup> )	Viscosidad cinemática $\nu$ (m <sup>2</sup> /s)	Tensión superficial $\sigma$ (N/m)	Presión de vapor (kPa)	Módulo de volumen B (Pa)
0	999.9	1.792 x 10 <sup>-3</sup>	1.792 x 10 <sup>-6</sup>	0.0762	0.610	204 x 10 <sup>7</sup>
5	1000.0	1.519	1.519	0.0754	0.872	206
10	999.7	1.308	1.308	0.0748	1.13	211
15	999.1	1.140	1.141	0.0741	1.60	214
20	998.2	1.005	1.007	0.0736	2.34	220
30	995.7	0.801	0.804	0.0718	4.24	223
40	992.2	0.656	0.661	0.0701	3.38	227
50	988.1	0.549	0.556	0.0682	12.3	230
60	983.2	0.469	0.477	0.0668	19.9	228
70	977.8	0.406	0.415	0.0650	31.2	225
80	971.8	0.357	0.367	0.0630	47.3	221
90	965.3	0.317	0.328	0.0612	70.1	216

### Anexo 2. Diagrama de Moody.

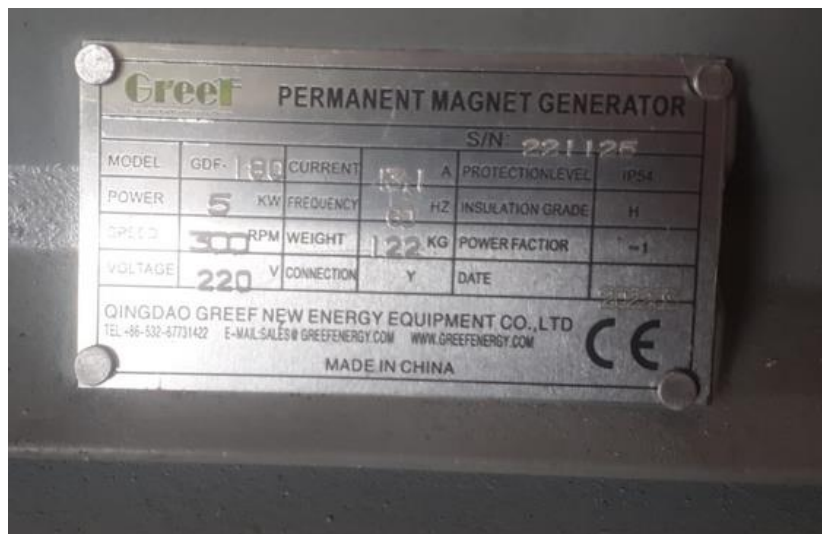


### Anexo 3. FOTOGRAFÍAS DEL SITIO DE IMPLEMENTACIÓN

Fotografías toma de datos de voltaje y la Velocidad (RPM).



Fotografía de las características del generador.



Fotografía de maquinarias utilizadas para el funcionamiento de la turbina y el generador (toma de datos).







Fotografía del alineamiento del generador.



Fotografía del embalse en el campus Lunardi de la Universidad Politécnica Salesiana del cantón Paute.

