

ANÁLISIS COMPARATIVO DE PROTOTIPOS DE PICO CENTRALES DE  
GENERACIÓN HIDRÁULICA: UN ESTUDIO DE EFICIENCIA Y SOSTENIBILIDAD.

JUAN CAMILO CARDENAS MUÑOZ

JUAN CAMILO MAZO ARENAS

INSTITUCIÓN UNIVERSITARIA PASCUAL BRAVO FACULTAD DE

INGENIERÍA

TECNOLOGÍA SISTEMAS MECATRÓNICOS

MEDELLÍN

2024

## **Agradecimientos**

Agradezco a todos aquellos que, con su gracia y apoyo incondicional hicieron posible este trabajo de grado. Cada gesto, por más pequeño que parezca, deja una huella. Además, cada obstáculo superado nos enseñó que, aunque el camino sea difícil y las cosas no salgan como esperamos al principio, el esfuerzo y la persistencia siempre rinden frutos.

Juan C. Cárdenas M.

A todos los que me han acompañado en este viaje.  
Juan C. Mazo A.

## Contenido

1.	Planteamiento del problema.....	1
1.1.	Descripción .....	1
1.2.	Formulación .....	3
2.	Antecedentes .....	4
3.	Justificación .....	11
4.	Objetivos .....	14
4.1.	Objetivo general .....	14
4.2.	Objetivos específicos .....	14
5.	Marco teórico .....	15
5.1.	Generación de electricidad .....	15
5.1.1	Fuentes convencionales o no renovables. ....	15
5.1.2	Fuentes no convencionales o renovables (FNCER).....	15
5.1.3	Cambio climático. ....	16
5.1.4	Situación en Colombia.....	17
5.2.	Centrales hidroeléctricas.....	18
5.2.1	Clasificación de las centrales hidroeléctricas.....	19
5.3	Componentes Principales de una Central Hidroeléctrica.....	25
5.3.1	Turbinas hidráulicas.....	26

6.	Resultados .....	38
6.1	Resultados y Análisis.....	38
6.2	Prototipado.....	42
6.2.1	Prototipado Del Tornillo De Arquímedes.....	42
6.2.2	Prototipado De La Turbina Turgo.....	51
6.3	Pruebas.....	58
6.3.1	Motor Generador y Elevador de Tensión.....	58
6.3.2	Pruebas a la Turbina Tipo Turgo. ....	60
6.3.3	Pruebas a la Turbina Tipo Tornillo de Arquímedes.....	63
7.	Conclusiones.....	66
8.	Referencias.....	68

## Índice de Figuras.

<i>Figura 1</i> Matriz de generación eléctrica mundial por fuente .....	1
<i>Figura 2.</i> Porcentaje De Participación En La Producción De Energía De Fuentes Renovables Vs Fuentes Convencionales .....	12
<i>Figura 3.</i> Capacidad de Generación de Energías Renovables por Región Año 2020 .....	16
<i>Figura 4.</i> Capacidad instalada en Colombia.....	18
<i>Figura 5.</i> Sistema Interconectado Nacional 2016.....	19
<i>Figura 6.</i> Centrales de Agua Fluyente.....	20
<i>Figura 7.</i> Central eléctrica de almacenamiento por bombeo.....	21
<i>Figura 8</i> Central hidroeléctrica. ....	22
<i>Figura 9.</i> Pico-hidro .....	23
<i>Figura 10.</i> Micro-central hidroeléctrica. ....	23
<i>Figura 11.</i> Mini-central Hidroeléctrica.....	24
<i>Figura 12.</i> Pequeña Central hidroeléctrica .....	24
<i>Figura 13.</i> Central Hidroeléctrica.....	25
<i>Figura 14.</i> Componentes de una central de generación hidráulica.....	26
<i>Figura 15.</i> Rango de operación de las turbinas .....	27
<i>Figura 16.</i> Alabe Turbina Turgo .....	29
<i>Figura 17.</i> Esquema Turbina Turgo. ....	29
<i>Figura 18.</i> Funcionamiento Turbina Turgo.....	30
<i>Figura 19.</i> Turbina Kaplan.....	31
<i>Figura 20.</i> Partes de una Turbina Francis. ....	32

Figura 21. Partes de una central que usa una turbina tipo tornillo.....	33
Figura 22. Turbina Pelton. ....	35
Figura 23. Alabe Turbina Pelton.....	36
Figura 24. Turbina Michell – Banki. ....	36
Figura 25. Rodete Michell-Banki .....	37
Figura 26. Corte del Tubo.....	45
Figura 27 Aplanado del tubo.....	45
Figura 28. Trazo de Circunferencia. ....	45
Figura 29. Corte de Circunferencias para las hélices.....	45
Figura 30. Marcado del Paso. ....	46
Figura 31. Pre-ensamble .....	46
Figura 32. Dobles de Hélices. ....	46
Figura 33. Armado de estructura. ....	47
Figura 34. Plano de la Estructura.....	47
Figura 35. Vista Soporte Impreso .....	48
Figura 36. Vista Ubicación Soporte.....	48
Figura 37. Soporte Canal .....	48
Figura 38. Plano Soporte Guía Eje. ....	49
Figura 39. Soporte Impreso.....	49
Figura 40. Ubicación del acople. ....	49
Figura 41. Acople.....	49
Figura 42. Plano Acople. ....	50
Figura 43. Multiplicador de Velocidad.....	50

Figura 44. Vista inicial del tamaño. ....	52
Figura 45. Plano Alabes. ....	53
Figura 46. Plano Rodete. ....	53
Figura 47. Pulido Piezas. ....	54
Figura 48. Turbina Turgo. ....	54
Figura 50. Reducción. ....	54
Figura 49 Plano Reducción. ....	54
Figura 51. Distribución de Agua. ....	55
Figura 52. Jaula para Motor. ....	55
Figura 53. Acople Motor - Turbina. ....	56
Figura 54. Jaula con Espárragos. ....	56
Figura 55. Presentación Inicial. ....	56
Figura 56. Posible Ubicación de Componentes. ....	56
Figura 57. Vista Tobera. ....	57
Figura 58. Plano Tobera. ....	57
Figura 59. Alineación de Toberas. ....	57
Figura 60. Manómetro. ....	58
Figura 61. Medidas Motor. ....	59
Figura 62. Pruebas Turgo. ....	61
Figura 63. Turbina Turgo en Funcionamiento. ....	61
Figura 64. Medición de Variables. ....	62
Figura 65. Prueba de Carga de Batería ....	63
Figura 67. Prueba y Lectura de Resultados. ....	64

Figura 66. Pruebas Tornillo Arquímedes..... 64



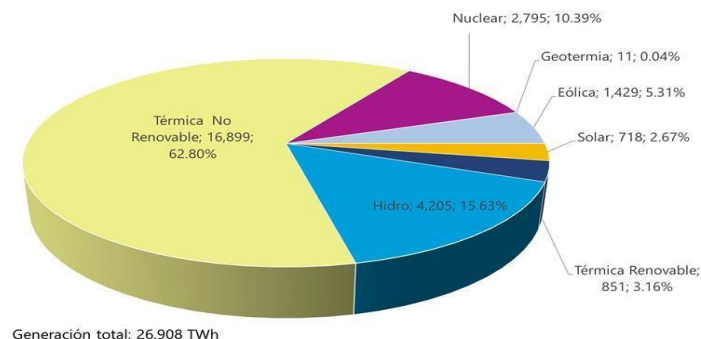
## **Índice de Tablas.**

Tabla 1. Comparación de Turbinas.....	40
Tabla 2. Características Generales Motor.....	59
Tabla 3. Estimación de Caudal y Medida de Presión Para Turbina Turgo.....	61
Tabla 4. Potencia Generada Vs. Diferentes Parámetros .....	62
Tabla 5. Estimación de Caudal para Tornillo de Arquímedes.....	64
Tabla 6. Resultados Tornillo de Arquímedes. ....	65

## 1. Planteamiento del problema

### 1.1.Descripción

Con una demanda creciente de energía eléctrica y con niveles cada vez más alarmantes de contaminación ambiental, la humanidad busca diversificar sus fuentes de energía hacia opciones más amigables con el medio ambiente. Sin embargo, como se observa en la *Figura 1*, la matriz de generación eléctrica a nivel mundial sigue estando dominada por fuentes altamente contaminantes.



*Figura 1* Matriz de generación eléctrica mundial por fuente

Fuente: (OLADE, 2020)

La *Figura 1* muestra que más del 62 % de la generación eléctrica mundial proviene de la quema de carbón o combustibles derivados del petróleo (Térmica no Renovable), responsables de más del 75 % de los gases de efecto invernadero causantes en gran medida del calentamiento global y de cerca del 90% de las emisiones totales de dióxido de carbono (ONU, 2022). En respuesta, ha tomado fuerza la llamada “Transición Energética”, definida como: “un conjunto significativo de cambios en los patrones de uso de la energía en una sociedad, afectando los recursos, los portadores, los equipos y los servicios energéticos” (O’Connor, 2010). Esta transición se caracteriza por un cambio en las fuentes de generación de energía, dando paso a

energías renovables y de esta manera reducir paulatinamente la utilización de combustibles fósiles. Es así, que la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA, por sus siglas en inglés), estima que el 90% de la electricidad mundial debe ser generada por fuentes renovables para el año 2050 (ONU, 2022).

Colombia es el cuarto país de Suramérica en cuanto a capacidad de generación hidroeléctrica, de los aproximadamente 19.000 MW de capacidad instalada con los que cuenta el país, cerca del 68% provienen de esta fuente, mientras que un 31% de generación térmica (Quema de combustibles fósiles) y solo un poco más del 1% proviene de Fuentes Renovables No Convencionales (FRNC) (Velásquez et al. 2023).

Aunque se piensa que la generación hidroeléctrica es amigable con el medio ambiente y las comunidades, se han identificado problemas sociales y ambientales relacionados con esta fuente de energía. Estos problemas incluyen el desplazamiento de comunidades en zonas inundadas para represas y daños a la flora y fauna (Cogaria, 2019)).

Como menciona Oviedo-Ocaña (2018) estos daños suelen estar relacionados con alteraciones en las condiciones hidráulicas del agua, afectando la diversidad biótica de los ecosistemas acuáticos y ribereños, lo que conlleva a una disminución de las especies y problemas de contaminación del agua debido a la reducción de la concentración de oxígeno. Además, existe un problema subyacente que implica no considerar a los pobladores de las zonas de influencia, ya que se centra únicamente en la población desplazada por el embalse y no en aquellos que residen a lo largo de las riberas del río, cuyas condiciones de vida también se ven afectadas.

A pesar del significativo potencial de generación de electricidad en Colombia y los esfuerzos dirigidos hacia el desarrollo de la energía hidroeléctrica, persiste una notable porción de la población sin acceso al suministro eléctrico. Este déficit, como señala el Banco Mundial

(2018), tiene efectos negativos en diversos indicadores de desarrollo, incluyendo educación, salud y seguridad alimentaria, entre otros. Esta falta de conexión se debe principalmente a la baja densidad poblacional, que eleva los costos de la infraestructura necesaria, a la mala o nula infraestructura de transporte y a que estas personas o poblaciones se encuentran en áreas de difícil acceso.

Teniendo en cuenta esto y que, según el Plan Energético Nacional, en Pico Centrales Hidroeléctricas, de un estimado de 25.000 MW Colombia solo aprovecha el 0.67% (Velásquez et al. 2023) es que se hace necesario explorar soluciones que posibiliten la expansión del acceso a la electricidad a personas que aún no gocen de este servicio, minimizando al máximo posible los efectos perjudiciales para el ecosistema, mejorando las condiciones de vida de las comunidades.

En este orden de ideas, surge la necesidad de realizar un estudio comparativo de prototipos de pico centrales de generación hidráulica (Pico-hydro) que permita conocer cuál sería el diseño más adecuado en cuanto a eficiencia, impacto y costo de implementación. En este desarrollo se aplicarán técnicas de fabricación digital en el proceso constructivo de los prototipos, además del uso de instrumentos de medición y equipos especializados como microcontroladores, para la recolección de datos y su posterior análisis. Desde el punto de vista científico este proyecto se efectuará bajo una metodología experimental, en el que los prototipos desarrollos serán sometidos a pruebas de funcionamiento bajo condiciones controladas.

## ***1.2. Formulación***

¿Qué ventajas y limitaciones presentan diferentes diseños de pico-hidro en cuanto a eficiencia, sostenibilidad y costo, para su implementación en zonas sin conexión eléctrica?

## 2. Antecedentes

El trabajo titulado “DISEÑO DE UNA TURBINA HIDRÁULICA BASADA EN EL TORNILLO DE ARQUÍMEDES” ((Alberto Mejia, 2011))Es un artículo publicado en el sistema bibliotecario de la Universidad del Salvador en el año 2011, Plantea el uso de mini - centrales hidroeléctricas para el aprovechamiento de la energía potencial por almacenamiento de agua en energía eléctrica, donde clasificamos estas formas de generación aprovechando la energía que proveen los recursos naturales. como el agua; en la primera parte se obtienen medidas de potencia eléctrica a diferentes saltos de altura donde está es directamente proporcional al caudal y a la altura, en la segunda parte se aprovechan caudales de agua que no disponen de un embalse, sino que aprovecha directamente el cauce del río, por otro lado, se utilizan al máximo los canales de riego donde el caudal de agua es reducido y este posiblemente tendrá un torque proporcional a la presión del agua. Mediante la información investigada en esta tesis sobre algunas turbinas, el costo y su eficiencia, se pueden tomar puntos importantes y realizar medidas con prototipos similares, pero a diferentes condiciones naturales como el caudal, presión, salto, para así poder tener una base de datos, empezar a realizar medidas y sacar ciertos resultados.

En otro documento titulado “Design of a micro-hydraulic generation system based on an Archimedes screw” (Tapia Villamarin 2022). Este es un artículo de la revista Ingenius publicado en el año 2023, describe la elaboración de un micro generador hidráulico (tornillo Arquímedes) con el fin de aprovechar y evidenciar la importancia de las energías renovables. El trabajo tenía como objetivo aprovechar la energía cinética del agua para convertirla en energía eléctrica, la principal aplicación es en áreas rurales mediante proyectos educativos, en este trabajo se recopiló

la información sobre los costos, materiales y la información sobre el caudal y la potencia que se generaba, también se recopilaron datos con los cuales podrían dar iluminación (8w con un caudal de 10 l/s). Este se realizó con fines didácticos lo que permite utilizar la información recopilada, para así poder mejorar un poco la eficiencia, realizar prácticas, donde se podría aumentar la presión del agua y el caudal, para así obtener datos particulares y saber si es un sistema eficiente.

El siguiente trabajo titulado “IMPLEMENTACIÓN DE UNA PICO CENTRAL HIDROELÉCTRICA MEDIANTE UNA TURBINA TURGO DE BAJA POTENCIA EN EL BARRIO GUADALUPE” (Tapia Villamarin, 2022), Este informe fue publicado por la dirección de posgrado de la Universidad Técnica de Cotopaxi en el año 2022. El documento recopila información sobre micro generadores cuyo objetivo es llevarlos a lugares donde las condiciones geográficas impiden el acceso del suministro eléctrico por parte de las empresas distribuidoras.

El énfasis de este informe se enfoca en generar electricidad en una vivienda ubicada en un área donde no hay acceso a la red eléctrica convencional debido a su ubicación geográfica, este proyecto se puede lograr mediante el uso de la micro generación que aprovecha los recursos hídricos, donde el informe es de mucha importancia ya que informa sobre una turbina turgo, el cual recopila la tabla de los materiales usados, donde lo principal y más importante es el uso de una tubería eficaz y adecuada, al usar el prototipo con las medidas y el aprovechamiento de los recursos naturales generaron hasta 400W de energía eléctrica utilizando el flujo de agua disponible. Este enfoque de micro generadores puede ser una solución sostenible para lugares donde no es posible acceder a una red eléctrica, donde también se demuestra el uso de recursos naturales sin necesidad de contaminar y desviar los cauces hídricos.

TADEO HURTADO, (2022), En la tesis titulada “DISEÑO DE UNA TURBINA TIPO TORNILLO DE ARQUÍMEDES EN LA COMUNIDAD DE MUQUIYAUYO”, Se centra principalmente en el diseño de una turbina llamada “tornillo de Arquímedes”, donde será aprovechada por la comunidad Muquiyauyo. Esta turbina aprovecha el agua de un pequeño salto para así convertir la energía cinética en energía eléctrica, principalmente el uso de esta energía convertida es suplir la necesidad de la comunidad mediante la aplicación en los proyectos relacionados con la agricultura y la industria. El objetivo es darle una solución a la comunidad el cual sea económica y eficaz, donde en el ámbito social sea de gran importancia ya que podrían tener uno de los recursos vitales mediante el aprovechamiento de los recursos naturales. El documento es altamente importante debido a que esta turbina sería uno de nuestros prototipos, debido a que es muy eficiente, y adecuada para aprovechar los pequeños recursos hídricos de manera sostenible, Esta turbina puede operar con un flujo de agua de  $1.41 \text{ m}^3/\text{s}$  y un salto de 2.85 m, generando una potencia de 31.537 KW, donde se podría mejorar buscando una manera más eficiente y así este permita aumentar el flujo o el salto.

Seguidamente recopilamos información del documento titulado, “DIAGNÓSTICO DE LA PERCEPCIÓN AMBIENTAL Y SOCIO-ECONÓMICA DE LAS HIDROELÉCTRICAS EN COLOMBIA”, (Cogaria, 2019). Este diagnóstico recopila el impacto de las represas hidroeléctricas en Colombia, A pesar de que estas represas son una fuente importante de energía, también tienen efectos negativos. Inundan tierras, desplazan comunidades indígenas y campesinas, afectan a la fauna y flora, y contaminan el agua. Esta investigación se centra en varias represas en diferentes departamentos del país y utilizó métodos de recopilación de datos. Las represas si suplen las necesidades de las comunidades, pero dichas represas presentaron

resultados donde existieron problemas de contaminación y salud, debido a que se propusieron planes de mitigación, incluyendo medidas ambientales, administrativas y económicas. El documento recopila información sobre los problemas ambientales y socioeconómicos, el cual informa sobre el tema, y ayudara a mitigar estos dilemas con los prototipos y así poder buscar soluciones económicas y ambientales.

Por otro lado Velásquez et al. (2023) En el artículo titulado “Gravitational water vortex hydraulic turbine implementation in Colombia: hydropower potential and prospects” la humanidad es cada vez más consciente de su gran dependencia de los combustibles fósiles para la generación de energía por ende con la contaminación ambiental es por esto que día a día se buscan formas alternativas para la generación de la energía demandada De las fuentes de energía renovables la que se podría que es más importante en Latinoamérica es la hidroeléctrica, y según estudios la capacidad instalada en los países de la región seguirá creciendo. A pesar de que Colombia está catalogado como el segundo país de América Latina con mayor capacidad hídrica, una parte importante de la población no cuenta con fluido eléctrico. En su estudio se habla sobre las Turbina hidráulica gravitacional de vórtice de agua (G WVHT) y las grandes prestaciones que tendrían este tipo de turbinas en Colombia especialmente en las zonas no interconectadas. De ahí la importancia para el trabajo pues ya que suministra información que sustenta la necesidad de pico-centrales de generación eléctrica no necesariamente conectadas al Sistema Interconectado Nacional, que minimicen el impacto ambiental generado por los combustibles fósiles y por las grandes represas.

En otro informe Soto Olmedo y Quizhpe Palacios (2018) En el trabajo titulado “Diseño de la etapa electrónica de un sistema de energía renovable basado en un pico hidro generador CC



(corriente continua) de vórtice gravitacional.”. Desarrolla dos diseños para la electrónica de potencia de un sistema de energía renovable basado en un pico hidro generador de CC (corriente continua) con vórtice gravitacional. Ambos diseños son sistemas autónomos desconectados de la red eléctrica convencional. El primer diseño incluye un convertidor Buck, un convertidor Buck-Boost, una batería, un conjunto de cargas simuladas, un bus de CC (corriente continua) y un sistema de control basado en controladores PI para la carga y descarga de la batería, manteniendo una salida de 24 VCC (voltaje de corriente continua) constante. El segundo diseño integra un convertidor Boost, un convertidor Buck-Boost, una batería, cargas simuladas, un bus de CC (corriente continua), un sistema de control con controladores PI y un inversor que convierte la corriente continua en corriente alterna, proporcionando una señal senoidal de 120 VCA (voltaje de corriente alterna) a 60 Hz en la salida. Se ha evaluado el rendimiento y funcionamiento utilizando el software Matlab/Simulink. Este informe facilita sacar la información sobre la potencia de los sistemas de energía renovable.

Recopilando información sobre el informe “Comparación del Desempeño de una Turbina Francis y una Turbina de Flujo Cruzado”, (Ortiz-Marín, 2017), El objetivo principal de este proyecto fue diseñar y desarrollar una rueda Pelton para la generación de energía eléctrica. Esto se hizo necesario debido a la falta de suministro eléctrico constante en el área, y la instalación de líneas eléctricas no era viable debido a la falta de un punto de conexión legalizado por la empresa encargada del suministro de energía. La energía generada se destinó para alimentar equipos de potabilización de agua planificados por el acueducto. Para asegurar la eficacia del sistema de generación, se realizó una simulación en un banco de pruebas y se tomaron medidas en todo el conjunto de generación. Estos pasos permitieron verificar si se estaban cumpliendo los

objetivos establecidos y ofrecer una solución a la problemática energética presente en la región. Los resultados de la simulación demostraron el funcionamiento óptimo del sistema de generación. Para el desarrollo del sistema, únicamente se contempló el diseño de la rueda Pelton, donde se basaron en las características del terreno y el recurso hídrico, Mediante este documento se observa que la rueda Pelton sería una opción debido a sus características y su forma de generación hidráulica en ciertas condiciones naturales.

Continuando con el informe “REVISIÓN DE PEQUEÑAS CENTRALES HIDROELÉCTRICAS PARA ELECTRIFICAR ZONAS NO INTERCONECTADAS DE COLOMBIA”, , La energía eléctrica impulsa el crecimiento económico y social en Colombia, pero las Zonas No Interconectadas aún carecen de un suministro económico y constante. Este proyecto busca recopilar datos actualizados de 2022 sobre estas áreas y proponer Pequeñas Centrales Hidroeléctricas (PCH) como solución. Actualmente, hay pocas PCH en las Zonas No Interconectadas debido a la dispersión geográfica y la falta de recursos de la población. La aceptación de la comunidad es esencial, por lo que se sugiere un diálogo previo a la implementación. La legislación favorece la implementación de PCH en estas zonas, y se recomienda gestionar los beneficios gubernamentales. Se debe considerar la adopción de nuevas tecnologías, como las turbinas de vórtice. Los costos varían según la topografía y se sugiere la implementación de sistemas híbridos para mayor capacidad. Se insta a realizar estudios adicionales sobre el desarrollo de PCH en Zonas No Interconectadas.

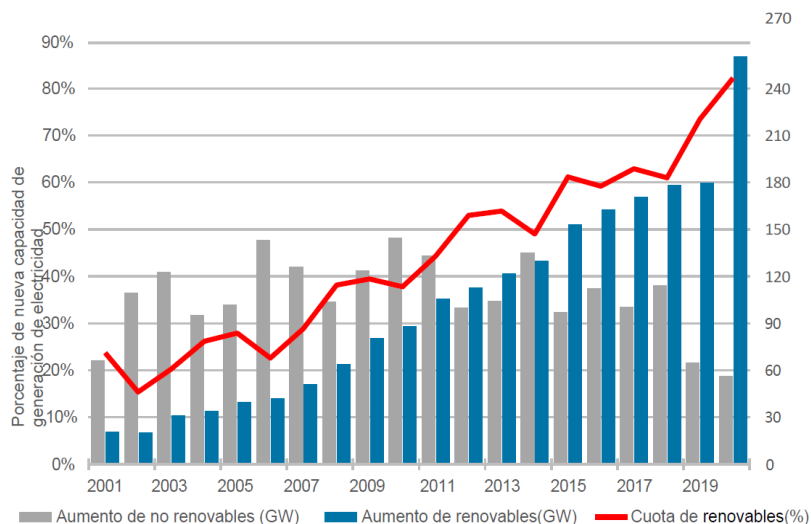
Este documento está centrado en las PCH el cual sirve para el desarrollo y la actualización de datos para los prototipos propuestos.

Finalmente, según el autor (Jiménez, Martínez, y Trespalacio 2022), En el informe titulado “Impresión en 3D de una turbina para generación de energía por el método de vórtice gravitacional”. El proyecto se centra en la creación de turbinas impresas en 3D y la adaptación de un banco de pruebas para evaluar su funcionalidad. Se utiliza la impresión 3D, un proceso de fabricación económico y versátil. Se emplea un banco de pruebas de generación de energía del semillero de investigación GITEDI para un prototipo de generación de energía mediante vórtice gravitacional, utilizando un flujo constante de agua que hace girar una turbina. Se diseñaron varios modelos de turbinas, destacándose el modelo 3 debido a su mejor desempeño. La impresora 3D flayingbearP905x y el filamento PLA se seleccionaron por su adecuación y menor impacto ambiental. El banco de pruebas se adaptó para probar los prototipos y se observó que factores como el material, las dimensiones y el peso de las turbinas afectan la generación de energía. Se incorporó una bomba centrífuga en el banco para mantener la estabilidad de la presión y el flujo de agua, demostrando la viabilidad del proyecto en la generación de energía renovable. Este Proyecto es muy importante para algunas bases en los prototipos, en el cual se deben seleccionar varios factores para no afectar la eficacia del prototipo. Estos se tienen en cuenta desde el material hasta las dimensiones y el peso.

### 3. Justificación

A nivel global los combustibles fósiles siguen siendo predominantes para el suministro de energía. Estas fuentes de energía fósil plantean graves problemas ambientales y de abastecimiento, lo que conlleva a que en algunos países la energía hidroeléctrica venga reemplazando gradualmente estas fuentes no renovables y en el caso colombiano aporta más del 60% de la energía eléctrica que se produce (Valderrama, 2023). Aunque es importante destacar, que los estudios que evalúan los impactos adversos de esta fuente de energía no solo en los ecosistemas, sino también en las comunidades locales, son escasos en el contexto nacional (Lara y Riaño, 2023). Si bien, el último informe de la Convención Marco para el Cambio Climático de la ONU (CMCC), nos muestra que en Colombia para el año 2018 el porcentaje de CO<sub>2</sub> emitido por la producción de energía eléctrica representa el 28,4 % de las 279.19 millones de toneladas de CO<sub>2</sub> emitidas este año. El sector eléctrico juega un papel fundamental para el cumplimiento de las metas de descarbonización que se puso el país, las cuales se plantean reducir en un 51% las emisiones de CO<sub>2</sub> para el año 2030 y al 2050 ser un país carbono-neutro (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

En la *Figura 2* se puede ver el aumento de la participación de las fuentes renovables en la expansión de la capacidad de generación eléctrica a nivel mundial, la cual ha pasado de menos del 10% en el año 2001 a más del 80% para el 2020. Todos estos cambios en la matriz de generación hacen parte de la llamada transición energética, la cual requiere que el crecimiento de la oferta de energías renovables sea mayor al aumento de la demanda energética, haciendo menos necesario el uso de fuentes fósiles (IRENA, 2021).



*Figura 2. Porcentaje De Participación En La Producción De Energía De Fuentes Renovables Vs Fuentes Convencionales*  
Fuente: (IRENA, 2021)

Teniendo en cuenta este objetivo, se requiere la exploración de nuevas tecnologías con el fin de aumentar la generación basada en Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCER), como la energía eólica, geotérmica, solar, la energía marina y los pequeños aprovechamientos hidroeléctricos. En esta última en particular, como lo menciona en su estudio Velásquez et al. (2023), Colombia cuenta con un gran potencial para generación de energía, pero es poco aprovechado debido a bajos caudales, pequeños saltos y falta de desarrollo en nuevas turbinas que aprovechen al máximo estas condiciones, manteniendo un equilibrio entre eficiencia, economía y sostenibilidad.

Un análisis comparativo desempeña un papel crucial en el avance tecnológico, al proporcionar una visión de la viabilidad de los prototipos estudiados y permitir la evaluación de diversas cualidades de los diseños, que incluyen eficiencia, costos, impacto ambiental y la factibilidad de construcción en ubicaciones específicas. Este enfoque es esencial, ya que, al

comprender estas características, se facilita la implementación de los prototipos más apropiados en lugares específicos según sus condiciones particulares.

Este estudio contribuye en la identificación de ventajas y limitaciones de algunos prototipos de generación hidráulica, aportando al desarrollo de tecnologías que aprovechen al máximo el potencial del que dispone el país, minimizando los impactos ambientales, al proponer la utilización de pico generadores para llevar energía eléctrica económica y ambientalmente sostenible a comunidades o personas en lugares apartados.

## **4. Objetivos**

### **4.1.Objetivo general**

Realizar un análisis comparativo de prototipos de pico-centrales desde generación hidráulica mediante un estudio de eficiencia, costo y sostenibilidad con el fin de identificar la mejor opción desde el punto de vista económico y ambiental.

### **4.2.Objetivos específicos**

- Realizar una revisión de la literatura existente sobre prototipos de pico-centrales hidroeléctricas con el fin de obtener un panorama más claro sobre las tecnologías disponibles y los avances recientes en el campo.
- Prototipar los diseños seleccionados de pico-centrales hidroeléctricas para su posterior desarrollo.
- Evaluar la eficiencia de generación de energía de cada prototipo a través de pruebas experimentales en condiciones controladas.

## **5. Marco teórico**

### **5.1. Generación de electricidad**

La generación eléctrica, es un componente esencial de la infraestructura moderna, se refiere al proceso de producir electricidad a partir de diversas fuentes de energía. Este concepto ha evolucionado a lo largo de la historia, siendo un hito clave la creación de la primera central eléctrica por Thomas Edison en 1882 en la ciudad de Nueva York, hecho que marco un punto de inflexión en la revolución tecnológica y la electrificación de comunidades.

#### ***5.1.1 Fuentes convencionales o no renovables.***

Las fuentes convencionales de energía eléctrica, son aquellas que se usan de manera cotidiana en los procesos de generación. La mayoría provienen de fuentes fósiles (carbón, petróleo, gas natural) además de la nuclear. El uso de estas fuentes además de altamente contaminantes tiene un límite, pues debido a la demanda creciente de energía el suministro de estos recursos es cada vez más escaso (Rincon, 2020).

De estas fuentes se generó más del 73 % de la energía eléctrica que se consumió a nivel mundial en el año 2020 (OLADE, 2020).

#### ***5.1.2 Fuentes no convencionales o renovables (FNCER).***

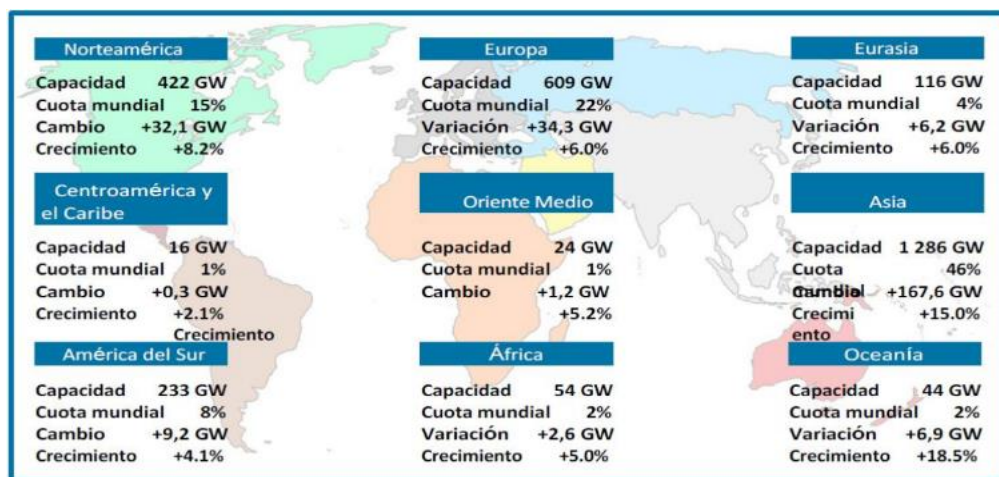
Como lo menciona Rincón (2020), las fuentes no convencionales también llamadas fuentes renovables, son aquellas que provienen de fuentes ilimitadas, como el viento, la biomasa, la geotérmica, la hídrica, la mareomotriz, entre otros. El acceso a este tipo de energías es



fundamental para la sostenibilidad ambiental, promoviendo a corto plazo sociedades inclusivas y equitativas, y a largo plazo, preservando la vida humana (Cortés, 2017).

La energía hidroeléctrica a pesar de ser la más utilizada de estas fuentes, es también un caso particular, pues, aunque es ampliamente aceptada como limpia y renovable, esta trae consigo un gran número de impactos sociales y ambientales debido a la construcción de grandes represas (Oviedo-Ocaña, 2018).

En la *Figura 3* se puede observar una tendencia al cambio de las fuentes fósiles por las FNCER.



*Figura 3.* Capacidad de Generación de Energías Renovables por Región Año 2020

Fuente: (IRENA, 2021)) Traducción libre

### 5.1.3 Cambio climático.

El cambio climático es una realidad a la que toda la humanidad se debe enfrentar, en las últimas décadas, ha habido un incremento considerable de la temperatura global, resultando en fenómenos como el deshielo de glaciares, sequías y cambios en las pautas de precipitación (Guzmán Gómez y Espinoza Freire 2022). Como dice Tigmasa Paredes (2020), el cambio climático es el resultado de la actividad humana al liberar a la atmosfera diversos tipos de gases

y contaminantes, causando deterioro del medio ambiente. Este deterioro además de los efectos adversos ya mencionados es responsable de la extinción de animales y plantas, así como la aparición de nuevas enfermedades.

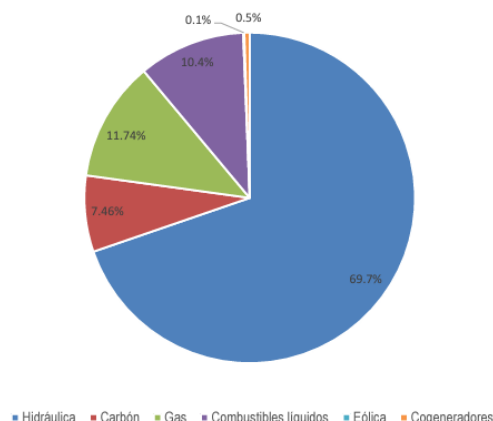
En la actualidad el mundo vira hacia las FNCER, haciendo todo lo posible por romper la dependencia de los combustibles fósiles y a la vez cumplir con los compromisos adquiridos en el protocolo de Kioto, el cual establece que los países deben reducir la liberación de gases de efecto invernadero y por consiguiente su impacto ambiental (Tiu Castro, 2023).

#### ***5.1.4 Situación en Colombia.***

La matriz de generación eléctrica actual en Colombia es una de las más ecológicas a nivel mundial. Mas del 68% de la capacidad instalada proviene de generación hídrica. En segundo lugar, las plantas de generación eléctrica que utilizan la quema de combustibles fósiles, principalmente gas, petróleo y diésel, representan un 31,37%.

Por último, las plantas de generación eólica, solar y de cogeneración tienen una participación conjunta del 1,04% (UPME, 2015), la *Figura 4* muestra la capacidad instalada en Colombia para el año 2016.

Se puede decir que en cuanto al sistema eléctrico Colombia se divide en 2 grandes zonas. Zonas conectadas al Sistema Interconectado Nacional (SIN) (*Figura 5*), que disfrutan de una conexión eléctrica estable y zonas en las que no hay acceso al fluido eléctrico o este es deficiente, denominadas Zonas No Interconectadas (ZNI), estas últimas caracterizadas por ser de poca densidad poblacional de difícil acceso o muy apartadas de los grandes centros urbanos (Muñoz Arias y Villamil Villar, 2020).



*Figura 4.* Capacidad instalada en Colombia

Fuente: UPME (2015)

Las ZNI corresponden a más del 50% del territorio del país. En estos lugares, la energía eléctrica se suministra a través de sistemas aislados que incluyen pequeñas centrales hidroeléctricas, paneles solares y, predominantemente, mediante centrales de generación diésel. Estas plantas diésel presentan grandes problemas vinculados al impacto ambiental y en la salud de las personas, además de los altos costos del combustible (Ruiz-Álvarez et al., 2017).

## 5.2. Centrales hidroeléctricas.

La energía hidroeléctrica es la más utilizada de fuentes de energía renovable a nivel global. Su producción implica la conversión de la energía potencial o cinética del agua en electricidad, según el tipo de central, mediante el uso de turbinas. Las presas y centrales hidroeléctricas se pueden encontrar en cualquier parte del mundo, abarcando desde pequeñas instalaciones destinadas a comunidades locales hasta imponentes presas que proveen energía a regiones completas (Ministerio de Minas y Energía, 2021).

Una central hidroeléctrica convencional incluye una central eléctrica para la generación de electricidad, una presa controlable para regular el flujo de agua y, por ende, la cantidad de

energía eléctrica producida, y un embalse para almacenar agua. El agua almacenada fluye desde detrás de la presa a través de una entrada, ejerciendo presión sobre las palas de una turbina, generando su movimiento. La turbina impulsa un generador, produciendo así electricidad (Rincon, 2020).



Figura 5. Sistema Interconectado Nacional 2016.

Fuente: Ovalle-Murcia, Rodríguez-Figueroa, y Escobar-Díaz (2020)

### 5.2.1 Clasificación de las centrales hidroeléctricas.

Las centrales hidroeléctricas se clasifican según varios criterios, siendo los más destacados la clasificación por configuración, que involucra el empleo de un embalse para gestionar y regular el flujo de agua, y por tamaño, que considera la capacidad de potencia instalada en la central. A continuación, se proporciona una descripción detallada de estos aspectos:

#### A) Clasificación según configuración.

- *Centrales de agua fluyente o a filo de agua:* El diseño implica la captación de una parte del agua del río en un punto específico, conduciendo el agua hasta la casa de máquinas

donde se genera la energía y luego devolverla al río aguas abajo. Una deficiencia en este tipo de configuración consiste en que estas centrales no cuentan con un reservorio de agua (presa), lo que implica que durante temporada de lluvias se pueda obtener máxima potencia y en temporada seca la potencia generada depende del caudal disponible (Ortiz-Marin, 2017).

La *Figura 6* muestra la disposición de los elementos en una central de este tipo. Como se observa solo una parte del agua del río es utilizada para la generación



*Figura 6.* Centrales de Agua Fluyente.

Fuente: Guzmán Arévalo (2019)

- **Centrales de almacenamiento:** Este sistema se compone de dos embalses ubicados a distinta altura, el cual se distribuye uno aguas arriba y otras aguas abajo (*Figura 7*). Si se presenta un excedente de electricidad en la red de distribución, se utilizan bombas eléctricas para bombear agua desde el depósito inferior de la estación a lugares más altos. Durante los periodos donde se presenta una máxima demanda, el agua del embalse superior regresa al embalse inferior a través de las turbinas presentes en la central eléctrica, Por lo tanto, esta

energía finalmente se almacena como energía potencial mecánica (MediaHouse GmbH, 2021).

- **Centrales de embalse** (Figura 8): Se coloca una presa sobre el curso del río, que retiene artificialmente una gran cantidad de agua para formar un embalse. Esto hace que el agua produzca energía potencial, que luego se convierte en electricidad. Para ello, se instala una válvula aguas arriba de la presa, que puede controlar la entrada de agua al túnel de presión. Frente a la tubería de presión que lleva agua a la turbina en la sala de máquinas de la planta. El agua a presión en el inyector transforma su energía potencial en energía cinética (es decir, pierde su fuerza y aumenta su velocidad). El agua que entra en la sala de máquinas actúa sobre las palas de la hidro-turbina y transforma su energía cinética en energía mecánica de rotación. El eje de la turbina está conectado al eje del generador y, cuando el generador gira, la energía rotacional se convierte en corriente alterna de voltaje medio. Una vez que el agua ha liberado su energía, regresa al río a través de canales de drenaje aguas abajo (Central hidroeléctrica, s. f.).

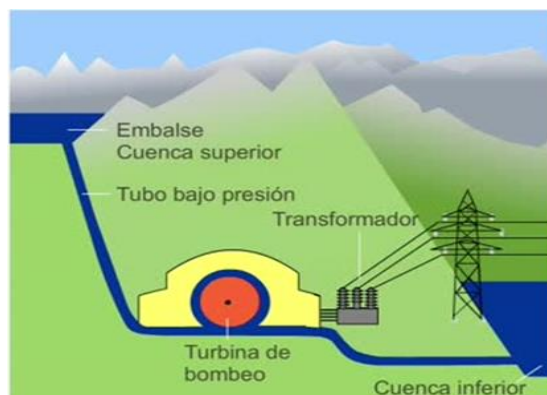


Figura 7. Central eléctrica de almacenamiento por bombeo.

Fuente: MediaHouse GmbH (2021)

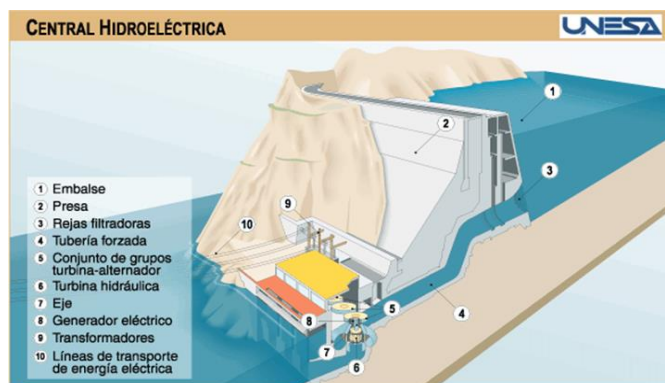


Figura 8 Central hidroeléctrica.

Fuente: Borja et al. (2015)

**B) Clasificación según tamaño:** En función de su capacidad, se pueden clasificar las hidroeléctricas en micro centrales, mini - centrales, pequeñas centrales hidroeléctricas (Pch) y centrales hidroeléctricas (Ch), debido a que no existe ningún criterio único de clasificación cada valor varía según las necesidades y el país. A continuación, se presenta una descripción detallada de estos aspectos:

- **Pico Centrales (Figura 9):** tienen una capacidad de producir entre 0,5 y 5 kW, estas son normalmente utilizadas a filo de agua el cual el cauce del agua vuelve a su afluente. (Vivas Rodríguez, 2020)
- **Micro-centrales (Figura 10):** Es una instalación de generación de electricidad a pequeña escala que aprovecha la energía de pequeños flujos de agua. Estas instalaciones son más pequeñas que las centrales hidroeléctricas tradicionales y generalmente están diseñadas para generar cantidades entre de 5 y 50 kW, su operación a filo de agua, es aplicable en zonas no interconectadas (ZNI) (Vivas Rodríguez, 2020).



Figura 9. Pico-hidro

Fuente: Pico-Hydro. Hidroeléctrica casera para generar electricidad (2022)

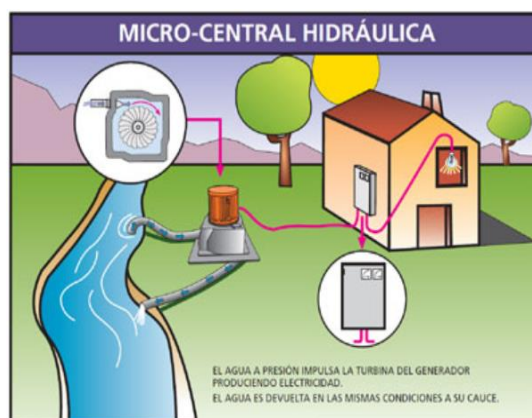


Figura 10. Micro-central hidroeléctrica.

Fuente: Lorenzo Escuín (2011)

- **Mini-centrales** (Figura 11): También llamadas “mini hidro”, es un tipo generación de energía eléctrica a partir de pequeños saltos de agua el cual están diseñadas para producir una capacidad instalada de 50 y 500 kW, la cual por su forma es aplicable en las “ZNI” (Ingfocol Ltda, 2015).



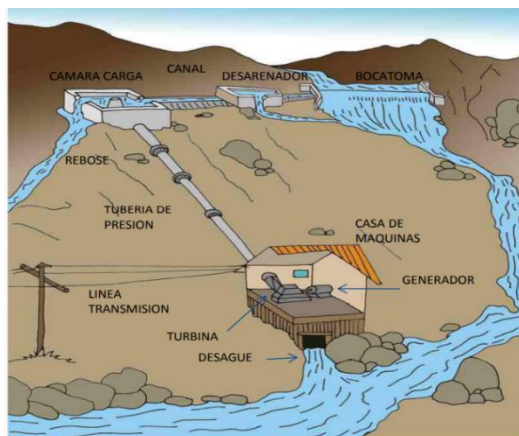


Figura 11. Mini-central Hidroeléctrica.

Fuente: Minicentrales Hidroeléctricas Comunitarias (2012)

- **Pequeña Central hidroeléctrica (PCH)** (Figura 12): El agua contenida en embalses y almacenada en presas pasa a través de tuberías de alta presión donde alcanza gran velocidad hasta las turbinas, donde luego se convierte en energía eléctrica, tiene una capacidad instalada entre 500 y 20.000 kW, el cual opera a filo de agua y es aplicable en cualquier zona ya sea conectada o interconectada (Ingfocol Ltda, 2015).

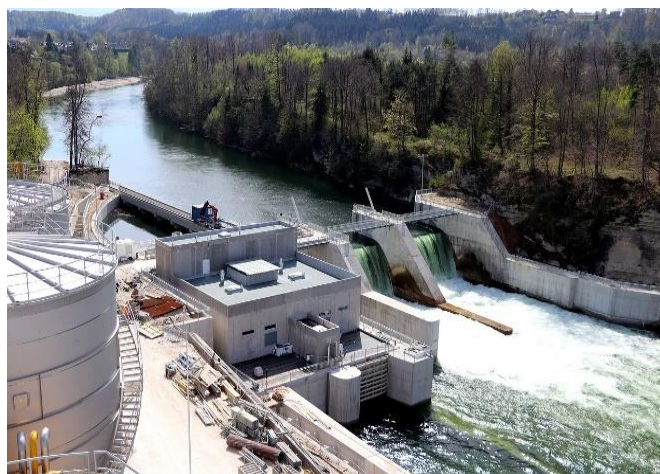


Figura 12. Pequeña Central hidroeléctrica

Fuente: Ingeoexpert (2018).

- **Hidroeléctricas** (*Figura 13*): se construyen en los lechos de los ríos para formar embalses para el almacenamiento de agua. Esta construcción implica la edificación de un robusto muro construido con piedra, hormigón u otros materiales, generalmente apoyado sobre una elevación del terreno. Grandes cantidades de agua son canalizadas mediante tuberías hacia la turbina, ubicadas típicamente en la base de la represa, las cuales están conectadas a un generador. el cual generalmente tiene una capacidad instalada mayor de 20 M (*¿Qué es una central hidroeléctrica?*, 2018).



*Figura 13.* Central Hidroeléctrica.

Fuente: *¿Qué es una central hidroeléctrica?* (2018)

### **5.3 Componentes Principales de una Central Hidroeléctrica**

En la *Figura 14* se puede ver un esquema general de la configuración de una central de generación hidráulica, la cual dependiendo de su tamaño requerirá de construcciones de mayor o menor resistencia y dimensión.

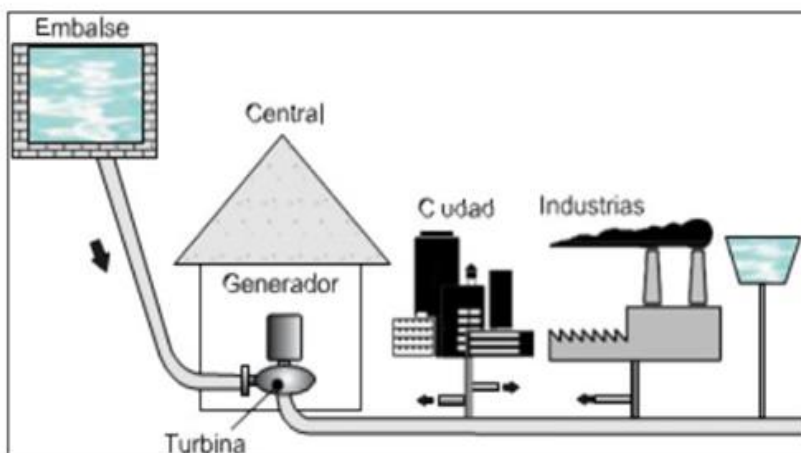


Figura 14. Componentes de una central de generación hidráulica.

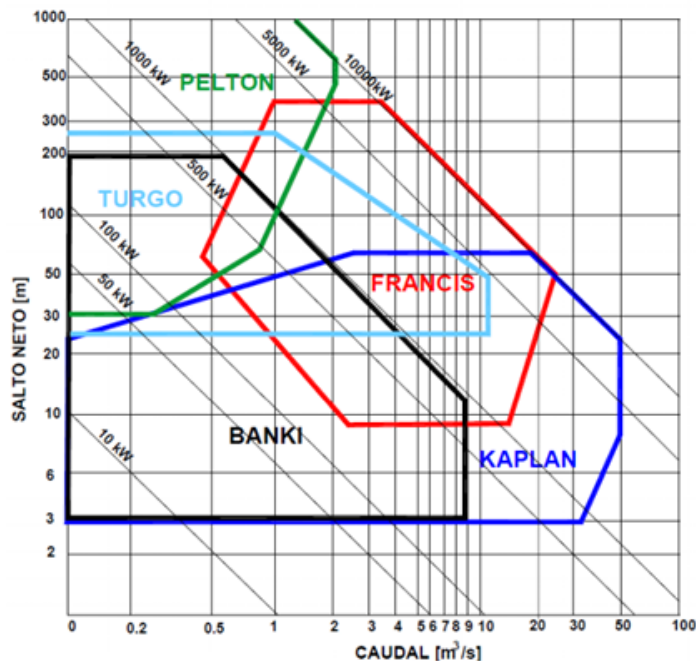
Fuente: Morales Rosero (2020)

Esta consta generalmente de un embalse o canal de captación, el cual es el lugar de donde se toma el agua, una tubería o canal de desviación por la que se lleva el agua a la casa de máquinas donde estarán ubicados los componentes de control además del generador al cual está conectado la turbina.

### 5.3.1 Turbinas hidráulicas.

Dentro de los componentes que conforman la central hidroeléctrica se destaca la turbina como uno de los componentes principales, pues es esta la que transforma la energía cinética y/o potencial del agua en un movimiento rotacional que impulsa el generador eléctrico. Existen múltiples diseños de turbinas hidráulicas, cada una con características específicas a tener en cuenta al momento de escoger alguna para una aplicación en específico. Siendo los factores más relevantes el caudal y la altura de la caída de agua disponibles (Tapia Villamarin, 2022).

En la *Figura 15* se puede observar los rangos (Caudal vs salto de agua) en los que pueden operar las diferentes turbinas.



*Figura 15.* Rango de operación de las turbinas

Fuente: Morales Rosero (2020)

Las turbinas se clasifican en dos grupos:

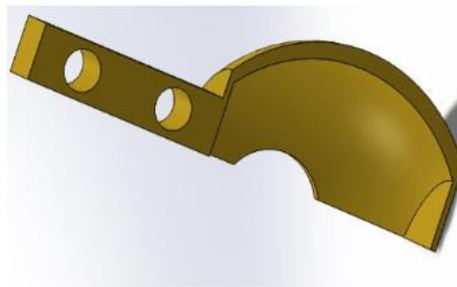
- A) De Acción.
- B) De Reacción.

A) **Turbinas de Acción:** También llamadas de impulso son aquellas que utilizan solo la velocidad del agua para girar, el fluido permanece siempre a presión constante. Las turbinas de este tipo son la Pelton, Turgo y la Michell-Banki.

**B) Turbinas de Reacción:** En estas turbinas el fluido experimenta un cambio de presión, pues se utiliza la presión remanente del agua al ingresar para transformarla en energía cinética, disminuyendo la presión del agua al salir del rotor. Los álabes del rotor tienen una forma perfilada, lo que origina variaciones de presión que generan fuerzas ascendentes, similar al principio de funcionamiento de las alas de los aviones, causando así la rotación de los álabes, dentro de estas están la Francis y la Kaplan (Tapia Villamarin, 2022).

**5.3.1.1 Turbina Turgo.** Esta es una turbomáquina motora de acción, de flujo radial y de chorro libre. El diseño del rodete es similar a la mitad de un rodete Pelton (*Figura 16*). Esta turbina presenta diversas ventajas en aplicaciones específicas en comparación con las turbinas Francis y Pelton.

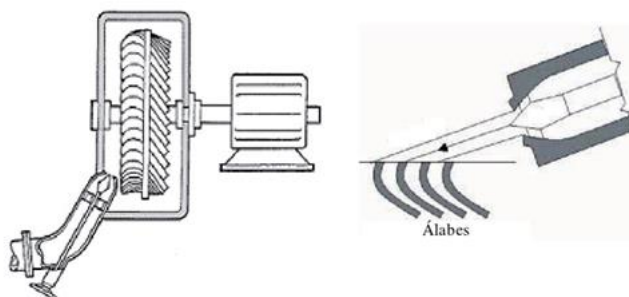
A diferencia de las turbinas Pelton, el diseño de la Turgo permite que el chorro de agua incida sobre varios alabes o cucharas al mismo tiempo (*Figura 17*). Debido a que no hay interferencia entre la entrada y la salida del chorro de agua. Además de esto, en comparación con las turbinas Pelton del mismo diámetro de rodete, la turbina Turgo puede admitir un caudal cercano al doble de una turbina Pelton. Por consiguiente, la potencia en el eje también se aproxima al doble. Esto ha impulsado la adopción de las turbinas Turgo en micro-centrales hidroeléctricas. Al tener un diámetro reducido, su velocidad angular es mayor para una velocidad periférica igual, lo que permite su conexión directa al generador, lo que elimina la necesidad de un multiplicador de velocidad. Reduciendo así los costos y aumentando la facilidad de instalación, a la vez de disminuir posibilidades de fallo. Aunque el rendimiento de las turbinas Turgo es ligeramente inferior al de las turbinas Pelton, se ha demostrado que la eficiencia de la turbina Turgo es menos susceptible a cambios en el caudal (Hauser Vavra, 2011).



*Figura 16.* Alabe Turbina Turgo

Fuente: (Palomino-Resendiz et al. 2022)

La generación de energía cinética en la turbina Turgo ocurre en la tobera o boquilla colocada al final de una tubería, en la cual se puede ajustar el caudal mediante una aguja de cierre. La tobera junto con la aguja de cierre actúa como mecanismo de alimentación y regulación de la turbina. Dado que la energía cinética del chorro de agua es inversamente proporcional a la distancia al orificio de salida, se recomienda ubicar los inyectores lo más cerca posible del rodete para una eficiencia óptima (Tapia Villamarin, 2022).



*Figura 17.* Esquema Turbina Turgo.

Fuente: Morales Rosero, (2020)

Las turbinas Turgo se emplean en saltos que oscilan entre 10 y 250 metros, con caudales que van desde 0.2 hasta 10 m<sup>3</sup>/s, y se utilizan principalmente en grupos de menos de 100 kW. Dada la inclinación con que el chorro de agua que sale de la tobera golpea el alabe, estas turbinas

experimentan un empuje axial y pueden manejar un mayor caudal, ya que el agua entra por un borde y sale por el opuesto (*Figura 18*). Una ventaja destacada es que las partes de estas turbinas son fácilmente accesibles y tienen una alta resistencia a la erosión (Cuasqui Tambi, 2023).



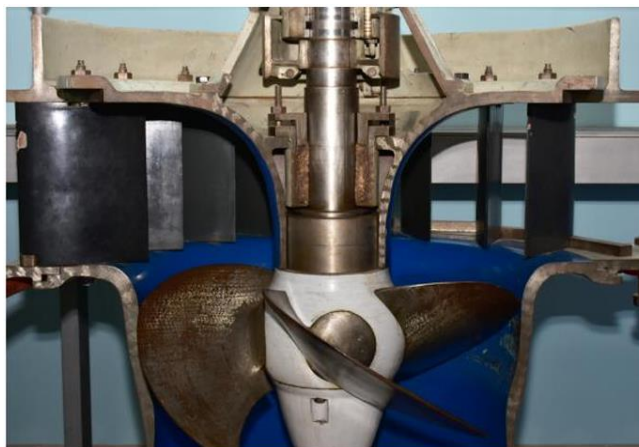
*Figura 18.* Funcionamiento Turbina Turgo.

Fuente: (Irazusta, 2018)

**5.3.1.2 Turbina Kaplan.** Las turbinas Kaplan son máquinas que funcionan mediante el principio de reacción, con un flujo que es completamente axial. Su diseño incluye una hélice que opera de manera análoga a la hélice de un barco. Mientras que los álabes de la turbina permanecen estáticos, los del distribuidor pueden ser fijos o móviles, lo que permite ajustar la carga. El rodete adopta una configuración de hélice y se impulsa mediante el agua a presión liberada por una compuerta. Una verdadera turbina Kaplan de admisión axial se lograría si tanto los álabes de la turbina como los del distribuidor fueran móviles. En cambio, si solo los álabes del distribuidor fueran regulables, la turbina resultante sería una semi-Kaplan de admisión radial o axial (Sabio Hidalgo, 2023).

Esta turbina fue creada en 1913 por el austriaco Viktor Kaplan, puede operar con eficiencias de hasta el 90% en una amplia gama de caudales. Debido a esto algunas de estas

turbinas se diseñan con doble regulación, incorporando álabes móviles tanto en el rodete como en el distribuidor. Estas turbinas son típicamente empleadas en saltos de agua pequeños, máximo de alrededor de 80 metros (Combarro Marina, 2022)



*Figura 19.* Turbina Kaplan

Fuente: (Combarro Marina, 2022)

**5.3.1.3 Turbina Francis.** Las turbinas Francis se componen de una cámara espiral que distribuye el agua por todo el rodete, asegurando una admisión eficiente del agua con dimensiones compactas y un alto rendimiento. Estas cámaras espirales pueden fabricarse en una sola pieza o en varias.

Estas se emplean en saltos de hasta 200 metros y caudales que oscilan entre 2 y 200 m<sup>3</sup>/s. Después de pasar a través de la cámara espiral, el flujo de agua llega al pre-distribuidor o estator de la turbina, que transmite las cargas a las partes fijas y móviles, así como al empuje axial sobre el rodete. Su función principal consiste en brindar soporte a la turbina (Cuasqui Tambi, 2023).



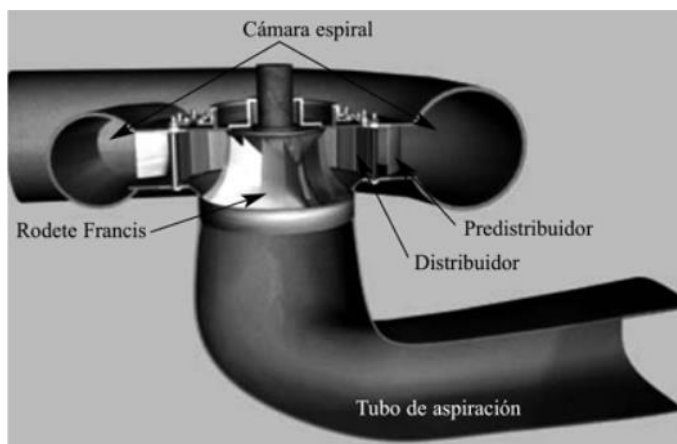


Figura 20. Partes de una Turbina Francis.

Fuente: (Cuasqui Tambi 2023)

**5.3.1.4 Turbina tipo Tornillo de Arquímedes.** La turbina de Arquímedes consta de un mecanismo gravimétrico el cual posee una superficie equipada con hélices en espiral que a su vez un cilindro las envuelve, el eje de esta máquina está inclinado de manera que su extremo inferior este sumergido en el agua. Este está formado por una serie de celdas donde dependiendo la posición del tornillo permite el ascenso o descenso del agua (Santa Cruz Herrera, 2018).

*Principio de funcionamiento.*

Este sistema genera energía mecánica mediante el peso ejercido por el agua. Esta ingresa en los espacios del tornillo el cual funcionan como compartimientos móviles que se desplazan hacia la parte inferior debido a la acción de su peso, Simultáneamente la configuración helicoidal de la hélice permite la rotación del tornillo. De esta manera es posible la transformación de la energía potencial del agua en un movimiento rotacional (energía mecánica). Acoplado un generador al eje del tornillo dicha transformación permite obtener energía eléctrica (FAREZ BENALCAZAR 2023).

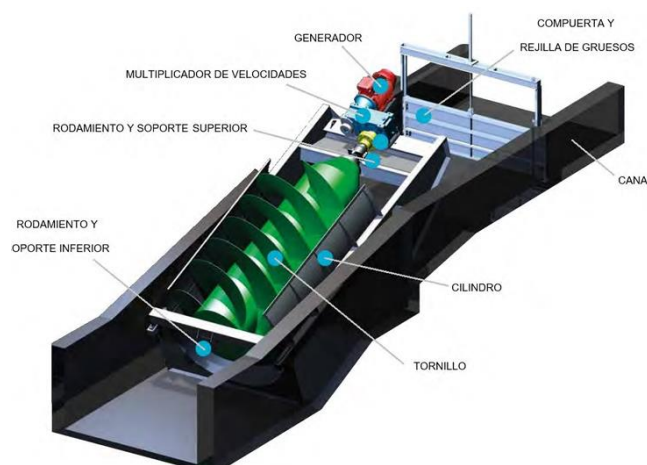


Figura 21. Partes de una central que usa una turbina tipo tornillo.

Fuente: (TADEO HURTADO, 2022)

### *Componentes de la turbina Tipo Tornillo de Arquímedes.*

- A) **Tornillo:** Desempeña un papel fundamental en la conversión de la energía hidráulica en energía mecánica que puede ser utilizada para realizar un trabajo útil, como generar electricidad o bombear agua.
- B) **Caja de cambios O eje de transmisión:** Este sistema incorpora un conjunto de engranajes, diseñado con el propósito de incrementar las revoluciones del eje. Esto resulta esencial debido a que el tornillo opera a velocidades relativamente bajas, generalmente. La elevación de estas revoluciones facilita la conexión con un generador, operando a velocidades medias. Este diseño asegura la transmisión eficiente de la energía mecánica producida por el tornillo de, optimizando así el rendimiento del sistema en su conjunto.
- C) **Generador:** La función principal del generador es transformar el movimiento mecánico rotativo producido por la turbina en energía eléctrica.
- D) **Acoplamiento:** Es un elemento esencial que permite la conexión mecánica entre la turbina y el generador. Su tarea principal consiste en transferir el movimiento rotativo originado por la turbina al rotor del generador, facilitando de esta manera la transformación eficiente de energía mecánica en energía eléctrica.

*E) Canal:* Se refiere al conducto o pasaje a través del cual fluye el fluido que impulsa la turbina.

La función del canal es guiar y dirigir el flujo de fluido, como agua o vapor, hacia las palas de la turbina de manera controlada.

*F) Rodamiento superior:* Componente encargado de rotar el eje del tornillo y colabora con el rodamiento inferior para resistir las cargas provenientes de la acción del agua y la gravedad en el tornillo. Su diseño axial se adapta a las fuerzas inclinadas debido a la posición del tornillo, manteniendo así su eficacia sin entrar en contacto directo con el agua.

*G) Rodamiento inferior:* Una parte del sistema asume la responsabilidad de amortiguar tanto las fuerzas radiales como axiales producidas por el tornillo. Por consiguiente, se requiere que este componente sea un rodamiento de contacto angular. Es fundamental que este rodamiento, al igual que su contraparte superior, cuente con una protección adecuada para prevenir la entrada de agua hacia el sistema de lubricación.

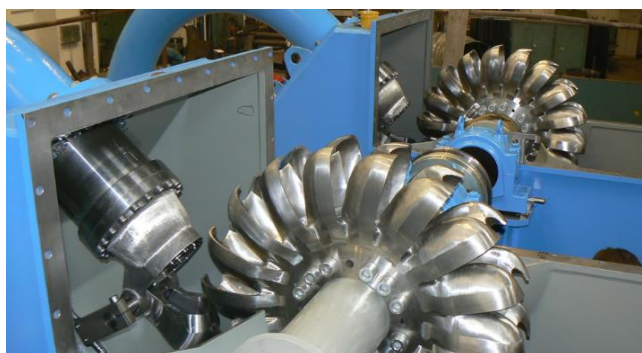
*H) Compuerta:* Su función principal es gestionar el flujo de agua que atraviesa la turbina. Estas compuertas desempeñan un papel crucial en plantas hidroeléctricas, aprovechando la energía del agua para la generación de electricidad. Al abrir y cerrar las compuertas, se logra controlar la cantidad de agua dirigida hacia la turbina, lo que, a su vez, regula tanto la velocidad como la cantidad de energía transferida a la unidad generadora eléctrica.

*I) Canal de derivación:* Cumple la función de redirigir una porción del flujo de agua que, de otro modo, seguiría su curso a través de la turbina. Esta desviación se emplea para regular la cantidad de agua que accede a la turbina, ajustando así la potencia generada. El canal de desvío agrega versatilidad operativa al posibilitar que parte del agua circule directamente sin pasar por la turbina.

J) **Puerta de vertedero:** Tiene la función de regular el flujo de agua que pasa a través de la turbina. Su posición se ajusta para controlar la cantidad de agua que ingresa a la turbina, lo que a su vez afecta la velocidad y la cantidad de energía cinética disponible para la generación de electricidad. (Pérez Cano et al., 2021).

**5.3.1.5 Turbina Pelton (Figura 22).** Esta es una turbina de acción, distinguida por su diseño de flujo tangencial y entrada parcial. El cual se caracteriza por su capacidad de aprovechar eficientemente altas elevaciones y caudales moderados (Rojas, 2021).

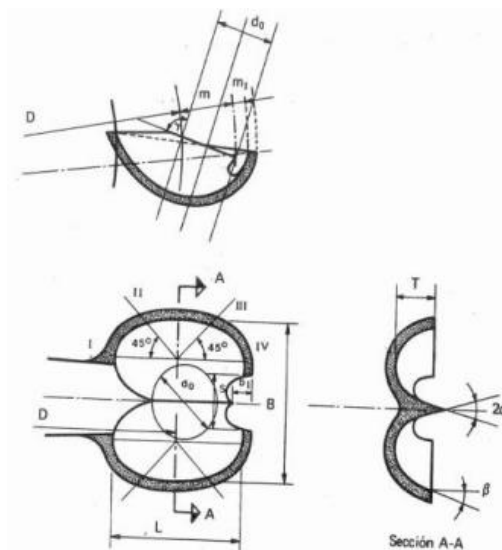
Esta se compone de un rotor equipado con aletas diseñadas para recibir el agua, y cuenta con uno o más inyectores. Cuando los chorros de agua provenientes de los inyectores impactan contra las aletas del rotor, se genera el torque mecánico que se transmite al eje de la turbina. Para gestionar el flujo de agua en los inyectores, se incorpora una válvula tipo aguja en su interior, también conocida simplemente como aguja, que modifica el área de la sección por la cual el agua fluye a través del inyector antes de llegar a la turbina.



*Figura 22.* Turbina Pelton.

Fuente: Recuperado de [https://media.licdn.com/dms/image/C4D12AQH85n8yfQmbGg/article-cover\\_image-shrink\\_720\\_1280/0/1531316742291?e=2147483647&v=beta&t=50wzYP-FPINitKkF0kGeeVAzMuzGShDTzHx9czM8JQs](https://media.licdn.com/dms/image/C4D12AQH85n8yfQmbGg/article-cover_image-shrink_720_1280/0/1531316742291?e=2147483647&v=beta&t=50wzYP-FPINitKkF0kGeeVAzMuzGShDTzHx9czM8JQs)

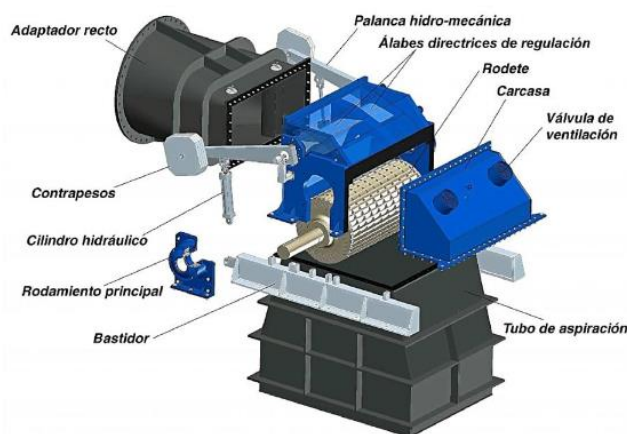
La *Figura 23* Figura 22 ilustra la forma de los alabes o cucharas de una turbina Pelton.



*Figura 23.* Alabe Turbina Pelton.

Fuente: Petrazzini (2018)

**5.3.1.6 Turbina Michell – Banki** (*Figura 24*): También conocida como turbina de flujo cruzado, es un tipo de turbina que opera mediante la acción de flujo transversal y admisión parcial. Es especialmente diseñada para aprovechar caudales que oscilan entre 0.2 y menos de 10 metros cúbicos por segundo, con saltos hidráulicos que varían entre 5 y 150 metros.

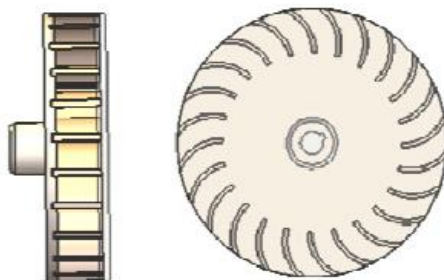


*Figura 24.* Turbina Michell – Banki.

Fuente: Romero, Velásquez, y Chica (2020)

*Esta turbina consta de dos elementos principales:*

- *Rodete* (Figura 25): es una parte crucial del diseño de la turbina. Consiste en una serie de discos paralelos entre los cuales se montan álabes longitudinales con perfil circular. Este componente es fundamental para la conversión de la energía hidráulica en energía mecánica, ya que es el encargado de recibir el flujo de agua y transmitir su energía cinética al eje de la turbina, generando así movimiento rotativo.
- *Inyector*: Se trata de un dispositivo que canaliza el flujo de agua hacia la parte central del mecanismo mediante una entrada de sección parcial, la cual está equipada con una cantidad específica de aletas (la primera etapa), y luego guía el agua con un ángulo preciso de entrada. En las turbinas de máxima eficiencia, este diseño también incluye un elemento adicional para dirigir el flujo (Egúsquiza Goñi y Sánchez Camones, 2009).



*Figura 25. Rodete Michell-Banki*

Fuente: (Ordóñez Ortiz, 2010)

## 6. Resultados

En el proceso de selección de los diseños a prototipar, resulta fundamental contar con criterios bien definidos que faciliten la elección entre las diversas opciones de turbinas disponibles. En la *Tabla 1*, se examinarán algunos aspectos claves para decidir cuáles turbinas son las más adecuadas para su construcción, teniendo en cuenta la finalidad de los prototipos y la población objetivo, personas o comunidades de bajos recursos y/o de zonas apartadas y difícil acceso. Se analizarán 3 aspectos, los cuales son: facilidad de construcción, complejidad en su mantenimiento y costo de materiales. Finalmente, se elegirán los dos diseños de pico-hidro que obtengan los mejores resultados.

### 6.1 Resultados y Análisis.

A continuación, se explican los criterios y su forma de evaluación:

• **Facilidad de construcción:** Este aspecto se refiere a la simplicidad requerida al momento de armar o instalar la pico-hidro. Cuando se evalúa este aspecto, se verifica la claridad de las instrucciones y si se requieren herramientas especiales o conocimientos técnicos, priorizando las turbinas que puedan ser montadas con rapidez y sin dificultades. Además, se considera si personas con mínimas habilidades técnicas pueden realizar el montaje, lo que sugiere que la pico-hidro es fácil de utilizar y se ajusta a las necesidades de los usuarios. Este aspecto tendrá 3 niveles de evaluación los cuales son los siguientes:

**Nivel bajo (1 a 3):** La pico-hidro es difícil de montar.

**Nivel medio (4 a 6):** La pico-hidro presenta cierta facilidad de montaje, pero pueden surgir algunas complicaciones menores.

**Nivel alto (7 a 10):** Este nivel indicaría que la pico-hidro es muy fácil de montar.

•**Dificultad de Mantenimiento:** Dependiendo del tipo de turbinas hidráulicas utilizadas en las pico-hidro, varía el nivel de habilidades técnicas y herramientas especializadas necesarias para realizar el mantenimiento. Algunas turbinas requieren un mantenimiento más complejo que otras, mientras que algunas son más simples y no necesitan conocimientos avanzados ni herramientas especializadas. Los niveles de evaluación son:

**Nivel bajo (1 a 3):** Su mantenimiento necesita de conocimientos técnicos, requiere desmontar múltiples partes o utilizar herramientas especiales.

**Nivel medio (4 a 6):** Su mantenimiento es sencillo, pero requiere herramientas especiales o desmonte de múltiples piezas

**Nivel alto (7 a 10):** Su mantenimiento es sencillo y directo, no requiere desmonte y las herramientas son de uso común.

•**Costo de los materiales:** Se evalúa el precio de los materiales, no solo en el momento de construcción de la pico-hidro sino también en el momento de ejecución, el cual a largo plazo necesitara mantenimiento. Este aspecto tendrá los siguientes niveles de evaluación:

**Nivel bajo (1 a 3):** Los materiales requeridos son de alto costo y/o son escasos en el mercado.

**Nivel medio (4 a 6):** Son elementos costosos, pero tienen una buena oferta en el mercado.

**Nivel alto (7 a 10):** Materia prima fácil de adquirir y con buena oferta en el mercado.



Tabla 1. Comparación de Turbinas.

TURBINA	FACILIDAD DE CONSTRUCCION	DIFICULTAD DE MANTENIMIENTO	COSTO DE MATERIALES	TOTAL	
TURGO	8	7	8	23	1 a 3
MICHELL-BANKI	1	3	1	5	4 a 6
KAPLAN	1	1	1	3	7 a 10
FRANCIS	1	1	2	4	
TORNILLO DE ARQUIMEDES	7	8	7	22	x > 20
PELTON	6	7	5	18	x > 20

Fuente: Elaboración Propia.

A continuación, se procede a explicar los resultados obtenidos en la *Tabla 1*. Por cada uno de los tipos de turbina:

**Turgo:** Aunque el diseño de los alabes es un poco complicado por su geometría, debido a que pequeñas alteraciones en su forma pueden afectar la eficiencia, las nuevas técnicas de fabricación mediante impresión 3D facilitan el proceso de construcción, el mantenimiento es relativamente sencillo y los materiales son económicos y de fácil obtención.

**Michell-Banki:** Esta turbina es de fácil construcción, el mantenimiento es de nivel medio al requerir desarmado de piezas como el desmonte de la carcasa para tener acceso a la turbina, aparte de esto el mantenimiento es sencillo pues la misma turbina en su funcionamiento normal saca todos los elementos que la puedan bloquear, y al contar con carcasa se aísla del agua gran parte de las piezas. el costo de los materiales es bajo, pudiéndose incluso imprimir en 3D o utilizar secciones de tubos PVC.

**Kaplan – Francis:** Estas dos turbinas al ser de reacción presentan grandes dificultades a la hora de la construcción. El diseño del rodete y de sus alabes requiere construcción

especializada, además de necesitar cámaras cerradas para presurizar el fluido ya que este debe ingresar con una presión superior a la ambiental, en cuanto al mantenimiento este se dificulta al tener que desmontar estas cámaras, para poder acceder a las turbinas. En el criterio de costos, si bien los materiales necesarios para su construcción son de fácil acceso, estos se elevan pues se requiere una manufactura especializada.

**Tornillo de Arquímedes:** La construcción de esta turbina se puede hacer en impresión 3D o reutilizando materiales, los cuales en su mayoría se encuentran fácilmente, no requiere manufactura avanzada ni herramientas especializadas. Su mantenimiento es sencillo debido a la poca cantidad de partes. El costo de los materiales es bajo pues es posible fabricarla solo con tubos PVC reutilizados.

**Pelton:** Su construcción es un poco complicada debido a la forma de sus alabes, los cuales se asemejan a dos alabes de la turbina turgo unidos, lo que aumenta los problemas de fabricación, pues al igual que en la turgo las alteraciones en su geometría por mínimas que sean pueden afectar su eficiencia. La forma más común de construcción de estas turbinas es la fundición y si bien es posible fabricarlos mediante impresión 3D el post-procesado (pulido de imperfecciones luego de la impresión) se torna un poco complejo, ya que se requieren características muy precisas para garantizar su correcto funcionamiento. El mantenimiento es sencillo y los materiales son de bajo costo y fácil consecución.

Al evaluar estos resultados, se determina que los modelos a prototipar serán el Tornillo de Arquímedes y la turbina tipo Turgo. Estos modelos se destacan por su accesibilidad en cuanto a materiales, utilizando componentes comunes y fáciles de obtener, además de ser sencillos de

construir y no requerir conocimientos técnicos avanzados para su mantenimiento. La elección de estos modelos tiene como objetivo maximizar la viabilidad y sostenibilidad de los proyectos hidroeléctricos a pequeña escala, permitiendo su implementación eficiente en diversas comunidades, incluso aquellas con recursos limitados.

## **6.2 Prototipado.**

En el desarrollo de proyectos, el modelado y prototipado son herramientas muy útiles, especialmente en campos como la ingeniería. Ya que ayudan a reducir riesgos, mejorar la calidad y garantizar el éxito del proyecto al proporcionar una representación visual y funcional de la idea. Esto facilita la identificación de posibles problemas y permite contrastar el funcionamiento previsto con la implementación final. En este capítulo, Se examinan los criterios utilizados para la selección de los dos modelos a prototipar, así como los detalles de diseño y el proceso de construcción de cada prototipo.

Todas las piezas que se diseñaron y fabricaron durante el proceso de construcción de los prototipos se encuentran en el repositorio de Mazo Arenas (2024), estas pueden ser modificadas según las necesidades de cada persona.

### ***6.2.1 Prototipado Del Tornillo De Arquímedes.***

Al diseñar un generador tipo tornillo de Arquímedes, hay varios parámetros importantes que se deben tener en cuenta para garantizar su eficiencia. A continuación, se explican algunas de las medidas más importantes:

- **Longitud del tornillo (L):** La longitud del tornillo de Arquímedes es un aspecto muy importante que afecta directamente la capacidad de conversión de energía. Una longitud adecuada asegura que haya suficiente contacto entre las hélices del tornillo y el agua para maximizar la generación de energía eléctrica.
- **Diámetro interior del tornillo (Di):** Es la medida del eje principal, en el cual van las aspas.
- **Diámetro exterior del tornillo (De):** Se refiere a la medida del diámetro total del tornillo, incluyendo las hélices (Núñez Pérez 2021).
- **Paso del tornillo ( $\tau$ ):** Se refiere a la distancia entre el comienzo y fin de cada hélice del mismo y determina la cantidad de energía generada en cada revolución del tornillo. Un paso adecuado es importante para garantizar la generación de energía constante y eficiente.  
Según el trabajo de Farez Benalcazar (2023), un paso adecuado es igual al diámetro externo.
- **Ángulo de inclinación ( $\theta$ ):** El ángulo de inclinación del tornillo es otra de las medidas importantes, pues este afecta la capacidad de generación de energía. Un ángulo de inclinación adecuado garantiza que el tornillo aproveche al máximo el flujo del agua.  
Del trabajo titulado: “Diseño de una Turbina Tipo Tornillo de Arquímedes en la Comunidad de Muquiyauyo”, se concluye que el ángulo de inclinación más eficiente se encuentra entre los 25 y los 30 grados (Tadeo Hurtado 2022).
- **Salto de agua (H):** Esta medida se refiere a la altura del salto aprovechable, y está relacionada con el ángulo de inclinación ( $\theta$ ) y la longitud (L) mediante la ecuación:
- 

$$L = \frac{H}{\sin(\theta)}$$

**6.2.1.1 Proceso De Construcción.** Si bien estas turbinas se diseñan para un caudal específico, es decir que antes de realizar el diseño se deben tener en cuenta las condiciones del lugar en el que se piensa instalar, en este caso al no estar diseñando para un lugar determinado, el criterio que se eligió para sus dimensiones fue su portabilidad.

Primero se hizo una búsqueda de diversos diseños de tornillo de Arquímedes que hayan sido desarrollados, seleccionando el de más fácil construcción. De esta búsqueda se seleccionó el modelo desarrollado por Mr.Construction (2022), porque proporciona suficiente información para llevar a cabo la construcción.

Las medidas que hemos tomado son las que se pueden ver en el video tutorial de Mr.Construction (2022), del cual no se tienen ni el paso, ni el ángulo de inclinación, los cuales se han obtenido de otros autores.

- **Diámetro interno ( $D_i$ ):** 60.3 mm
- **Diámetro externo ( $D_e$ ):** 190 mm
- **Paso ( $\tau$ ):** 190 mm
- **Angulo de inclinación ( $\theta$ ):** Se ha eligiendo para este caso un ángulo de 26 grados.
- **Salto de agua ( $H$ ):** Como ya se ha elegido la longitud ( $L$ ) y el ángulo ( $\theta$ ) la altura del salto de agua aprovechable será de 0.43 m.
- **Numero de hélices:** Por facilidad este será 1.

Para la construcción de las hélices se utilizó un tubo PVC de 4 pulgadas, el cual se cortó a la mitad y se aplano luego de calentarlo (*Figura 26 – 27*).

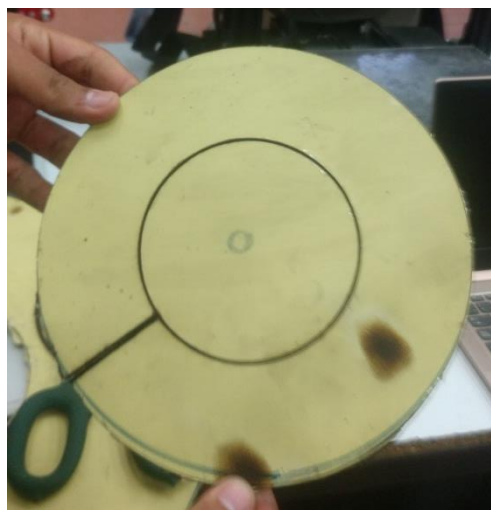


*Figura 26. Corte del Tubo.*  
Fuente: Elaboración Propia

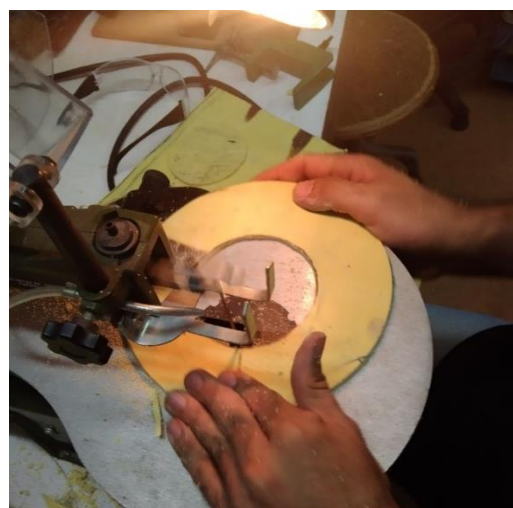


*Figura 27 Aplanado del tubo.*  
Fuente: Elaboración Propia.

Una vez completamente plano, se procedió a marcar y cortar las circunferencias con las cuales se harán las hélices. Diámetro externo 190 mm diámetro interno 86 mm (*Figura 28-29*).



*Figura 28. Trazo de Circunferencia.*  
Fuente: Elaboración Propia



*Figura 29. Corte de Circunferencias para las hélices.*  
Fuente: Elaboración Propia

Luego se procedió a marcar las distancias del paso sobre el tubo de 2" que hace de cuerpo central del tornillo (*Figura 30*), y se calientan las piezas circulares para empezar a dar forma a la hélice.



*Figura 30.* Marcado del Paso.  
Fuente: Elaboración Propia.

En las *Figura 31– 32* se puede ver como se hace un primer pre ensamble utilizando pegamento de secado rapido, para posteriormente pegar de forma definitiva con pegamento epoxico.



*Figura 32.* Dobles de Hélices.  
Fuente: Elaboración Propia.



*Figura 31.* Pre-ensamble  
Fuente: Elaboración Propia.

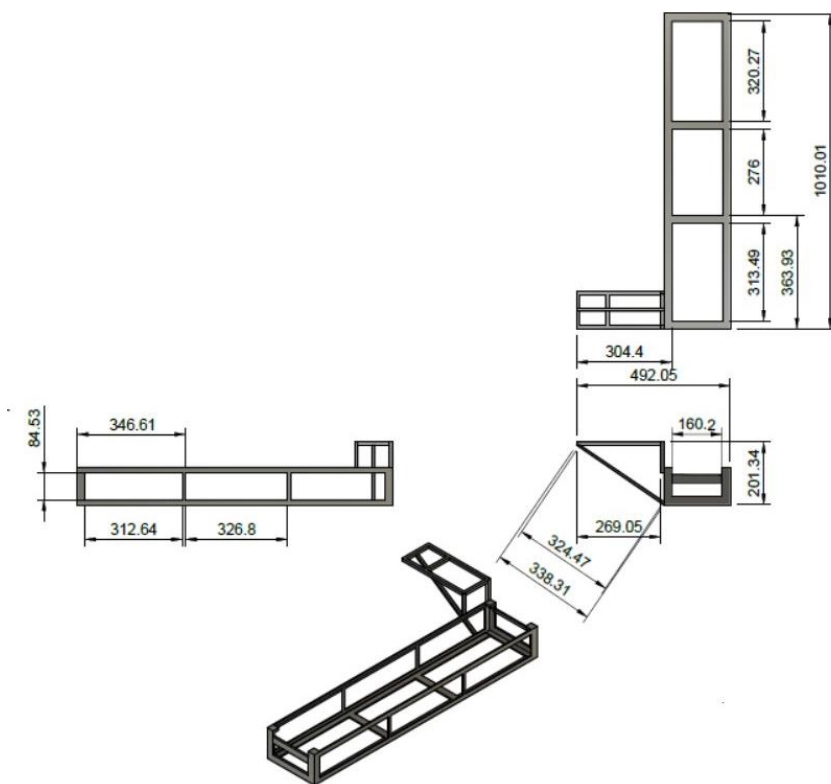
Teniendo el tornillo se construye la estructura para el canal que llevara el agua a este, para su fabricacion su utilizo un angulo de hierro de 1 pulgada, que por su resistencia aportara un

soporte adecuado a toda la estructura, además su peso le dará la estabilidad, disminuyendo las posibilidades que el agua lo arrastre (*Figura 33- 34*).



*Figura 33. Armado de estructura.*

Fuente: Elaboración Propia.



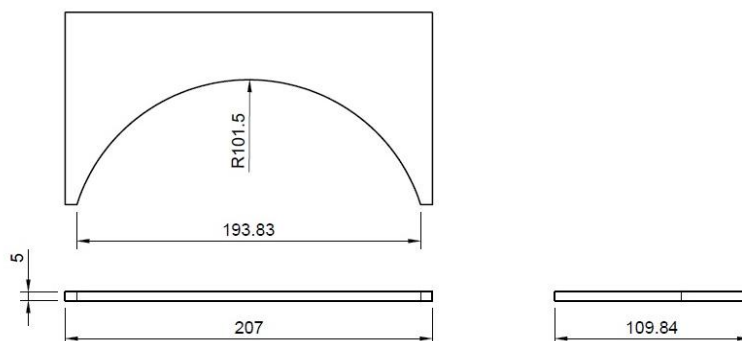
*Figura 34. Plano de la Estructura.*

Fuente: Elaboración Propia.

Para dar forma al canal se diseñaron soportes mediante modelado 3D, material ABS (acrilonitrilo butadieno estireno) el cual es un termoplástico duradero, tenaz y altamente



resistente a impactos (Navarrete Cadena, 2023), sobre estas guías se pegara el canal, que en este caso se fabrico con laminas de plastico recuperado, estos soportes se encargaran de mantener la forma uniforme semi -circular del canal y facilitara la ubicación del mismo lo mas cerca posible a la elice del tornillo, pues esto de esto depende una mayor eficiencia de esta turbina (*Figura 35-36-37*).



*Figura 35. Vista Soporte Impreso*

Fuente: Elaboración Propia.



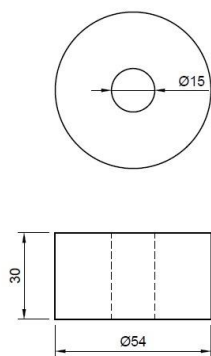
*Figura 37. Soporte Canal*  
Fuente: Elaboración Propia.



*Figura 36. Vista Ubicación Soporte*  
Fuente: Elaboración Propia.

Como eje para tornillo se escogio una varilla macisa liza de 5/8'' que atravieza el tornillo completamente, debido a que el eje roscado que se emplea en el video queda con un ligero desajuste, ademas de esto se diseño otra pieza para mejorar el prototipo, eliminando así una

pequeña oscilación que queda al utilizar el eje roscado y las guías circulares hechas en PVC que se aprecian en el min 1:07 de la grabación de Mr. Construction (2022), estas fueron reemplazados por soportes impresos en 3D material ABS, relleno al 100% (Figura 39-39).



*Figura 38. Plano Soporte Guía Eje.*  
Fuente: Elaboración Propia.



*Figura 39. Soporte Impreso.*  
Fuente: Elaboración Propia.

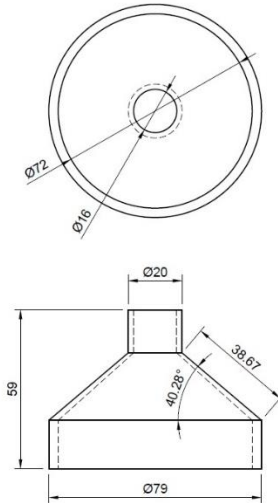
Las Figura 40 – 41 – 42 muestran una pieza diseñada, que va del tubo de 2” a la varilla que sirve como eje, esta pieza es un cono, con diametro interno mayor de 2” y el menor de 5/8”, esta forma lo que hace es permitir que el agua fluya de la mejor manera posible evitando choques frontales, lo que reduciría su energia.



*Figura 41. Acople.*  
Fuente: Elaboración Propia.



*Figura 40. Ubicación del acople.*  
Fuente: Elaboración Propia.



*Figura 42.* Plano Acople.  
Fuente: Elaboración Propia.

Finalmente se instala un sistema de piñones con el fin de alejar el motor de la corriente de agua, además de aumentar las RPM que entrega el tornillo (*Figura 43*).



*Figura 43.* Multiplicador de Velocidad.  
Fuente: Elaboración Propia.

### ***6.2.2 Prototipado De La Turbina Turgo.***

Para diseñar una turbina tipo Turgo, se deben considerar ciertos aspectos para que funcione de la mejor manera posible. Estos son algunos puntos importantes:

- **Tamaño del rodete:** Se debe determinar el diámetro adecuado del rodete para garantizar una captación eficiente del flujo de agua sin generar excesiva resistencia.
- **Forma y número de álabes:** Los álabes del rodete deben diseñarse con una forma aerodinámica específica y un número óptimo para maximizar la conversión de la energía hidráulica en energía mecánica.
- **Ángulo de los álabes:** Se determina el ángulo de inclinación de los álabes del rodete para asegurar una entrada suave del agua y una salida eficiente, maximizando la generación de energía.
- **Distribuidor de agua:** El diseño del distribuidor de agua debe dirigir uniformemente el flujo hacia el rodete, evitando turbulencias y pérdidas de energía.

***6.2.2.1 Proceso de construcción.*** Para la construcción de esta, nos apoyamos en dos proyectos ya desarrollados; el primero de Redfield, (2008), el cual construye una pico-hidro con una turbina tipo Turgo dentro de un balde de 5 galones. Esta idea en particular se enmarca dentro de los lineamientos de este trabajo, pues es de fácil fabricación y fue construida casi completamente con materiales de fácil acceso.

El otro proyecto es el de Bhutiani (2013), el cual diseñó la turbina tipo turgo y la compartió en formato 3D lo que facilitó el proceso de construcción, al posibilitar su fabricación mediante impresión 3D.

Teniendo estos dos proyectos a la vista se procede a modificar algunos parámetros en cuanto el tamaño de la turbina de Bhutiani (2013), para que coincida con el tamaño necesario en el diseño de Redfield (2008), adicional a esto se realizan algunos diseños propios para fijar el generador y para las toberas por las que saldrá el agua. Se comienza por elegir el recipiente que albergaría la turbina, ya que las dimensiones de los demás componentes dependen de este factor. Se optó por un balde de 5 galones, siguiendo el diseño de Redfield (2008).

Luego de esto se imprimió en 3D el rodete y 2 alabes, con las medidas del proyecto de Bhutiani (2013) para observar cual sería el tamaño más adecuado para el proyecto (*Figura 44*).



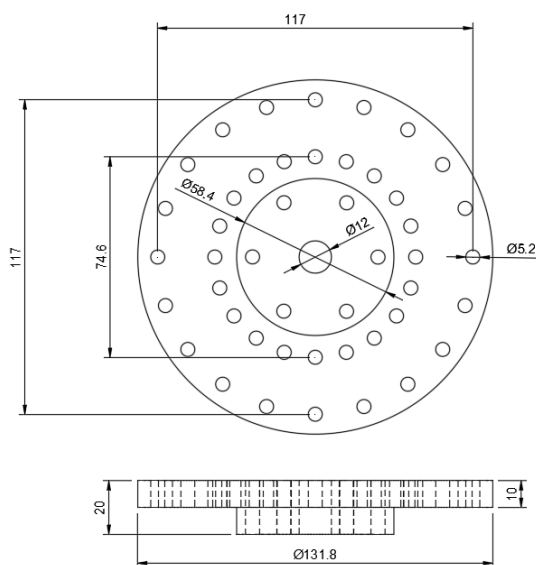
*Figura 44.* Vista inicial del tamaño.  
Fuente: Elaboración propia.

De esta observación se concluye que lo mejor es aumentar el tamaño de la turbina lo máximo que el recipiente permita, así que se aumentó en 18% las medidas de las piezas diseñadas por Bhutiani (2013). Y se procede a imprimir en 3D.

Para el rodete se utiliza filamento ABS, densidad de relleno 100%, se eligió este material ya que entre los materiales más comúnmente utilizados en impresión 3D este es el más rígido, ideal para soportar las fuerzas que incidirán sobre dicha pieza. Los alabes se fabricaron en Pet-G

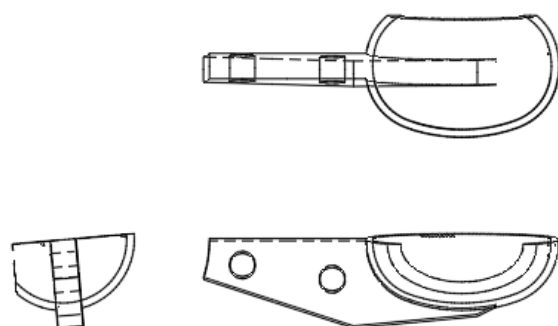
(tereftalato de polietileno glicol izado), el cual es un termoplástico que se caracteriza por ser resistente a la humedad y a los productos químicos (Navarrete Cadena 2023), además debido a su dureza y a su resistencia al impacto es un material ideal para las fuerzas que tendrán que soportar estos.

Como se puede observar en la *Figura 46*, otra de las modificaciones que se hicieron fue un orificio en el centro del rodete de 12 mm para pasar a través de este el acople turbina motor y de esta manera dar más estabilidad a la turbina.



*Figura 46.* Plano Rodete.

Fuente: Elaboración propia.



*Figura 45.* Plano Alabes.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez impresas estas piezas se procese a pulir quitando cualquier imperfección y se hace un primer ensamble (*Figura 47-48*).



*Figura 47. Pulido Piezas.*

Fuente: Elaboración propia.



*Figura 48. Turbina Turgo.*

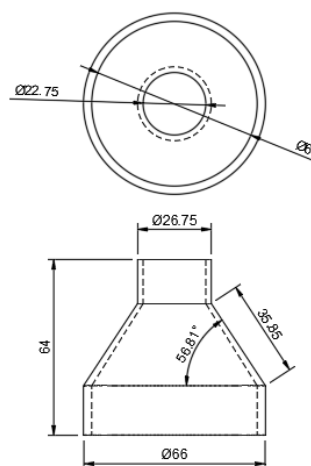
Fuente: Elaboración propia.

El sistema por la que llegará el agua a las toberas consiste en un tubo de 2" que llega directamente del tanque desarenador donde se captará el agua, en nuestro caso este se conecta a la bomba la cual lo simula, luego este tubo se conecta a una reducción a tubería de 3/4" diseñada e impresa en 3D (*Figura 49-50*), pues las que se consiguen comercialmente debido a su diseño generan mucha turbulencia y pérdida de velocidad del agua. A continuación, esta reducción se une a una T la cual repartirá el agua a ambos lados de la turbina (*Figura 51*).



*Figura 50. Reducción.*

Fuente: Elaboración propia.



*Figura 49 Plano Reducción.*

Fuente: Elaboración propia.





*Figura 51. Distribución de Agua.*

Fuente: Elaboración propia.

Para fijar el motor se construyó una jaula como soporte (*Figura 52*), la cual se fija a la tapa del balde mediante cuatro espárragos m8 x 250 (*Figura 54*), de la medida de los espárragos depende la distancia entre la turbina y la tapa, si estos son muy largos la turbina no entrara dentro del balde y si son muy cortos no abra espacio para el motor.

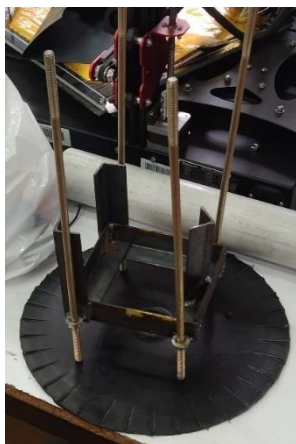
Además de esto para acoplar la turbina al motor, se fabrica un acople en aluminio (*Figura 53*) de este acople no se tenía información así que se hizo el diseño desde cero, la medida del diámetro del eje de este acople se escogió igual a la del eje del motor para facilitar la conexión entre estos.



*Figura 52. Jaula para Motor.*

Fuente: Elaboración propia.





*Figura 54. Jaula con Espárragos.*  
Fuente: Elaboración propia.



*Figura 53. Acople Motor - Turbina*  
Fuente: Elaboración propia.

Debido a que el proyecto de Redfield (2008) no presenta mucha información sobre medidas de los elementos la construcción de esta se hizo de manera experimental, se hizo una presentación inicial de los elementos y se observa de cuál puede ser su mejor ubicación (*Figura 55-56*), luego se marcan los lugares donde se harán las perforaciones por las que van a pasar los tubos que dirigirán el agua a las toberas y por donde pasaran los espárragos que sujetaran la estructura con el motor a la tapa.



*Figura 56. Posible Ubicación de Componentes.*  
Fuente: Elaboración propia.



*Figura 55. Presentación Inicial.*  
Fuente: Elaboración propia.

Una vez definidos los puntos por los que pasaran los tubos, se procede a perforar la tapa del balde sobre la que va a quedar suspendida toda la estructura del generador, el balde es para proteger el motor de los elementos externos, manteniéndolo aislado del agua.

Las toberas fueron fabricadas en 3D para optimizar el ángulo en el que el agua golpea las toberas, cuya medida para este caso es de  $28^\circ$  (Figura 57-58)

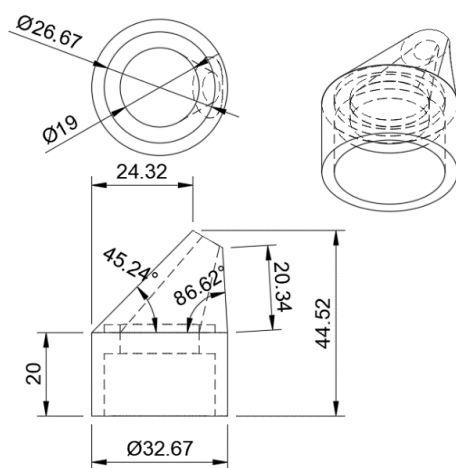


Figura 58. Plano Tobera.

Fuente: Elaboración propia.

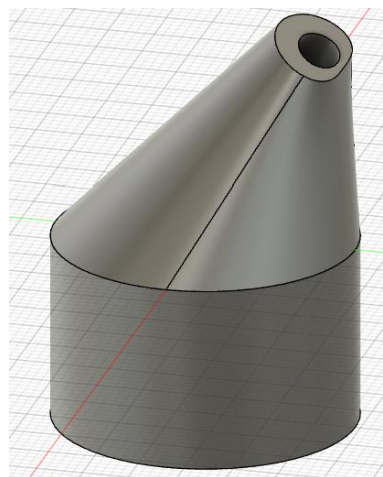


Figura 57. Vista Tobera.

Fuente: Elaboración propia.

Finalmente se procede a ensamblar todo para poder fijar las toberas en la posición adecuada (Figura 59).



Figura 59. Alineación de Toberas.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez se este seguro de que todo alinea correctamente se procede con el ensamble definitivo pegando toda la tubería con pegante para PVC.

Al tubo de entada a la turbina se le instala un manómetro para registrar la presión del agua.



*Figura 60. Manómetro.*

Fuente: Elaboración Propia.

### **6.3 Pruebas.**

En esta sección se hará un análisis de los resultados obtenidos al poner en funcionamiento los dos prototipos.

#### ***6.3.1 Motor Generador y Elevador de Tensión.***

Para las pruebas en ambos prototipos se utilizó el mismo motor generador, en la *Tabla 2* se especifican algunas de sus características.

Tabla 2. Características Generales Motor.

<b>Modelo</b>	MY1016
<b>Tipo De Motor</b>	Brushed
<b>Potencia</b>	300W
<b>Voltaje</b>	24V/36VCC
<b>Corriente</b>	1.6A
<b>Corriente Nominal</b>	$\leq 13.7A$
<b>Par Nominal</b>	1,04 Nm
<b>Velocidad Nominal</b>	2750RPM
<b>Dimensiones Del Motor (D*L)</b>	100*108MM
<b>Distancia De Los Orificios Del Marco De Montaje (4 Orificios)</b>	42*95mm
<b>Diámetro Del Orificio De Montaje</b>	5mm
<b>Diámetro Del Eje</b>	10mm
<b>Peso</b>	2,26Kg

Fuente: (Lunye s. f.)

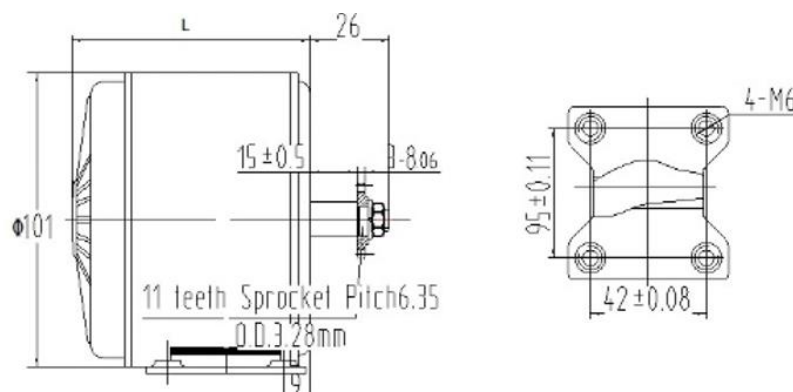


Figura 61. Medidas Motor.

Fuente: (Lunye s. f.)

A la salida del motor se conecta un módulo DC-DC tipo Boost, el cual es un circuito electrónico capaz de entregar a la salida un nivel de tensión superior al de la entrada, con la ventaja que podemos regular el nivel de voltaje que deseamos a la salida (Devia-Narváez, Ospina-Ospina, y Devia-Narváez, 2021).

Este circuito nos permitirá mantener un voltaje de 14 Voltios (V) a la salida, siempre que el voltaje generado sea mayor a 3 V, pero menor a 14 V, para casos en los que el voltaje generado sea mayor en algún momento al voltaje requerido, se puede optar por un conversor DC-DC Buck-Boost, el cual es capaz de elevar o reducir el nivel de tensión de entrada y adaptarlo a nuestras necesidades. Se ha elegido este nivel de tensión, pues este es un nivel óptimo para cargar baterías de 12 V.

### ***6.3.2 Pruebas a la Turbina Tipo Turgo.***

El flujo de agua necesario para las pruebas se simula utilizando una bomba que abastece un tanque y recircula el agua. La bomba está conectada a un variador de velocidad, el cual controla el caudal de manera indirecta al ajustar la velocidad del motor. Esto se logra modificando la frecuencia y el voltaje suministrados a este, lo que altera su velocidad y, por ende, la cantidad de agua que la bomba desplaza.

Para las pruebas de esta turbina, se conecta directamente la salida de la bomba al tubo de 2" de entrada de la turbina. En este se instaló un manómetro, con el fin de medir la presión y se hicieron estimaciones de caudal.

Para estas estimaciones, primero se midió el área del fondo del canal en el que se hicieron las pruebas y se calcula el volumen utilizando una altura de 5 cm, en la que se puso una marca para medir tiempo de llenado, dando un volumen de  $V=29.6$  lt.

Donde el caudal (Q) y la altura (h) están dados por:

$Q = V / t$  Donde V es volumen y t es tiempo.

$h(m) = \frac{P(Pa)}{(\rho * g)}$  Donde P es presión en Pascales,  $\rho$  densidad del agua y g la aceleración de la gravedad.

La *Tabla 3* muestra las estimaciones de caudal y las medidas de presión para cada una de las pruebas hechas, además se calcula la altura equivalente, que es la altura a la que se debe captar el agua para obtener estos mismos resultados.

*Tabla 3.* Estimación de Caudal y Medida de Presión Para Turbina Turgo.

<b>Frecuencia del Variador</b>	<b>Volumen</b>	<b>Tiempo</b>	<b>Caudal</b>	<b>Presión</b>	<b>Altura Equivalente</b>
20 Hz	29.6 lt	81 s	0.36 lt/s	0.01 Bar	0.10 m
25 Hz	29.6 lt	44.8 s	0.66 lt/s	0.06 Bar	0.61 m
30 Hz	29.6 lt	34.7 s	0.85 lt/s	0.1 Bar	1.02 m
35 Hz	29.6 lt	29 s	1.02 lt/s	0.27 Bar	2.75 m
40 Hz	29.6 lt	22.4 s	1.32 lt/s	0.70 Bar	7.14 m
45 Hz	29.6 lt	18.4 s	1.61 lt/s	1.01 Bar	10.30 m
50 Hz	29.6 lt	17 s	1.74 lt/s	1.5 Bar	15.29 m
55 Hz	29.6 lt	14.6 s	2.02 lt/s	2.15 Bar	21.92 m
60 Hz	29.6 lt	13.5 s	2.19 lt/s	2.3 Bar	23.45 m

Fuente: Elaboración Propia.

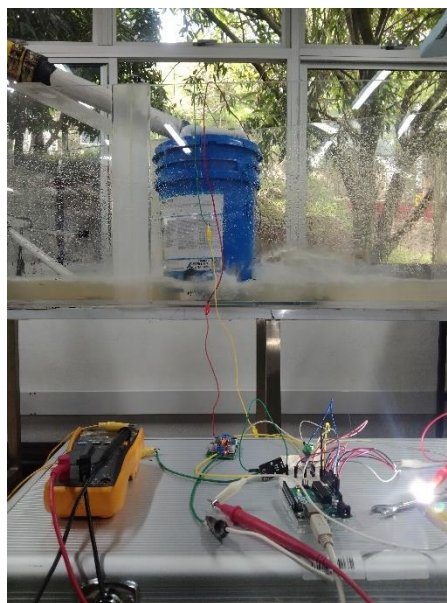
Teniendo estimado el caudal se procede a tomar medidas de Voltaje generado sin carga y Potencia máxima generada al conectar una carga (*Figura 62-63 - 64*).



*Figura 63.* Turbina Turgo en Funcionamiento.  
Fuente: Elaboración Propia.



*Figura 62.* Pruebas Turgo.  
Fuente: Elaboración Propia.



*Figura 64. Medición de Variables.*

Fuente: Elaboración Propia.

*Tabla 4. Potencia Generada Vs. Diferentes Parámetros*

<b>Caudal</b>	<b>Presión</b>	<b>Voltaje Generado</b>	<b>Voltaje Salida sin Carga</b>	<b>Potencia Máxima de Salida.</b>
0.36 lt /s	0.01 Bar	1.82	1.67	NA
0.66 lt /s	0.06 Bar	2.92	2.9	NA
0.85 lt/s	0.1 Bar	4.8	13.5	0.22 W
1.02 lt/s	0.27 Bar	5.93	13.8	0.82 W
1.32 lt/s	0.70 Bar	7.88	13.8	11.88 W
1.61 lt/s	1.01 Bar	9.26	13.8	3.51 W
1.74 lt/s	1.5 Bar	10.38	13.8	5.19 W
2.02 lt/s	2.15 Bar	11.52	13.8	6.81 W
2.19 lt/s	2.3 Bar	12.36	13.8	8.33 W

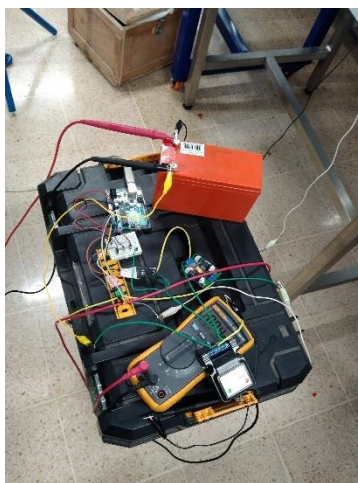
Fuente: Elaboración Propia.

En la Se puede observar que existe una relación directa entre la altura y la potencia entregada por el generador en este tipo de turbinas.

Para los dos primeros valores de caudal, el voltaje generado es tan bajo que no activo el conversor DC-DC, por consiguiente, no se conectó ninguna carga para evaluar la potencia.



Además, se puede observar que a pesar que el voltaje vario con los cambios de caudal, después que el motor genera 3.2 V el voltaje de salida del conversor DC-DC permanece estable en el valor establecido, lo que permitirá cargar una batería de manera óptima.



*Figura 65. Prueba de Carga de Batería*

Fuente: Elaboración Propia.

### ***6.3.3 Pruebas a la Turbina Tipo Tornillo de Arquímedes.***

Las pruebas para el tornillo se realizan en un canal de acrílico del que dispone la Universidad, en el cual se construyó un pequeño tanque para simular condiciones reales, este tanque simulara una pequeña represa necesaria para aumentar la altura del agua que se va a captar a 0,43 m.

El flujo de agua al igual que en las pruebas de la turbina Turgo lo simulará una bomba que recirculará el agua, para las estimaciones de caudal se tomó el tiempo necesario para llenar un recipiente de 40 lt. En la *Tabla 5* se tienen las estimaciones de caudal para las pruebas del tornillo de Arquímedes.



Tabla 5. Estimación de Caudal para Tornillo de Arquímedes.

Frecuencia	Tiempo	Caudal
20 Hz	18.18 s	2.2 lt /s
25 Hz	8.33 s	4.8 lt /s
30 Hz	5.9 s	6.7 lt/s
35 Hz	4.8 s	8.3 lt/s
40 Hz	3.8 s	10.5 lt/s
45 Hz	3.25 s	12.3 lt/s
50 Hz	2.96 s	13.5 lt/s
55 Hz	2.68 s	14.9 lt/s
60 Hz	2.51 s	15.9 lt/s

Fuente: Elaboración Propia.

Una vez se tienen estos datos se procede a hacer pruebas de funcionamiento (*Figura 66 - 67*).



Figura 67. Pruebas Tornillo Arquímedes.  
Fuente: Elaboración Propia.



Figura 66. Prueba y Lectura de Resultados.  
Fuente: Elaboración Propia.

Con esta turbina se tuvo muchos problemas con la alineación de los engranajes, pues debe ser demasiado precisa su alineación para que el sistema de cadenas no se desacople.

Con esta turbina no se lograron los resultados esperados, como se puede observar en *Tabla 6*, el desempeño de esta fue muy pobre, logrando entrar en funcionamiento con un caudal de 13.5 lt/s, pero el voltaje generado fue muy poco, solo alcanzo un voltaje adecuado para ser elevado y poder ser utilizado en la carga de una batería con un caudal de 15.9 lt.

Durante el proceso de pruebas se observan varias problemáticas de esta turbina, una de ellas es que, al ser fabricado de manera empírica, el ángulo del aspa no es el adecuado a lo largo del tornillo, además de esto como ya se mencionó la alineación de los piñones debe ser muy precisa, pues por pequeño que sea el desajuste, hará que el tornillo se trabe o que se desacoplen las cadenas de este sistema.

*Tabla 6.* Resultados Tornillo de Arquímedes.

<b>Caudal</b>	<b>Voltaje Generado</b>	<b>Potencia Máxima</b>
2.2 lt /s	0	0
4.8 lt /s	0	0
6.7 lt/s	0	0
8.3 lt/s	0	0
10.5 lt/s	0	0
12.3 lt/s	0	0
13.5 lt/s	2.2 v	NA
14.9 lt/s	3.5 v	0.2 W
15.9 lt/s	7 v	1.4 W

Fuente: Elaboración Propia.

## 7. Conclusiones.

Al comparar las dos pico-centrales, se observa una diferencia significativa en términos de eficiencia y dificultad de construcción. Mientras que la turbina tipo Turgo mostro un mejor rendimiento en la generación de energía bajo ciertas condiciones, el Tornillo de Arquímedes mostró resultados considerablemente menores. Aunque los materiales para la construcción de esta última eran fácilmente accesibles, el proceso de construcción resultó ser mucho más complicado. Esto demuestra la importancia de seleccionar la tecnología adecuada según las necesidades del lugar y las capacidades de las comunidades en el que se implementará. En áreas donde los recursos y habilidades técnicas son limitados, optar por una pico-central de fácil construcción puede ser más beneficioso, incluso si su eficiencia es ligeramente inferior o si los costos de los materiales son un poco más altos.

**Importancia de la Investigación en Energías Alternativas:** La investigación en pico-centrales de generación eléctricas visibiliza la importancia de las energías alternativas en la búsqueda de soluciones sostenibles y accesibles para la generación de electricidad. En un mundo que enfrenta enormes desafíos ambientales y del agotamiento de los recursos naturales, explorar y desarrollar tecnologías de generación eléctrica a pequeña escala es crucial. Las pico-centrales representan una opción ecológicamente viable, aportando a la reducción de la huella de carbono.

**Generación Eléctrica para Comunidades Aisladas:** Las pico-centrales de generación eléctricas son vitales para comunidades aisladas o rurales que no tienen acceso al Sistema Interconectado Nacional. Estas permiten satisfacer las necesidades básicas de energía de manera

económica. A pesar de su poca capacidad de generación, la instalación de múltiples pico-hidro en conjunto puede proporcionar una solución adaptable a las necesidades de cada persona o comunidad. Su operación continua las 24 horas del día, combinada con el uso de bancos de baterías adecuados, puede asegurar un suministro constante de electricidad, mejorando significativamente la calidad de vida y el desarrollo de las comunidades.

**Viabilidad y Escalabilidad de las Pico-centrales:** A pesar de que las pico-centrales producen una cantidad pequeña de energía, su tamaño reducido y facilidad de instalación las hacen altamente viables y escalables. La posibilidad de implementar varias pico-centrales en un mismo lugar permite aumentar la capacidad de generación. Además, su mantenimiento sencillo y bajo costo de operación las convierte en una opción viable y sostenible para la electrificación rural. La acumulación de energía en bancos de baterías adecuados maximiza su utilidad, garantizando un suministro energético continuo y fiable para las comunidades que más lo necesitan.

## 8. Referencias

- Alberto Mejia, Julio Cesar. 2011. «DISEÑO DE UNA TURBINA HIDRÁULICA BASADA EN EL TORNILLO DE ARQUÍMEDES». 110.
- Banco Mundial. 2018. *El acceso a la energía ocupa un lugar central en el desarrollo*.
- Bhutiani, Ramesh. 2013. «Turgo Turbine Runner». *Grabcad*. Recuperado (<https://grabcad.com/library/turgo-turbine-runner-1>).
- Borja, R., Nerea P, Damian D, y Noemi G. 2015. «Central Hidráulica». *Tecnocaniza*. Recuperado (<https://es.slideshare.net/tecnocaniza/borja-damian-nerea-noemi>).
- Cogaria, José Humberto. 2019. «Diagnóstico de la percepción ambiental y socioeconómica de las hidroeléctricas en Colombia». *Revista Ingeniería* 23(3):23-41.
- Combarro Marina, Manuel. 2022. «DISEÑO DE UNA TURBINA KAPLAN Y POSTERIOR SIMULACION MEDIANTE EL USO DE LA DINÁMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL».
- Cortés, Simón. 2017. «Energías renovables en Colombia: una aproximación desde la economía». *Revista Ciencias Estratégicas* 25(38):375. doi: rces.v25n38.a7.
- Cuasqui Tambi, Bryan David. 2023. «IMPLEMENTACIÓN DE UNA PICO-GENERADORA HIDROELÉCTRICA CON TURBINA TIPO TURGO EN EL PATIO DE PRUEBAS DE LA CARRERA DE ELECTRICIDAD».
- Devia-Narváez, Diana Marcela, Rogelio Ospina-Ospina, y Diego Fernando Devia-Narváez. 2021. «Formulación de un controlador  $H_{\infty}$  con incertidumbre no estructurada para un convertidor DC – DC elevador (boost).pdf». *Revista UIS Ingenierías* 20(2):45-52. doi: DOI: <https://doi.org/10.7440/res64.2018.03>.

Egúsqiza Goñi, Julio César, y Julio César Sánchez Camones. 2009. «DISEÑO DE UN BANCO DE PRUEBAS PARA TURBINAS MICHEL BANKI PARA EL LABORATORIO DE ENERGÍA DE LA PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ».

Farez Benalcazar, John Alexande. 2023. «Diseño de una micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes para el suministro de energía eléctrica al complejo turístico Huachito del cantón Moróna».

FAREZ BENALCAZAR, JOHN ALEXANDER. 2023. «Diseño de una micro central hidráulica de tornillo de Arquímedes para el suministro de energía eléctrica al complejo turístico Huachito del cantón Moróna».

Guzmán Arévalo, José Julio. 2019. «PEQUEÑAS CENTRALES HIDRÁULICAS A FILO DE AGUA».

Guzmán Gómez, Verónica Jacqueline, y Eudaldo Enrique Espinoza Freire. 2022. «Educación Para el Cambio Climático». *Revista Metropolitana de Ciencias Aplicadas* 5(2):17-24.

Hauser Vavra, Kim Santiago María. 2011. «CARACTERIZACIÓN DE TURBINA HIDRÁULICA TIPO TURGO PARA MICROGENERACIÓN».

Ingeoexpert. 2018. «Cómo funciona una central hidroeléctrica y cuál es su estructura interna».

Ingfocol Ltda. 2015. «HIDROENERGÍA».

Irazusta, Belen. 2018. «Diseño de Microturbina Turgo».

IRENA. 2021. «Capacity Highlights».

- Jiménez, Juan David Gutiérrez, Jaime Silva Martínez, y Leidy Dayana Vergara Trespalacio. 2022. «Impresión en 3D de una turbina para generación de energía por el método de vórtice gravitacional .» (01):86.
- Lara, Iván Esteban, y José Alejandro Riaño. 2023. «Problemas sociales y medioambientales derivados de los proyectos hidroeléctricos».
- Lorenzo Escuín, José Luis. 2011. «Micro-Central Vernis: energía hidráulica producida en casa». *Interempresas*. Recuperado (<https://www.interempresas.net/Energia/Articulos/57268-Micro-Central-Vernis-energia-hidraulica-producida-en-casa.html>).
- Lunye, Industries. s. f. *Made in China*. Recuperado 23 de mayo de 2024 (<https://lunye.en.made-in-china.com/product/fdKTgSjlnuYk/China-My1016-24V-36V-250W-300W-350W-Scooter-Gokart-Minibike-E-ATV-DC-Electric-Brush-Motor.html>).
- Mazo Arenas, Juan Camilo. 2024. Recuperado (<https://github.com/camilomazo265>).
- MediaHouse GmbH. 2021. «Central eléctrica de almacenamiento por bombeo».
- Ministerio de Minas y Energía. 2021. «Transición energética: un legado para el presente y el futuro de Colombia.»
- Morales Rosero, Anderson. 2020. «DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA GRÁFICA PARA LA SIMULACIÓN DE UNA MINICENTRAL HIDROELÉCTRICA. CASO DE ESTUDIO MINICENTRAL ESPEJO».
- Mr.Construction, dir. 2022. *How to make a super powerful Archimedes screw turbine*.
- Muñoz Arias, Catalina, y Byron Iram Villamil Villar. 2020. «ENERGÍA LIMPIA PARA ILUMINACIÓN EN LOS HOGARES DE LAS ZONAS NO INTERCONECTADAS». Pp. 1-9 en *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI 2020*. Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería - ACOFI.

Navarrete Cadena, Luis Andrés. 2023. «Diseño y construcción de un banco de pruebas para la validación de impulsores de bombas de agua fabricados por FDM de vehículos automotrices».

Núñez Pérez, María. 2021. «Metodología para la Implementacion de Picocentrales Hidráulicas.pdf».

O'Connor, Peter. 2010. «Energy Transitions». *The Pardee Papers* 12:37.

OLADE. 2020. «Generación eléctrica mundial y para América Latina y el Caribe ALC\_01-12-2020».

ONU. 2022. *Energías renovables: energías para un futuro más seguro*.

Ordóñez Ortiz, Jefferson Rodrigo. 2010. «ELABORACIÓN E IMPLEMENTACIÓN DE UN SOFTWARE PARA EL DISEÑO DE TURBINAS MICHELL BANKI DE HASTA 1 Mw».

Ortiz-Marin, Cristian Camilo. 2017. «Comparación del Desempeño de una Turbina Francis y una Turbina de Flujo Cruzado».

Ovalle-Murcia, José Alexander, Nubia Marcela Rodríguez-Figueroa, y Andrés Escobar-Díaz. 2020. «ESTADO DE LA COBERTURA ELÉCTRICA Y LAS ZONAS NO INTERCONECTADAS EN LA REGIÓN CENTRAL.pdf».

Oviedo-Ocaña, Edgar Ricardo. 2018. «Las Hidroeléctricas: efectos en los ecosistemas y en la salud ambiental». *Revista de la Universidad Industrial de Santander. Salud* 50(3):191-92. doi: 10.18273/revsal.v50n3-2018003.

Palomino-Resendiz, R. L., A. Cortés-Perales, R. Gonzalez-Vega, Y. Lozano-Hernández, y S. I. Palomino-Resendiz. 2022. «Propuesta de diseño de turbina tipo Turgo y sistema generador eléctrico sustentable de baja potencia».



- Petrazzini, María Victoria, dir. 2018. *Energía Renovable con Micro Turbina Pelton*.
- Redfield, Sam. 2008. «Sam Redfield on Pico-Hydro at La Florida». *AIDG*. Recuperado (Sam Redfield on Pico-hydro at La FloridaSam Redfield on Pico-hydro at La Florida).
- Rincon, Javier. 2020. «Energías Renovables, una Alternativa para Ampliar Cobertura del Servicio Energético en Colombia».
- Rojas, Bach Encarnación Carlos. 2021. *Diseño y evaluación de un prototipo de turbina tipo Pelton para una pequeña planta hidroeléctrica*.
- Romero, Fredys, Laura Velásquez, y Edwin Chica. 2020. «Consideraciones de diseño de una turbina Michell-Banki». *Revista UIS Ingenierías* 20(1):23-46. doi: 10.18273/revuin.v20n1-2021003.
- Ruiz-Álvarez, Semaria, Julián Patiño, Alejandro Márquez, y Jairo Espinosa. 2017. «Optimal Design for an Electrical Hybrid Microgrid in Colombia Under Fuel Price Variation». *International Journal of Renewable Energy Research* 7(4):1535-45. doi: 10.20508/ijrer.v7i4.6128.g7194.
- Sabio Hidalgo, Nuria. 2023. «Diseño, Fabricacion y Caracterizacion de una Turbina Kaplan Para uso Docente..pdf».
- Santa Cruz Herrera, José Eduardo. 2018. «Análisis energético de un Tornillo de Arquímedes para canales de regadío con una caída de 2m y caudal de 2m<sup>3</sup>/s».
- Soto Olmedo, María Ulda, y Calos Leonardo Quizhpe Palacios. 2018. «Diseño de la etapa electrónica de un sistema de energía renovable basado en un pico hidrogenerador CC de vórtice gravitacional». 83.
- TADEO HURTADO, Fabio Leonel. 2022. *DISEÑO DE UNA TURBINA TIPO TORNILLO DE ARQUÍMEDES EN LA COMUNIDAD DE MUQUIYAUYO*.

Tadeo Hurtado, Fabio Leonel. 2022. «Diseño de una Turbina Tipo Tornillo de Arquimedes en la Comunidad de Muquiyauyo.pdf».

Tapia Villamarin, Antonio Agustin. 2022. *IMPLEMENTACIÓN DE UNA PICO CENTRAL HIDROELÉCTRICA MEDIANTE UNA TURBINA TURGO DE BAJA POTENCIA EN EL BARRIO GUADALUPE*.

Tigmasa Paredes, Lilian Estefanía. 2020. «Evaluación del Efecto del Cambio Climático Como Amenaza Para el Sector Agrícola de la Parroquia Izamba, Cantón Ambato.»

Tiu Castro, Benjamín. 2023. «Diseño de Investigación de la Emisión de CO<sub>2</sub> por la Generación de Energía Eléctrica por Diferentes Tecnologías en los GDR'S Para el Municipio de Guatemala».

UPME. 2015. «Plan energetico nacional colombia: ideario energético 2050». 184.

Valderrama, Jhoan Sebastián. 2023. *ANÁLISIS COMPARATIVO MEDIANTE MODELOS DINÁMICOS DE TRES SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA: BATERÍAS LI-ION, VOLANTES DE INERCIA (FLYWHEELS) Y BOBINAS SUPERCONDUCTORAS (SMES)*. 2023.

Velásquez, Laura, Ainhoa Rubio-Clemente, Alejandro Posada, y Edwin Chica. 2023. «Gravitational Water Vortex Hydraulic Turbine Implementation in Colombia: Hydropower Potential and Prospects». *Revista UIS Ingenierías* 22(3). doi: 10.18273/revuin.v22n3-2023004.

Vivas Rodríguez, Brayan Eduardo. 2020. «Diseño de una micro central hidroeléctrica para la Hacienda Las Garzas».