



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA

PROPUESTA TECNOLÓGICA

**“SIMULACIÓN NUMÉRICA Y EXPERIMENTAL DE UNA
TURBINA DE TORNILLO DE ARQUÍMEDES FABRICADA EN
3D PARA OPTIMIZAR SU RENDIMIENTO EN ENERGÍA
HIDROCINÉTICA”**

Propuesta tecnológica presentado previo a la obtención del título de ingeniero
electromecánico

AUTORES:

Marlon Humberto Pillisa Rocha

Roosevelt Israel García Guano

TUTOR:

Ing. Luis Miguel Navarrete López

LATACUNGA – ECUADOR

AGOSTO – 2024

DECLARACION DE AUDITORIA

Nosotros, García Guano Roosevelt Israel y Pillisa Rocha Marlon Humberto, declaramos ser autores de la presente propuesta tecnológica “SIMULACIÓN NUMÉRICA Y EXPERIMENTAL DE UNA TURBINA DE TORNILLO DE ARQUÍMEDES FABRICADA EN 3D PARA OPTIMIZAR SU RENDIMIENTO EN ENERGÍA HIDROCINÉTICA”, siendo el Ing. Navarrete López Luis Miguel tutor del presente trabajo; eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certifico que las ideas, conceptos procedimientos y resultados vertidos en la presente propuesta tecnológica, son de mi exclusiva responsabilidad.

Latacunga, agosto 2024



.....
García Guano Roosevelt Israel

C.C.: 0550217632



.....
Pillisa Rocha Marlon Humberto

C.C.: 1751610419

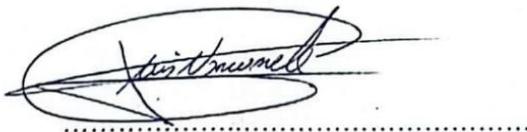
AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACION

En calidad de Tutor del Proyecto de Titulación sobre el título:

“SIMULACIÓN NUMÉRICA Y EXPERIMENTAL DE UNA TURBINA DE TORNILLO DE ARQUÍMEDES FABRICADA EN 3D PARA OPTIMIZAR SU RENDIMIENTO EN ENERGÍA HIDROCINÉTICA”, de García Guano Roosevelt Israel; Pillisa Rocha Marlon Humberto, de la carrera de Electromecánica, considero que dicho Informe Investigativo es merecedor del aval de aprobación al cumplir las normas técnicas, traducción y formatos previstos, así como también ha incorporado las observaciones y recomendaciones propuesta en la pre-defensa.

Latacunga, agosto 2024

TUTOR



Ing. Navarrete López Luis Miguel

C.C: 180374728-4

APROBACION DEL TRIBUNAL DE TITULACION

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, el o los postulantes García Guano Roosevelt Israel y Pillisa Rocha Marlon Humberto, con el título de Proyecto de Titulación: **“SIMULACIÓN NUMÉRICA Y EXPERIMENTAL DE UNA TURBINA DE TORNILLO DE ARQUÍMEDES FABRICADA EN 3D PARA OPTIMIZAR SU RENDIMIENTO EN ENERGÍA HIDROCINÉTICA”**, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación del Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza grabar los archivos correspondientes en un CD, según la normativa institucional.

Latacunga, agosto 2024

Para constancia firman:



Lector 1 (presidente)

Dr. Laurencio Alfonso Héctor

C.C: 1758367252



Lector 2

Dr. Torres Tamayo Enrique

C.C: 1757121940



Lector 3

Ing. MSc. Segundo Cevallos Betún

C.C: 0501782437

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que hicieron posible la realización de esta tesis.

En primer lugar, agradezco a mis padres y hermanos, por su amor incondicional, su apoyo constante y por haberme enseñado el valor del esfuerzo y la dedicación. Su ejemplo ha sido mi mayor fuente de inspiración.

A mi tutor Luis Navarrete por su orientación experta, su paciencia y por compartir su vasto conocimiento durante este proceso.

Finalmente, agradezco a la UTC por su colaboración y por brindar los recursos necesarios para llevar a cabo esta investigación.

Roosevelt García

DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado con todo mi amor y gratitud a mis padres, quienes, con su apoyo incondicional y su constante motivación, me han dado la fortaleza para alcanzar este logro. A mis profesores y mentores, cuyas enseñanzas han guiado mi camino académico, y a mis amigos, por compartir muchas cosas inolvidables.

Especialmente dedico este trabajo a mis padres quien siempre ha creído en mí y ha sido mi mayor fuente de inspiración.

Roosevelt García

AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a todas personas que su contribución fue fundamental para alcanzar este logro. En primer lugar, a mi familia quienes, con su apoyo inquebrantable, amor y fe en mí han sido mi mayor impulso a lo largo de este recorrido. Gracias por brindarme el aliento necesario en los momentos más difíciles y por estar siempre a mi lado.

A mi tutor y profesores, les agradezco por su dedicación y por compartir su conocimiento. Su orientación me ha permitido superar obstáculos y avanzar en mi crecimiento académico y personal.

A mis amigos y compañeros, quienes me acompañaron en este trayecto. Con ustedes, los desafíos se hicieron más llevaderos y los logros más significativos.

Finalmente, agradezco a la universidad técnica de Cotopaxi por brindarme los recursos necesarios para llevar a cabo este proyecto y por ser el espacio donde he podido formarme académicamente y desarrollar mis capacidades.

Marlon Pillisa

DEDICATORIA

Dedico este trabajo, en primer lugar, a mis padres, cuyo amor incondicional y apoyo constante han sido el motor que me impulso a seguir adelante haciendo posible que llegue hasta aquí, y este logro es tanto suyo como mío.

A mis mentores, por haber sido fuente de conocimiento que me han permitido crecer no solo académicamente, sino también como persona. A mis amigos, por apoyo a lo largo de este viaje, que juntos superamos obstáculos, aprendimos de nuestras fortalezas y debilidades, y celebramos cada pequeño triunfo.

Marlon Pillisa

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERIA Y APLICADAS
INGENIERIA ELECTROMECAÁNICA

TITULO: “SIMULACIÓN NUMÉRICA Y EXPERIMENTAL DE UNA TURBINA DE TORNILLO DE ARQUÍMEDES FABRICADA EN 3D PARA OPTIMIZAR SU RENDIMIENTO EN ENERGÍA HIDROKINÉTICA”

Autores

Garcia Guano Roosevelt Israel

Pillisa Rocha Marlon Humberto

RESUMEN

Este proyecto se lleva a cabo en la provincia de Cotopaxi en el sector Alpamala-Salcedo, con el objetivo de diseñar y experimentar un prototipo de turbina hidráulica tornillo de Arquímedes para generación de energía a menor escala. Se emplearon herramientas de simulación CAD y CFD (SolidWorks) y tecnología de impresión 3D, lo que permitió crear un diseño personalizado del tornillo de Arquímedes con un diámetro de 0,2 m, una longitud de 0,4 m, 2 números de alabes con una inclinación de 42° y un ángulo de inclinación del tornillo de 30° para un correcto funcionamiento, proceso que tomó 34 horas de impresión con el filamento PLA. El uso de simulación de dinámica de fluidos (CFD) se utilizó para analizar el comportamiento y presión del agua por la superficie helicoidal del tornillo, siendo un método efectivo para estimar el rendimiento de la turbina. Los resultados indicaron que el tornillo de Arquímedes en simulación con condiciones controladas gira a 146 rev/min, mientras que con el prototipo experimental gira a 160 rev/min, indicando una correlación entre ambas pruebas. Los costos de fabricación estimados entre material, mano de obra y gastos indirectos suman un valor de 406,5 USD, haciendo que la tecnología 3D sea una forma viable para realizar validación de prototipos gracias a su flexibilidad para realizar modificaciones durante el proceso de impresión significando un ahorro económico dentro del proceso de fabricación del prototipo.

Este sistema de energía renovable aprovecha pequeños saltos de agua y bajos caudales, permitiéndose operar en distintas variaciones, siendo una opción rentable si se desea generar energía de forma autónoma y eco amigable con el medio ambiente.

Palabras clave: caudal, turbina, prototipo, simulación, energía.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI
FACULTY OF ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES
ELECTROMECHANICAL ENGINEERING

TITLE: “NUMERICAL AND EXPERIMENTAL SIMULATION OF AN ARCHIMEDES SCREW TURBINE MANUFACTURED IN 3D TO OPTIMIZE ITS PERFORMANCE IN HYDROKINETIC ENERGY”

Authors

Garcia Guano Roosevelt Israel
Pillisa Rocha Marlon Humberto

ABSTRACT

This project is carried out in the province of Cotopaxi in the Alpama-Salcedo sector, with the aim of designing and testing a prototype of an Archimedes screw hydraulic turbine for smaller-scale power generation. CAD and CFD (SolidWorks) simulation tools and 3D printing technology were used, which allowed to create a custom design of the Archimedes screw with a diameter of 0.2 m, a length of 0.4 m, 2 blade numbers with an inclination of 42° and a screw inclination angle of 30° for correct operation, a process that took 34 hours of printing with the PLA filament. The use of fluid dynamics simulation (CFD) was used to analyze the behavior and pressure of the water by the helical surface of the screw, being an effective method to estimate the performance of the turbine. The results indicated that the Archimedes screw in simulation with controlled conditions rotates at 146 rev/min, while with the experimental prototype it rotates at 160 rev/min, indicating a correlation between both test. Estimated manufacturing costs between material, labor, and overhead add up to \$406.5, making 3D technology a viable way to perform prototype validation thanks to its flexibility to perform modifications during the printing process meaning economic saving within the prototype manufacturing process.

This renewable energy system takes advantage of small waterfalls and low flows, allowing it to operate in different variations, being a profitable option if you want to generate energy autonomously and eco-friendly with the environment.

Keywords: Flow, turbine, prototype, simulation, energy.

AVAL DE TRADUCCIÓN


En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que:

La traducción del resumen al idioma Inglés de la propuesta tecnológica cuyo título versa: **“SIMULACIÓN NUMÉRICA Y EXPERIMENTAL DE UNA TURBINA DE TORNILLO DE ARQUÍMEDES FABRICADA EN 3D PARA OPTIMIZAR SU RENDIMIENTO EN ENERGÍA HIDROCINÉTICA”** presentado por: **García Guano Roosevelt Israel y Pillisa Rocha Marlon Humberto** egresados de la Carrera de: **Ingeniería Electromecánica**, perteneciente a la **Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas**, lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer uso del presente aval para los fines académicos legales.

Latacunga, Agosto del 2024.

Atentamente,



Mg. Marco Paúl Beltrán Semblantes

DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS-UTC

CC: 0502666514



**CENTRO
DE IDIOMAS**

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN.....	10
1.1 ANTECEDENTES	10
1.2 EL PROBLEMA.....	11
1.2.1 Situación Problemática	11
1.2.2 Formulación del problema.....	11
1.3 OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN	12
1.4 BENEFICIARIOS	12
1.4.1 Beneficiarios Directos:	12
1.4.2 Beneficiarios Indirectos:.....	12
1.5 JUSTIFICACIÓN.....	13
1.6 OBJETIVOS	14
1.6.1 General.....	14
1.6.2 Específicos.....	14
1.6.3 Sistemas de tareas en relación a los objetivos planteados	15
2. MARCO TEÓRICO	16
2.1 RECURSO HÍDRICO	16
2.1.1 Energía Hidráulica.....	16
2.2 SISTEMAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA.....	17
2.3 CENTRALES HIDROELÉCTRICAS	18
2.3.1 Componentes principales.....	18
2.3.2 Grandes Centrales Hidroeléctricas	19
2.3.3 Medianas Centrales Hidroeléctricas	19
2.3.4 Pequeñas y Micro Centrales Hidroeléctricas.....	19
2.3.5 Pico-Centrales Hidroeléctricas	20
2.4 TIPO DE CENTRALES.....	21
2.4.1 Central con embalse.....	21

2.4.2 Central de agua fluyente	21
2.4.3 Centrales Mareomotrices	22
2.5 MÁQUINAS DE FLUIDO	22
2.5.1 Máquinas Hidráulicas	22
2.5.1.1 Clasificación de las turbomáquinas	23
2.6 TURBINAS HIDRÁULICAS	23
2.6.1 Según la variación de presión estática	24
2.6.1.1 Turbinas de acción y reacción	24
2.6.2 Según la dirección de entrada del agua	24
2.6.3 Tipos de turbinas hidráulicas	25
2.6.3.1 Turbina Pelton	25
2.6.3.2 Turbina Francis	25
2.6.3.3 Turbina de hélice o Kaplan	25
2.7 TURBINA DE ARQUÍMEDES	26
2.7.1 Principio de funcionamiento.....	27
2.7.2 Componentes del tornillo de Arquímedes	27
2.7.3 Características de la turbina.....	28
2.7.4 Ventajas y desventajas	29
2.8 HERRAMIENTAS	30
2.8.1 Modelo por deposición fundida (FMD)	30
2.8.2 Estereolitografía (SLA)	31
2.8.3 Sinterización selectiva por láser (SLS).....	31
2.8.4 Tipos de filamento para impresión 3D	31
3. METODOLOGÍA.....	32
3.1 DECLARACIÓN DE VARIABLES	32
3.1.1 Variable independiente	32
3.1.2 Variable dependiente.....	32
3.2 METODOLOGIA DE DISEÑO	32

3.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS	33
3.3.1 Análisis de requerimiento	33
3.4 INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN	33
3.4.1 Tacómetro.	33
3.4.2 SolidWorks 2022	34
3.4 VARIABLE.....	34
3.4.1 Determinación de la velocidad	34
3.4.2 Área del caudal	35
3.4.3 Determinación del caudal	35
3.4.4 Perdidas de fricción en el canal	36
3.4.5 Presión del agua.....	36
3.4.5.1 Masa del agua	37
3.4.5.2 Peso específico	37
3.4.6 Potencia hidráulica	37
3.5 PARAMERTROS DISEÑO DEL TORNILLO	38
3.5.1 Geometría del tornillo.....	39
3.5.1.1 Avance del tornillo.....	40
3.5.1.2 Longitud del tornillo	40
3.5.2 DESARROLLO DE LA HELICE	41
3.5.2.1 Área de contacto	41
3.5.2.2 Área frontal del tornillo	42
3.6.2.3 Hallando la Área y ubicación del centroide.....	42
3.5.3 Fuerzas en el tornillo	43
3.5.3.1 Fuerzas del agua en dirección del tornillo.....	44
3.5.3.2 Fuerza de empuje.....	44
3.5.3.3 Fuerza del agua en dirección tangencial	45
3.5.3.4 Torque.....	45
3.5.4 Velocidad angular	45
3.5.5 Potencia teórica.....	46
3.5.5.1 Potencia máxima teórica.....	47

3.5.6 Velocidad inicial	48
3.5.7 Revoluciones	48
3.5.8 Eficiencia	48
3.5.8 Método de selección de materiales	48
3.5.9 Selección de chumaceras	50
3.5.10 Selección de pernos	50
3.5.11 Materiales	50
3.6 ESTRUCTURA DEL MODELADO DE UNA SIMULACION EN SOLID WORKS ..	51
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	53
4.1 CÁLCULOS DE CAMPO	53
4.1.1 Velocidad del agua.....	53
4.1.2 Área del caudal	53
4.1.3 Determinación del caudal	53
4.1.4 Pérdida de fricción.....	54
4.1.5 Presión del agua.....	54
4.1.5.2 Peso específico	54
4.1.6 Potencia hidráulica	54
4.1.8 Velocidad de rotación máxima Revoluciones por minuto	54
4.1.9 Velocidad angular	54
4.1.10 Par Motor/ Torque.....	55
4.2 CALCULOS DEL TORNILLO DE ARQUÍMEDES	55
4.2.1 Desarrollo del tornillo.....	55
4.2.1.1 Paso del tornillo.....	55
4.2.1.2 Área del alabe.....	55
4.2.1.3 Inercia del alabe	56
4.2.1.4 Fuerza de empuje del agua en dirección del plano “X”	56
4.2.1.5 Fuerza de empuje del agua en dirección del plano “Z”	56
4.2.1.6 Torque.....	56
4.2.1.7 Velocidad angular	56

4.2.1.8 Potencia teórica.....	56
4.2.1.9 Velocidad lineal	56
4.2.1.10 Número de revoluciones	57
4.2.1.11 Eficiencia.....	57
4.2.1.12 Eje de transmisión	57
4.2.1.13 Peso del tornillo.....	57
4.3 DIAGRAMA DE REACCIONES Y MOMENTOS EN EL EJE	57
4.4 DISEÑO DE LA TURBINA	59
4.4.1 Número de hilos	59
4.4.2 Base del tornillo.....	61
4.4.3 Base soporte patas	62
4.4.4 Base soporte rodamiento	62
4.4.5 Eje de transmisión y tornillo de Arquímedes.....	63
4.4.6 Análisis de simulación.....	64
4.4.6.1 Simulación CFD.....	64
4.4.6.2 Análisis de Tensiones.....	65
4.4.6.3 Análisis de Deformaciones	65
4.4.6.4 Análisis de factor de seguridad	66
4.5 DIMENSION DEL TORNILLO DE ARQUÍMEDES	68
4.5.1 Rendimiento de la turbina.....	69
4.6 ANÁLISIS ECONÓMICO	70
5. IMPACTOS	72
5.1 IMPACTO TECNOLÓGICO	72
5.2 IMPACTOS AMBIENTALES.....	73
5.3 IMPACTOS ECONÓMICOS	73
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	73
6.1 CONCLUSIONES.....	73
6.2 RECOMENDACIONES	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Diagrama de Ishikawa.....	12
Figura 2.1. Concentración de centrales hidroeléctricas en Ecuador.....	17
Figura 2.2. Fases de generación de energía.....	17
Figura 2.3. Fuentes de energía.....	18
Figura 2.4 Tornillo de Arquímedes.....	20
Figura 2.5 Componentes de una central de embalse.....	21
Figura 2.6. Central de agua fluyente.....	21
Figura 2.7. Central mareomotriz.....	22
Figura 2.8 Rango de aplicación de las turbinas.....	23
Figura 2.9 (a) Acción.....	24
Figura 2.9 (b) Reacción.....	24
Figura 2.10 Turbina Pelton.....	25
Figura 2.11 Turbina Francis.....	25
Figura 2.12 Turbina Kaplan.....	26
Figura 2.13 Tornillo de Arquímedes.....	26
Figura 2.14 Vista de corte de un tornillo de Arquímedes.....	27
Figura 2.15 Eficiencia de las turbinas a diferentes caudales.....	29
Figura 2.16 Modelo de impresora 3D.....	31
Figura 3.1 Fase de diseño de la turbina.....	32
Figura 3.2 Tacómetro.....	33
Figura 3.3 Método de flotamiento.....	35
Figura 3.4 Ángulos de inclinación del tornillo de Arquímedes.....	38
Figura 3.5 Modelo de turbina tipo tornillo de 2 hilos.....	39
Figura 3.6 desarrollo de la hélice.....	41
Figura 3.7 Área de contacto del agua con las hélices.....	41
Figura 3.8 (a) y (b) Inercia en la superficie de las hélices.....	41

Figura 3.9 Centroide del tornillo.	42
Figura 3.10 diagrama de fuerzas en plano xy.	43
Figura 3.11 diagrama de fuerzas plano xz.	44
Figura 3.12 Triangulo de velocidades.	46
Figura 3.13 Medidas de la chumacera seleccionada [27].	50
Figura 4.1 Dimensión del eje.	57
Figura 4.2 Diagrama de fuerzas.	58
Figura 4.3 diagrama de momentos máximos.	58
Figura 4.4 Análisis sobre el número de alabes.	59
Figura 4.5 Puntos de análisis del tornillo.	60
Figura 4.6 Comportamiento de presión según el número de hilos.	60
Figura 4.7 Comportamiento de la velocidad según el número de hilos.	61
Figura 4.8 Base del tornillo.	62
Figura 4.9 Soporte.	62
Figura 4.10 Soporte rodamientos.	63
Figura 4.11 Eje y tornillo de Arquímedes.	63
Figura 4.12 Ingreso del modelado en archivo STL.	63
Figura 4.13 proceso de fabricación del tornillo.	64
Figura 4.14 Comportamiento del agua en simulación CFD.	65
Figura 4.15 Comportamiento del agua a lo largo del tornillo.	65
Figura 4.16 Tensiones de esfuerzo de Von Mises.	65
Figura 4.17 Deformaciones del tornillo.	66
Figura 4.18 Análisis de factor de potencia hélice.	66
Figura 4.19 Análisis de factor de seguridad – Eje.	67
Figura 4.20 Rendimiento de la turbina en base al caudal.	69
Figura 4.21 Eficiencia de la turbina en base a la potencia.	70

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Sistema de tareas en relación a los objetivos planteados.....	15
Tabla 2.1 Centrales según la potencia instalada [10].....	19
Tabla 2.2 Centrales según el salto disponible [10].	20
Tabla 2.3 Tipos de turbomáquinas [1].	23
Tabla 2.4 Turbinas según la dirección de entrada de agua [14].....	24
Tabla 2.5. ventajas y desventajas.....	30
Tabla 2.6. Filamentos para impresión 3D.....	31
Tabla 3.1 Variables independientes.....	32
Tabla 3.2 Variables dependientes.....	32
Tabla 3.3 Análisis de requerimiento.	33
Tabla 3.4 toma de medidas de velocidad.	34
Tabla 3.5 Coeficiente de Manning [23].	36
Tabla 3.6 Angulo de inclinación óptimo [25].	39
Tabla 3.7 Propiedades de superficies planas [18].	42
Tabla 3.8 Ubicación de los centroides [18].	42
Tabla 3.9 Formulas para determinar el área de contacto [18].	43
Tabla 3.10 Tipos de material.....	49
Tabla 3.11 Tubería estructural cuadrada [26].	50
Tabla 3.12 Materiales.	51
Tabla 4.1 Velocidad del agua.	53
Tabla 4.2 Velocidad del agua.	53
Tabla 4.3 Caudal disponible.	53
Tabla 4.4 Perdidas de fricción.	54
Tabla 4.5 Presión del agua.	54
Tabla 4.6 Peso específico del agua.	54
Tabla 4.7 Potencia hidráulica.....	54
Tabla 4.8 Numero de revoluciones.	54
Tabla 4.9 Velocidad angular.....	54

Tabla 4.10 Torque.	55
Tabla 4.11 Datos del tornillo.	55
Tabla 4.12 Paso del tornillo.	55
Tabla 4.13 Área del alabe.	55
Tabla 4.14 Inercia del alabe.	56
Tabla 4.15 Fuerza del agua en dirección del plano “X”.	56
Tabla 4.16 Fuerza del agua en dirección “Z”.	56
Tabla 4.17 Torque.	56
Tabla 4.18 Velocidad angular.	56
Tabla 4.19 Potencia teórica.	56
Tabla 4.20 Velocidad lineal.	56
Tabla 4.21 Velocidad lineal.	57
Tabla 4.22 Eficiencia.	57
Tabla 4.23 Datos del eje.	57
Tabla 4.24 Peso del tornillo.	57
Tabla 4.25 Reacciones en el eje.	58
Tabla 4.26 Fuerzas extremas	58
Tabla 4.27 Estrés extremos.	58
Tabla 4.28 Parámetros de simulación.	64
Tabla 4.28 Parámetros sobre el tornillo de Arquímedes.	68
Tabla 4.29 Resultados.	68
Tabla 4.30. Análisis económico de la fabricación de la turbina	70
Tabla 4.31 Gastos directos.	70
Tabla 4.32 Datos previos experimentales.	71
Tabla 4.33 Análisis económico de desarrollo de pruebas.	71
Tabla 4.34 Datos previos experimentales.	71
Tabla 4.35 Análisis económico total.	72

1. INTRODUCCIÓN

1.1 ANTECEDENTES

Actualmente, el desarrollo tecnológico avanza en constante evolución, tal es el caso de la generación de energía eléctrica. En el Ecuador, la energía hidráulica destaca como una tecnología limpia, cubriendo el 92% de la generación eléctrica. Sin embargo, en el país existen zonas sin el servicio en las cuales realizar instalaciones de redes o líneas eléctricas es imposible. Por lo tanto, en la búsqueda de soluciones sostenibles para satisfacer las demandas energéticas en dichos entornos, la autogeneración eléctrica emerge como una solución prometedora, optando como mejor alternativa la micro hidráulica, que puede aprovechar menor cantidad y fuentes que existen de agua para ofrecer un servicio de generación eléctrica.

Según Santa Cruz José en el año 2018, quien realizó su proyecto de titulación “Análisis energético de un Tornillo de Arquímedes para canales de regadío con una caída de 2m y caudal de $2\text{m}^3/\text{s}$ ”, menciona sobre el impacto energético que tendría la generación de energía eléctrica por medio de la micro hidráulica enfocado para caudales y saltos de agua bajos (ríos, canales de regadío). Estableciendo que la turbina tipo tornillo de Arquímedes puede operar en diversos ángulos de inclinación destacando la durabilidad y eficiencia de la turbina construida con los elementos necesarios en comparación con otro tipo de turbinas hidráulicas, siendo así una opción más rentable para aprovechar los recursos hídricos a pequeña escala [1].

Para Lucio Yugsi, mediante el diseño y construcción de una mini turbina tipo tornillo de Arquímedes para ser instalada en canales primarios abiertos y generar energía mecánica, obtuvo como resultado la obtención de un torque entre 15 a 25 Nm y potencia entre 335 a 380 W, resaltando que en las pruebas experimentales logró una mayor velocidad por parte del agua. Por lo que, destaca que los niveles de potencia y de torque se pueden adecuar para generar la energía requerida, tomando en cuenta los parámetros de la zona de implementación y por ende el diseño y materiales de la turbina tipo tornillo de Arquímedes [2].

Barreto y Ramos, evaluaron la influencia del ángulo de inclinación y cómo influye en el rendimiento de una turbina tipo tornillo de Arquímedes, logrando determinar parámetros cualitativos del diseño de la turbina considerando el flujo de agua que ingresaría hasta cubrir el 50% del área del tornillo. Dando como resultado que el comportamiento de la potencia eléctrica que se genera respecto al ángulo de inclinación es proporcional, siendo una alternativa considerable para la autosuficiencia eléctrica como fuente de energía renovable [3].

1.2 EL PROBLEMA

1.2.1 Situación Problemática

En el panorama actual, en la búsqueda de soluciones innovadoras para mejorar la generación de energía es crucial para disminuir la carencia de acceso a servicios eléctricos en diversas zonas o regiones. Esta necesidad surge debido a factores como la lejanía geográfica, la falta de infraestructuras o la demanda de opciones energéticas descentralizadas. En respuesta a estos desafíos, este proyecto de investigación se embarca en la tarea de diseñar y evaluar una turbina tipo tornillo de Arquímedes a menor escala, presentándola como una solución innovadora y adaptable a diversos escenarios y necesidades energéticas reducidas.

El objetivo es desarrollar un modelo más compacto y adaptable que pueda ofrecer las mismas ventajas de generación de energía, pero a menor escala logrando que su uso se amplie en una gama de aplicaciones y entornos, pretendiendo fomentar el desarrollo socioeconómico al mejorar la calidad de vida y respaldar las actividades productivas.

La turbina de tornillo de Arquímedes se revela como una solución ideal para capturar la energía cinética producida del flujo del fluido. Inicialmente, se emplea la simulación numérica como un medio para modelar virtualmente la turbina en un entorno tridimensional, permitiendo explorar las configuraciones, geometrías y parámetros operativos para asegurar que la versión a menor escala mantenga una buena eficiencia y fácil operación. Mientras en la fase experimental, se probará físicamente un prototipo del diseño, obteniendo valores prácticos que garantizan a la turbina como una alternativa viable y autónoma para suplir las necesidades energéticas locales donde las versiones de mayor tamaño no son prácticas.

En resumen, este proyecto no solo busca superar las limitaciones actuales en el tamaño en las turbinas tipo tornillo de Arquímedes, ofreciendo a cualquier individuo una alternativa de diseño que amplie su aplicabilidad facilitando la integración de estas turbinas en diversos escenarios, permitiendo mayor accesibilidad en la generación de energía independiente.

1.2.2 Formulación del problema

Limitación de diseños a menor escala de turbinas hidráulicas capaces de generar energía a partir de bajos caudales.

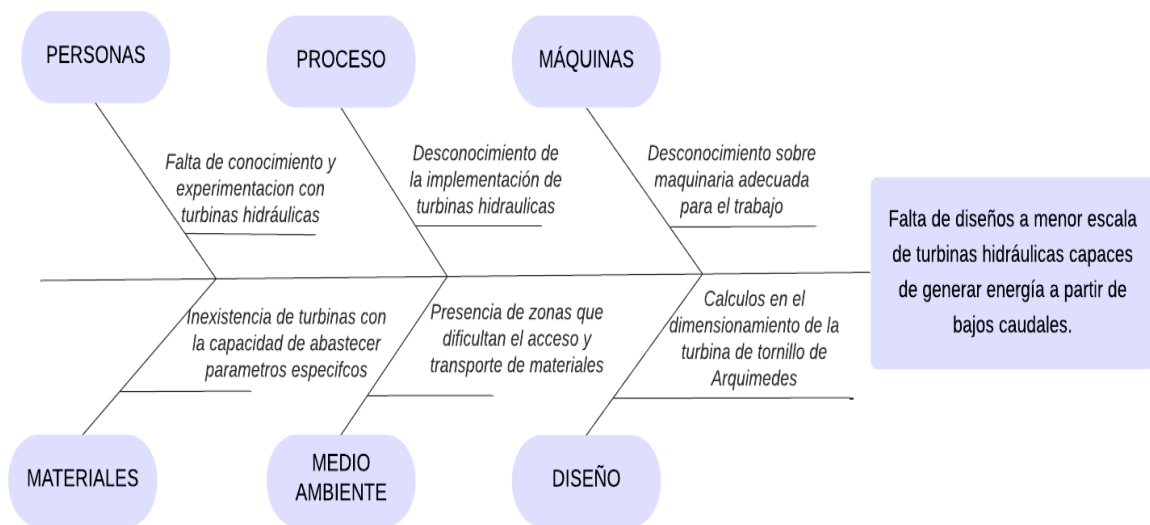


Figura 1.1. Diagrama de Ishikawa.

1.3 OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN

Objeto de Investigación: Turbina de Tornillo de Arquímedes

Campo de Acción: 330000 Ciencias Tecnológicas / 3313 Tecnología E Ingeniería Mecánicas / 3313.15 Diseño de Máquinas y 3313.30 Turbinas [4]

1.4 BENEFICIARIOS

1.4.1 Beneficiarios Directos:

El presente proyecto beneficiara a los estudiantes autores para la obtención del título de tercer nivel de la carrea de ingeniería electromecánica, además de comunidades, áreas remotas y usuarios individuales que carecen de suministro eléctrico confiable.

1.4.2 Beneficiarios Indirectos:

Los beneficiarios indirectos son las autoridades y gobiernos locales, investigadores, agencias de desarrollo y estudiantes, ya que la generación de electricidad sostenible podrá impulsar el desarrollo económico y social en la región. Así también, podrían encontrar en este proyecto un estudio relevante, orientando futuras iniciativas hacia soluciones sostenibles contribuyendo a la mitigación del cambio climático y promoviendo practicas energéticas más limpias.

1.5 JUSTIFICACIÓN

El presente proyecto se fundamenta en la necesidad de abordar la falta de diseños a escala de turbinas tipo tornillo de Arquímedes en comparación con las versiones de gran tamaño que actualmente dominan los mercados. Aunque estas turbinas han demostrado ser eficientes en la generación de energía en diferentes proyectos, su aplicación a menor escala se ve limitada debido a la escasa disponibilidad de diseños adecuados para entornos específicos.

La elección de diseñar un prototipo de turbina tipo tornillo de Arquímedes se justifica por su capacidad única de adaptarse a entornos con recursos hídricos limitados creciendo su demanda como solución energética renovable. Esta tecnología, tiene como objetivo ser un aporte científico y experimental que guie futuros proyectos relacionados con crear mejoras o implementaciones, encontrado soluciones sostenibles y eficientes con el medio ambiente.

Aunque bien establecida en aplicaciones industriales y comerciales a gran escala, necesita ser explorada y adaptada para usos más módicos, donde el espacio, el costo y la flexibilidad son consideradas cruciales. Sin embargo, actualmente existe escasa información sobre esta tecnología, por lo que, la investigación se proyecta no solo como un aporte al conocimiento académico en el campo de la energía sostenible, sino también como una contribución tangible a la mejora de las condiciones de vida en comunidades que enfrentan retos similares aspirando un cambio positivo y duradero para el desarrollo de las zonas.

En resumen, el presente proyecto contempla el diseño de un prototipo de turbina hidráulica tipo tornillo de Arquímedes, un modelo capaz de aprovechar saltos y corrientes de agua más suaves a comparaciones de otras turbinas. Esto implica un riguroso estudio y experimentación con la turbina, proporcionando un aporte científico valioso para futuros proyectos, al probar y validar conceptos antes de su implementación a mayor escala.

1.6 OBJETIVOS

1.6.1 General

Fabricar un prototipo de turbina hidráulica tipo tornillo de Arquímedes mediante parámetros de diseño en impresión 3D para evaluar su funcionamiento a menor escala.

1.6.2 Específicos

- Utilizar información de fuentes confiables para asegurar el correcto desarrollo de la turbina.
- Diseñar una turbina de tornillo de Arquímedes utilizando tecnología CAE y de impresión 3D.
- Realizar pruebas experimentales para comparar los resultados obtenido mediante simulaciones y el prototipo de la turbina.

1.6.3 Sistemas de tareas en relación a los objetivos planteados

Tabla 1.1 Sistema de tareas en relación a los objetivos planteados

Objetivos específicos	Actividades (tareas)	Resultados esperados	Técnicas, Medio e Instrumentos
Utilizar información de fuentes confiables para asegurar el correcto desarrollo de la turbina.	-Análisis de documentación relacionada con las turbinas de tornillo Arquímedes. -Investigación y análisis practica del tipo de turbinas y similares, obteniendo datos sobre dimensiones y geometría de la turbina adaptado a condiciones particulares.	-Fundamentación científica sobre el diseño de la turbina, características clave y mejores prácticas en el diseño de turbinas de este tipo.	-Investigación bibliográfica. -Investigación de campo.
Diseñar una turbina de tornillo de Arquímedes utilizando tecnología CAE y de impresión 3D.	-Preparación y estudio de la condición al que se adaptara la turbina. -Configuración de parámetros y datos técnicos para la simulación de la turbina con los elementos de diseño en SolidWorks.	-Obtención de datos y diseño de la turbina tipo tornillo de Arquímedes. -Desarrollar y simular un diseño experimental con una condición de corrientes de agua.	-Software de diseño. -Cálculos matemáticos. -Equipos de medición.
Realizar pruebas experimentales para comparar los resultados obtenido mediante simulaciones y el prototipo de la turbina.	-Fabricación de un prototipo de turbina a pequeña escala y recopilar información sobre la turbina hidráulica. -Comparación con los resultados simulados y experimentales para recopilar datos sobre el rendimiento de la turbina.	-Modelo 3D de la turbina para simulaciones CFD. -Analizar el comportamiento del flujo de agua alrededor de la turbina. -Determinar el modelo como un sistema de energía renovable autónomo.	-Software de diseño. -Diseño de la turbina. -Prototipo experimental. -Pruebas experimentales.

2. MARCO TEÓRICO

Actualmente, la necesidad de desarrollar tecnologías de generación de energía adaptadas a las necesidades específicas de cada usuario ha impulsado la adopción de sistemas de autogeneración debido al aumento en los costos de energía eléctrica, además, buscado así reducir emisiones de CO₂ y controlar sus gastos energéticos mediante la instalación de sistemas renovables de energía.

2.1 RECURSO HÍDRICO

El agua (H₂O) es un fluido que se estima cubre el 75% de la superficie terrestre. Se considera un recurso clave y vital en el desarrollo y evolución de la vida del planeta. Es importante conocer que el agua se presenta en los estados: sólido, líquido y gaseoso, los cuales se encuentran en constantes cambios de una forma u otra. Mayormente se puede encontrar el agua en estado líquido siendo una fuente renovable que se ha aprovechado de diversas maneras a lo largo de la historia.

La utilización de este recurso no necesariamente requiere que sea extraída de su medio natural, sino que una vez utilizada vuelve a su lugar, dentro de este tipo de usos destacan [5]:

- Usos recreativos.
- De navegación.
- Uso ambiental y tecnológico.
- Uso energético.

2.1.1 Energía Hidráulica

El agua una fuente de energía renovable, limpia y autóctona, que depende de las condiciones climatológicas. Aprovecha la energía potencial del agua acumulada en los saltos de agua, la cual mediante instalaciones hidroeléctricas la transforma en energía eléctrica. Su eficiencia depende de la cantidad de agua disponible y topografía del lugar, cabe destacar que la energía hidráulica representa gran parte de la producción de electricidad mundial con bajos niveles de impactos ambientales, en consideración la energía hidráulica es más barata y respetuosa con el medio ambiente [6].

En la historia del Ecuador, la matriz energética ecuatoriana se ha basado en recursos no renovables como los combustibles fósiles, pero a medida que el tiempo avanza las fuentes hidráulicas han tenido un mayor impacto y participación dentro del mismo [6].

Actualmente, la energía hidráulica se destaca como su fuente principal de producción de energía al poseer terrenos montañosos y diversos como ríos, lagos, lagunas, etc., lo que ha hecho posible aprovechar las condiciones que presentan, dando paso a la creación de numerosas hidroeléctricas en el país.

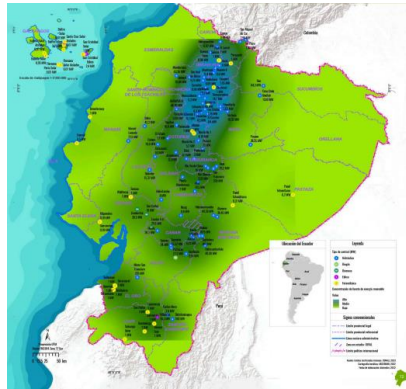


Figura 2.1. Concentración de centrales hidroeléctricas en Ecuador.
Fuente: [7].

En la **Figura 2.1.** se observa un análisis representando con color azul, la concentración de infraestructuras de generación hidroeléctrica en su mayor parte ubicadas en la región Sierra.

La energía hidráulica a comparación de otras fuentes de energía, no es contaminante, es acumulable y reutilizable, prácticamente inagotable.

2.2 SISTEMAS DE GENERACIÓN DE ENERGÍA

Son dispositivos o instalaciones diseñadas con el fin de convertir diversas fuentes de energía (eólica, hidráulica, térmica, etc.) en energía. Pueden llegar a ser a gran escala o micro escala pero su función principal es satisfacer las demandas energéticas de la sociedad. Para la generación de energía se puede identificar 4 fases como lo muestra la **Figura 2.2.**

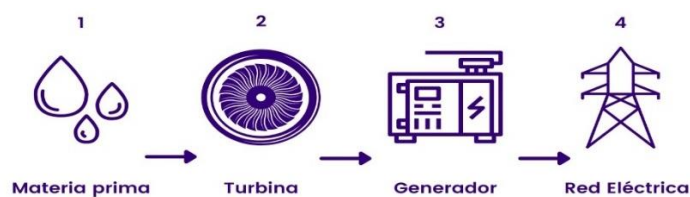


Figura 2.2. Fases de generación de energía.
Fuente:[8].

La energía se puede generar de muchas maneras, dependiendo de la materia prima o tecnología que se utilice, también, tienen un impacto significativo en el medio ambiente, la economía y la seguridad energética, el cual, con el avance del desarrollo tecnológico han surgido sistemas más eficientes, limpios y sostenibles, enfocados cada vez más en reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y minimizar el agotamiento de recursos naturales.

Los sistemas de generación de energía basan su funcionamiento en dos tipos de fuentes: renovables y no renovables, mismo que se presentan en la **Figura 2.3**.

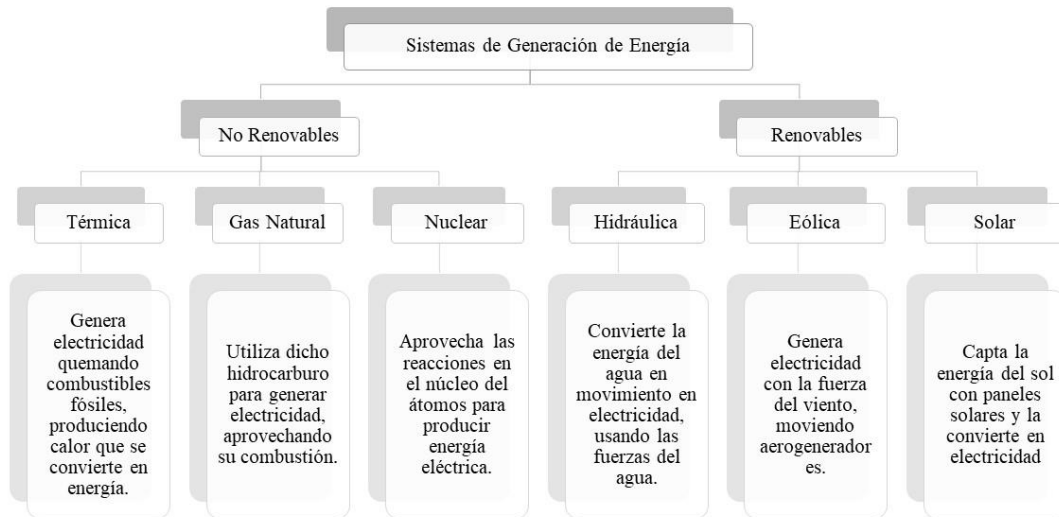


Figura 2.3. Fuentes de energía.

2.3 CENTRALES HIDROELÉCTRICAS

Una central hidroeléctrica se considera a la complementación y uso de turbinas acopladas a generadores con los que se convertirá las masas de agua en movimiento que circulan por los ríos en energía eléctrica mediante dicha instalación. Posterior a este proceso, el agua regresa a las condiciones en las que se vea utilizada por otra central que se sitúe aguas abajo, sea también para consumo, o que siga el camino del río [9].

2.3.1 Componentes principales

Cada elemento que conforma una central, tiene una función y capacidad para la generación de energía eléctrica, estos son [9]:

- Embalse y presa: contiene el agua almacenada con el fin de aprovechar este recurso.
- Sala de máquinas: mantiene los elementos de control y regulación de la central.
- Turbina: convierte la energía cinética producida por el agua en energía mecánica.
- Alternador o generador: transforma a energía mecánica en energía eléctrica.
- Conducciones: dirige la corriente de agua en dirección de la turbina.

2.3.2 Grandes Centrales Hidroeléctricas

Poseen presas y embalses de gran tamaño con la capacidad de almacenar grandes cantidades de agua para generar energía eléctrica a mayor escala. Son implementadas en zonas de gran extensión ya que están destinadas a cubrir grandes demandas en el país.

Pueden afectar indirectamente a comunidades aledañas mediante la modificación de los ecosistemas, así también la pérdida de biodiversidad.

2.3.3 Medianas Centrales Hidroeléctricas

Generalmente requieren presas y embalses de menor tamaño, adecuadas para proporcionar electricidad a ciudades o regiones pequeñas. Sus diseños se enfocan en minimizar el impacto sobre los ecosistemas acuáticos, por lo tanto, su capacidad de generación también será reducida.

2.3.4 Pequeñas y Micro Centrales Hidroeléctricas

No requieren necesariamente embalses, además, son adecuadas para comunidades o aplicaciones generación autónoma. Tienen un impacto social y ambiental relativamente bajo y contribuyen al desarrollo local.

La capacidad de generación es limitada y tiene mayor dependencia de la disponibilidad y estacionalidad del agua a comparación de las grandes y medianes centrales hidroeléctricas.

A continuación, la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) propone una clasificación basada en criterios de potencia y desnivel, ofreciendo una perspectiva estructurada para evaluar y entender la diversidad de sistemas de generación hidroeléctrica, tal como muestran las tablas 2.1 y 2.2.

Tabla 2.1 Centrales según la potencia instalada [10].

Clase	Rango de Potencia
Pico Hidroeléctrica	Hasta 5 kW
Micro Hidroeléctrica	5kW a 100 kW
Pequeña Hidroeléctrica	100 kW a 30 MW
Mediana Hidroeléctrica	30 MW a 100MW
Gran Hidroeléctrica	Más de 100 MW

Los sistemas de generación a micro escala, tienen la función de abastecer de grandes hasta pequeñas zonas de energía, por lo que, son principalmente utilizadas en zonas remotas, donde existas las condiciones para implementar cualquier tipo de central, según sea la necesidad.

Tabla 2.2 Centrales según el salto disponible [10].

Tipo	Rango del salto disponible
Baja Caída	De 1 m a 30 m
Media Caída	De 30 m a 100 m
Alta Caída	Mas de 100 m

2.3.5 Pico-Centrales Hidroeléctricas

Se fundamenta en la producción de energía eléctrica a una escala reducida, configurándose como una fuente de generación eléctrica de dimensiones modestas. Destaca porque incluyen la agilidad en la generación de energía entre 1 a 5 kW, permitiendo el suministro para diversas aplicaciones como la alimentación de equipos electrodomésticos hasta cubrir la demanda energética de una vivienda.

La demanda de energía eléctrica a nivel mundial crece constantemente, presentando crisis energéticas en varios países así también altos índices de contaminación ambiental. Por lo cual, para generar electricidad se han optado métodos de energías renovable, de esta forma poder dar abastecimiento a pequeñas zonas, comunidades o residencias. La pico hidro generación se considera una alternativa viable y accesible de forma ambiental y económica, si se desea producir energía en pequeñas escalas, [11].

Un sistema de pico generación funciona de forma que, transforma la energía potencial del fluido en energía mecánica mediante una turbina hidráulica como primera opción. Son utilizadas cuando hay caudales bajos o canales de ríos que pueden ser desviados y dirigidos a ubicaciones estratégicas para aprovechar el recurso, además de ser un sistema con una mayor confiabilidad, menor costo y de fácil operación. [11].

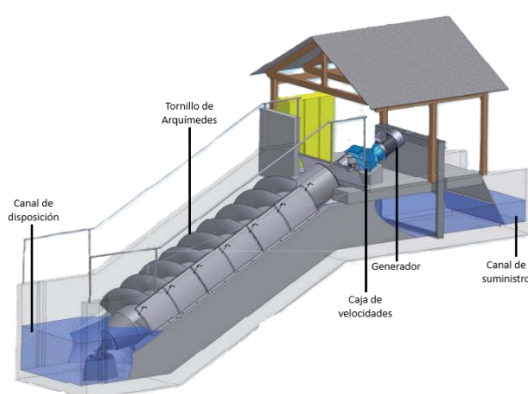


Figura 2.4 Tornillo de Arquímedes.

Fuente:[12]

2.4 TIPO DE CENTRALES

2.4.1 Central con embalse

Considerado también de regulación, este tipo de centrales se entierra una cantidad importante de agua mediante la construcción de una o más presas, como se observa en la **Figura 2.5** [9].

El embalse permite regular la cantidad de agua que pasa en dirección a las turbinas, agua formada por lagunas artificiales. Tiene como objetivo unificar las variaciones temporales de los caudales afluentes en el río, estas centrales tienen un menor costo en la energía generada debido a una mayor inversión en el capital, sin embargo, en centrales con almacenamiento o regulación tienen gran facilidad en poder incrementar la producción energética.



Figura 2.5 Componentes de una central de embalse.
Fuente: [9]

2.4.2 Central de agua fluyente

Se establecen como zonas de almacenamiento que requieren emplear energía hidráulica en el instante en que se dispone de ellas. El caudal suministrado se pierde a medida que las reservas de agua disminuyen con las estaciones del año, tal como muestra la **Figura 2.6** [9].

Existen periodos climatológicos con fuertes precipitaciones (niveles altos de agua), alcanzando el máximo potencial y liberando el exceso de agua. Por otra parte, en épocas de sequía (niveles bajos de agua), la potencia se reduce disminuyendo la producción de energía en ocasiones a casi nada.



Figura 2.6. Central de agua fluyente.
Fuente: [9]

2.4.3 Centrales Mareomotrices

Se conoce como mareomotriz a la energía producida por los mares convertida en electricidad. Funcionan con un tipo embalse tradicional, con la diferencia que el depósito de almacenamiento drena y de igual forma libera el agua del mar, mediante una red de conductores apretados que aumentan la presión hasta que las turbinas generan energía eléctrica [9].

La Figura 2.7 muestra la mejor ubicación para un centro de control de motores marinos es una bahía, lugar por donde el agua del mar entrara. Al tener altos costos en mantenimiento y parámetros especiales limita la propagación de este tipo de centrales.

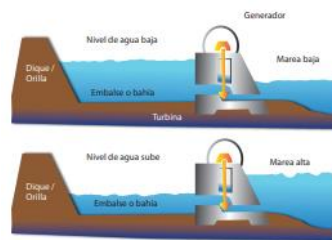


Figura 2.7. Central mareomotriz.
Fuente: [9]

2.5 MÁQUINAS DE FLUIDO

Son sistemas mecánicos que se han utilizado desde tiempos antiguos, poseen la capacidad de convertir el fluido almacenado o que circula a través del sistema en energía mecánica. [13].

Se le asocia al manejo de tanto líquidos como gases, refiriéndose al estudio y análisis de propiedades de los mismos, resultado con un diseño y operación específicos para las propiedades del fluido, así también, como para la función que se espera que realice. Por ejemplo, el tornillo de Arquímedes, es una máquina que su principal uso se consideró la elevación de líquidos, granos, áridos y otros materiales.

2.5.1 Máquinas Hidráulicas

Una turbomáquina data sus orígenes por más de 2000 años, con la rueda y molino de eje vertical nórdico. Son un conjunto de elementos que tienen la capacidad de absorber energía cinética de un fluido y transformarla en energía mecánica. Tienen un alto rendimiento y se estima que pueden aprovechar más del 90% de la energía absorbida. Está formada por una parte fija (distribuidor), otra parte móvil (rodete, rotor) y el difusor, las cuales el fluido atraviesa continuamente [13].

Este tipo de máquinas se especializan en utilizar la energía de los fluidos líquidos para poder realizar un trabajo mecánico. Existen dos tipos: las máquinas hidráulicas de fluidos incomprensibles y las máquinas hidráulicas de fluido comprensible. Por otra parte, existe un subconjunto que se diseñan específicamente para trabajar con fluidos en movimiento (turbomáquinas).

2.5.1.1 Clasificación de las turbomáquinas

Tabla 2.3 Tipos de turbomáquinas [1].

Tipos	Clasificación	Ejemplos
Máquinas hidrostáticas	Se basan en la variación de energía de las presiones de un fluido.	Bombas de engranaje.
Máquinas rotodinámicas o turbomáquinas	Aprovechan las variaciones de energía cinética del fluido cuanto pasa a través de la máquina.	Máquinas motoras.
		Máquinas generadoras.
Máquinas gravimétricas	Utilizan la fuerza de gravedad para producir movimiento en un sistema no equilibrado.	Rueda hidráulica.
		Tornillo de Arquímedes

2.6 TURBINAS HIDRÁULICAS

Las turbinas hidráulicas se clasifican según diversos puntos de vida y para la selección de una primero se basa en la velocidad específica, adicional en la altura, la potencia de salida y velocidad del eje de salida. En la **Figura 2.8** se puede observar las turbinas en alturas: bajas, medias y altas, con la finalidad de selección. Así también, como trabajan las diferentes turbinas de reacción, impulso y maquinas gravitatorias, a diferentes variaciones de caudal [14].

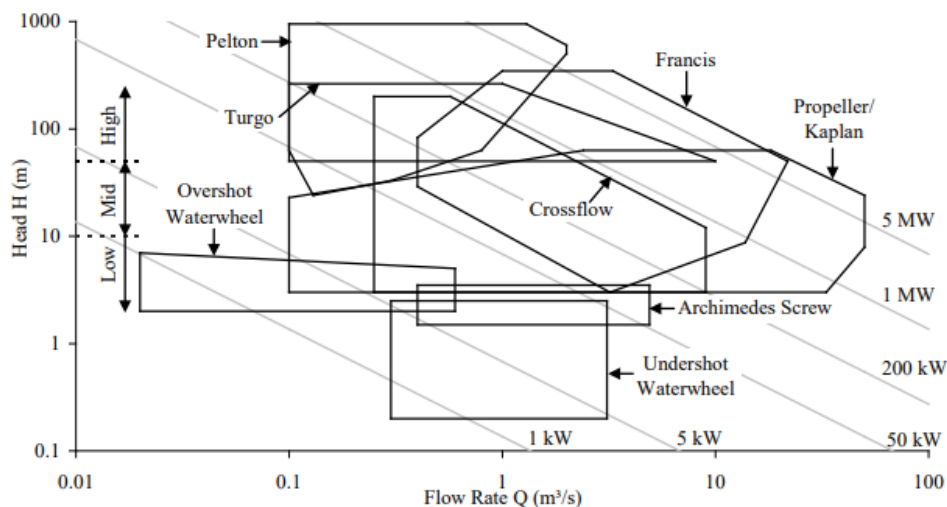


Figura 2.8 Rango de aplicación de las turbinas.

Fuente: [15]

Son empleadas comúnmente en plantas hidroeléctricas, con la función de producir energía eléctrica, a partir de la energía cinética aprovechada del agua, y varían dependiendo de la diferencia de salto y caudal del agua.

2.6.1 Según la variación de presión estática

2.6.1.1 Turbinas de acción y reacción

En las turbinas de acción o impuso el agua fluye comenzando en el distribuidor hacia el rodete a presión atmosférica. La energía cinética producida a base de la energía potencial del salto se envía por medio de la parte móvil. Se puede observar en la **Figura 2.9 (a)** [14].

Mientras en las turbinas de reacción o sobrepresión permite que el agua fluya con una presión inicial, la cual se reduce gradualmente hasta ser nula o negativa, lo que implica que parte de la energía potencial del salto se convierta en energía cinética, mientras que, la otra parte en energía de presión, tal como muestra la **Figura 2.9 (b)** [14].



Figura 2.9 (a) Acción.
Fuente: [14]

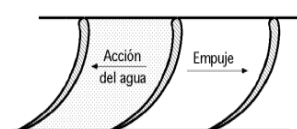


Figura 2.9 (b) Reacción.
Fuente:[14]

2.6.2 Según la dirección de entrada del agua

Tabla 2.4 Turbinas según la dirección de entrada de agua [14].

Tipo	Descripción	Imagen
Axiales	El agua ingresa al eje de forma paralela.	
Radiales	El agua ingresa al eje de forma perpendicular.	
Mixtas	Es una combinación entre la axial y radial.	
Tangenciales	El agua ingresa de forma lateral (turbina Pelton).	

2.6.3 Tipos de turbinas hidráulicas

En la micro generación las turbinas funcionan según diversos parámetros, donde destacan tres tipos: la rueda Pelton, la turbina Francis y la hélice Kaplan.

2.6.3.1 Turbina Pelton

Es de tipo axial y se ocupan para grandes saltos de agua. El agua se transporta por una tubería forzada hacia una boquilla al extremo que han sido reelaborada con el fin de aumentar su eficiencia. Su función consiste en dirigir el agua hacia las cucharas del rotor, ocasionando que la rueda gire para generar energía como se observa en la **Figura 2.10** [16].



Figura 2.10 Turbina Pelton.
Fuente:[17]

2.6.3.2 Turbina Francis

De tipo radial centrípeta, funciona de forma que el agua ingresa por medio de un conducto espiral en dirección al rotor. Su diseño se utiliza para medianos saltos de agua, además, incluyen alabes curvados que permiten tanto la acción de la presión como la del impulso del agua como se muestra en la **Figura 2.11** [16].



Figura 2.11 Turbina Francis.
Fuente: [17]

2.6.3.3 Turbina de hélice o Kaplan

Un tipo de turbina axial con una gran eficiencia, gracias a que se puede ajustar el ángulo de incidencia de las palas. El agua que fluye por su sistema hace que las hélices giren en dos direcciones hacia el eje de rotación. En la **Figura 2.12** se observa que su diseño se basa para bajos saltos de agua y grandes caudales [16].



Figura 2.12 Turbina Kaplan.
Fuente: [17]

2.7 TURBINA DE ARQUÍMEDES

El tornillo de Arquímedes tiene forma helicoidal y fue creada por Arquímedes en el siglo III a.C. Desde su invención se ha usado principalmente para el bombeo con el fin de elevar fluidos, harina, cereales y otros materiales. Se considera como una máquina gravimétrica porque intercambiaba energía potencial en él pasado, actualmente el diseño de esta máquina es especial porque al momento de realizar su función en sentido inverso, es decir, que el agua se desplace horizontalmente hacia abajo empezó a ser de utilidad como una turbina hidráulica logrando generar energía mecánica [18].

Consiste, en una superficie con hélices helicoidales dentro de un cilindro, generalmente se posicionan de forma inclinada, que por la parte superior ingresa en el agua que desciende para producir energía cinética al causar que gire el tornillo. El agua entra de que tal modo que la parte inferior tenga cierta cantidad de agua que garantiza el funcionamiento [18].

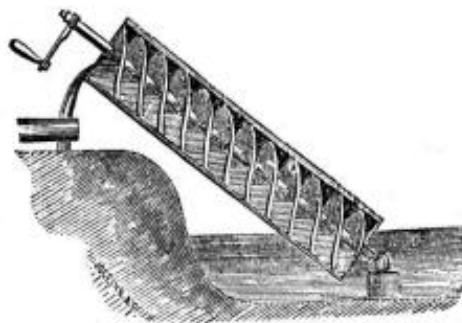


Figura 2.13 Tornillo de Arquímedes.
Fuente: [19]

Actualmente este tipo de turbina empezó a encontrar nuevos horizontes, ya que para la generación de energía puede ser adecuado acorde al dimensionamiento y eficiencia, además, de no causar impactos ambientales en las zonas donde se instalaría y ser una construcción similar a las bombas de tornillo de Arquímedes.

2.7.1 Principio de funcionamiento

Al ser una máquina gravimétrica trabajando como turbina es el agua quien permite que el sistema funcione. El agua ingresa por la parte superior llenando las cavidades del tornillo, desplazándose hacia abajo por la acción del propio peso del agua y la superficie helicoidal que pertenece a la hélice, generado un movimiento giratorio en el tornillo.

De esta forma, la energía potencial del agua se transforma en energía cinética mientras atraviesa el tornillo, a su vez esta energía que se produce mientras gira el tornillo también se transforma, obteniendo energía mecánica.

La energía mecánica, mediante un generador conectado sea de forma directa o indirecta al eje del tornillo se logra transformar en energía eléctrica. La energía generada varía sea por la altura de salto y/o caudal disponible que se distribuye en el sistema como muestra la **figura 2.14**.

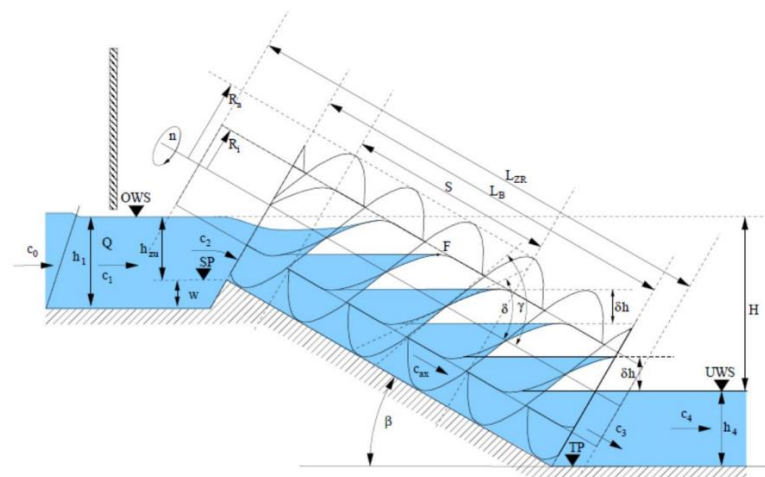


Figura 2.14 Vista de corte de un tornillo de Arquímedes.

Fuente: [20]

2.7.2 Componentes del tornillo de Arquímedes

El sistema del tornillo de Arquímedes para generar energía mecánica, se encuentra conformado por:

- Tornillo de Arquímedes: máquina gravimétrica con la capacidad de aprovechar la energía del agua y transformarla en energía mecánica.
- Rodamiento superior: es un rodamiento radial, componente que se encarga de absorber partes de las fuerzas radiales. Se debe proteger con el fin de que exista filtración de agua.
- Rodamiento inferior: es un rodamiento de contacto angular, además de ser protegido como el rodamiento superior, este se encarga de absorber parte de las fuerzas radiales y axiales generadas por el tornillo.

- Eje de transmisión: elemento que se encarga de transmitir la energía mecánica producida por el giro del tornillo mediante la energía potencial hacia el generador.
- Cama del tornillo: se encuentra conectado con el rodamiento inferior y sirve como soporte y guía para el tornillo de Arquímedes.
- Canal de alimentación: lugar por donde llega el flujo del agua en dirección a la entrada del tornillo de Arquímedes.

2.7.3 Características de la turbina

La turbina tipo tornillo no requieren un diseño único para lograr resultados óptimos, puede trabajar correctamente en espacios no profundos, además, su longitud y hélices permiten manipular los materiales previniendo riesgos de taponamiento u obstrucción en el sistema.

La capacidad de auto regulación del tornillo de Arquímedes varía según la capacidad de agua, pero puede funcionar a velocidades constantes para cada volumen sin mecanismos adicionales, incluso pasar largos periodos de congelación, donde el helicoide de la turbina permanecerá intacto, garantizando una economía significativa al nivelar las cargas parciales para maximizar la eficiencia.

Los tornillos hidrodinámicos son una gran opción para instalaciones de generación con posibilidades de captar saltos de agua de hasta de 10 metros. Su construcción se suele basar en metal y se compone entre 1 a 6 hilos, las cuales se colocan dentro de un canal que servirá para controlar el flujo de agua en la dirección deseada, con el fin de garantizar la máxima eficiencia del sistema.

En la generación de energía se debe considerar factores que afectan la cantidad y confiabilidad del sistema, como son el caudal y el salto aprovechable, incluido el diseño único de la turbina, las dimensiones del canal y las características hidráulicas del flujo de agua disponible. En general, estas turbinas demuestran mayor eficiencia en un rango de caudales, de bajo a moderado.

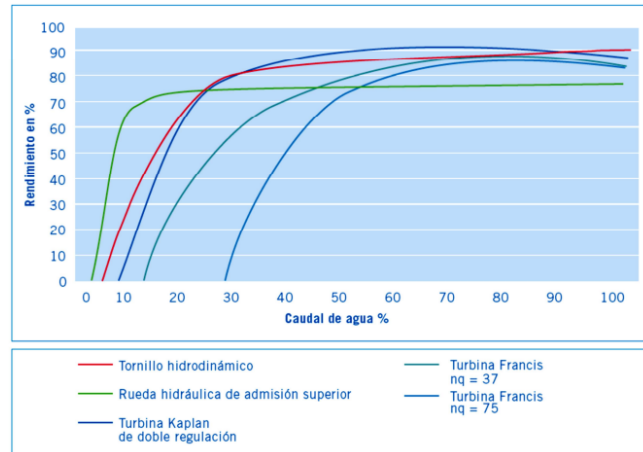


Figura 2.15 Eficiencia de las turbinas a diferentes caudales.
Fuente: [12]

Analizando los rangos de operaciones, se determinó que el tornillo de Arquímedes cuenta con la posibilidad de operar en una alta gama de caudales como muestra la **Figura 2.8** y la **Figura 2.15**, con unidades capaces de generar energía desde $0.065 \text{ m}^3/\text{s}$ hasta $7 \text{ m}^3/\text{s}$. Adicionalmente y en base a las condiciones del fluido se puede instalar varios tornillos en paralelo para aumentar la capacidad tope del caudal y salto disponible.

La turbina de Arquímedes es un dispositivo que consiste en una superficie helicoidal y oscilación de movimiento sin fin, dentro de una cama cuyo eje está inclinado de modo que su interior queda cubierto dentro del agua.

Los tornillos de Arquímedes son de velocidad variable en funcionamiento, lo que significa que la velocidad de rotación del tornillo puede aumentarse o disminuirse dependiendo del caudal disponible en el río. Siendo una mejor opción que un tornillo a velocidad fija y caudal invariable lo que genera pérdidas e impacta directamente en la eficiencia de la turbina. Por último, son dispositivos que funcionan de forma silenciosa [21].

2.7.4 Ventajas y desventajas

Para una mayor comprensión sobre el tornillo de Arquímedes, se definen las ventajas y desventajas que este equipo presenta en la generación de energía en la siguiente tabla:

Tabla 2.5. ventajas y desventajas

Ventajas
No genera mayores repercusiones en el medio ambiente.
Trabajo optimo a diferentes caudales.
Bajos costos de inversión en su construcción.
Es un sistema autorregulable, es decir, de fácil operación.
Su diseño es simple y no requiere de componentes complejos ni mantenimiento frecuente.
Desventajas
Los costos de instalación son relativamente altos.
Tiene un límite en saltos de agua, máximo 10 metros.
Al ser una tecnología reciente, no se posee gran información ni se cuenta con una adecuada asistencia técnica.

2.8 HERRAMIENTAS

Impresoras 3D

Las ventajas que presenta la impresión 3D son que son capaces de realizar infinidad de productos distintos, ya que no requiere de mucho conocimiento. Al compararlo con sistemas de mecanizado que requieren de experiencia en maquinaria industrial para realizar piezas que puedan llevar horas, mientras que las impresoras 3D es suficiente un diseño y regulaciones con la pieza a fabricar.

Existe diferentes tipos de impresoras capaces de fabricar piezas de pequeñas a grandes dimensiones, como [22]:

2.8.1 Modelo por deposición fundida (FMD)

Este tipo de impresora utiliza un filamento termoplástico que se funde y deposita capa por capa para construir el tornillo de Arquímedes. Es una de las tecnologías más populares y accesibles en el mercado actual como muestra la **Figura 2.16**, varían de dimensiones, por lo que es una opción considerable para ir viendo el proceso de fabricación y prevenir problemas que se puedan presentar durante el proceso.



Figura 2.16 Modelo de impresora 3D
Fuente: [22]

2.8.2 Estereolitografía (SLA)

Se basa en el proceso de fotopolimerización para la solidificación de resina líquida. En este procedimiento se caracteriza por su capacidad de alta resolución y precisión, demostrando ser fundamental en la fabricación aditiva para la creación de modelos y prototipos con detalles finos y geometría compleja.

2.8.3 Sinterización selectiva por láser (SLS)

Como menciona, se distingue por emplear un láser de alta potencia para consolidar capa por capa polvo de diversos materiales, como plástico, metal, etc. destaca por la versatilidad al trabajar en componentes específicos en términos de resistencia y composición material.

2.8.4 Tipos de filamento para impresión 3D

El tipo de filamento que se emplea en el desarrollo de la hélice y eje es el PLA (Polilactida)

Tabla 2.6. Filamentos para impresión 3D

Tipo	Mejor uso	Características
PLA (Polilactida)	Prototipos rápidos y proyectos decorativos.	Fácil de imprimir, biodegradable y ofrece una buena calidad superficial.
ABS (Acrilonitrilo Butadieno Estireno)	Piezas funcionales, resistentes al impacto	Posee una alta durabilidad y resistencia al calor.
TPU (Poliuretano Termoplástico)	Piezas flexibles, protectores de impacto.	Flexible y elástica, son ideales para aplicaciones que requieren resistencia al desgaste y deformación.

3. METODOLOGÍA

3.1 DECLARACIÓN DE VARIABLES

3.1.1 Variable independiente

Tabla 3.1 Variables independientes.

Variable	Unidad	Indicador	Instrumento de evaluación
Velocidad del agua	m/s	Velocidad	Método de flotador
Caudal de agua	m ³ /s	Caudal	Método de flotación
Angulo de inclinación	°	Angulo	Escuadra falsa

3.1.2 Variable dependiente

Tabla 3.2 Variables dependientes.

Variable	Unidad	Técnica	Instrumento de evaluación
Numero de revoluciones	rev/min	Experimentación	Tacómetro
Torque	°	Experimentación	Método

3.2 METODOLOGIA DE DISEÑO

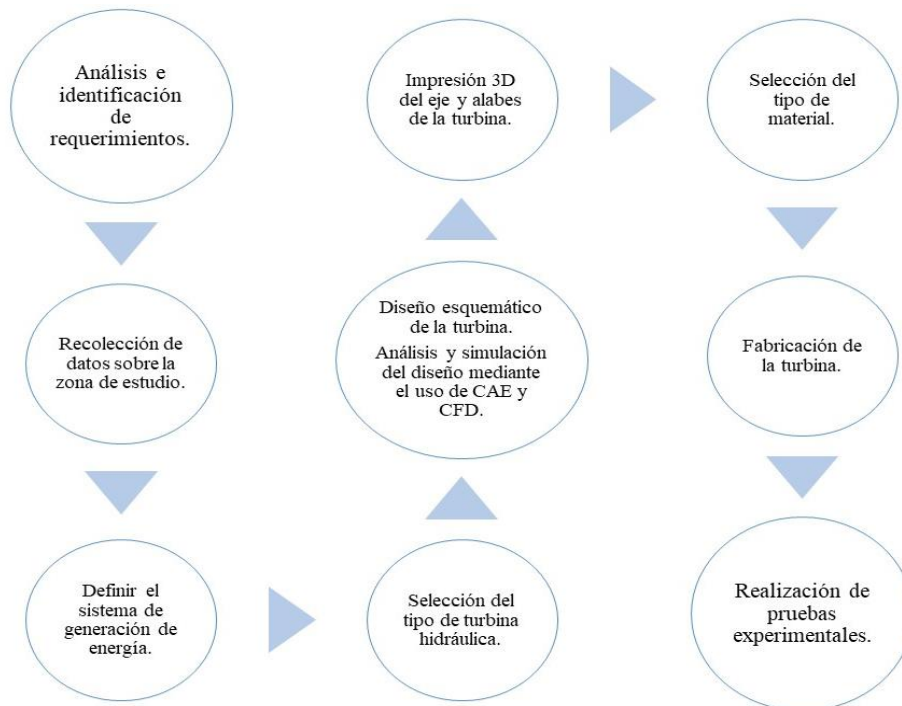


Figura 3.1 Fase de diseño de la turbina.

3.3 TÉCNICAS E INSTRUMENTOS

3.3.1 Análisis de requerimiento

La turbina tipo tornillo de Arquímedes, es una tecnología limpia para la generación de energía eléctrica en condiciones con caídas de agua bajas y caudales constantes (en canales, cauces o ríos). A continuación, se presenta en la **Tabla 3.3** un análisis para el diseño base de la turbina de Arquímedes y conocer si cumple solucionar los requerimientos.

Tabla 3.3 Análisis de requerimiento.

Observación	Requerimiento	Instrumento de evaluación
No existe sistemas de aprovechar fuentes renovables	Estudio de la zona e identificación de tipo de fuente renovable.	Vista de campo
Determinación de caudal y velocidad del agua	Determinar caudal y velocidad para el modelado de la turbina	Vista de campo
Se requiere energía para sistemas de uso domestico	Generación de energía mecánica	Vista de campo

3.4 INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN

3.4.1 Tacómetro.

El modelo HS2234 posee una pantalla retroiluminada LED que brinda una lectura más clara de la velocidad de rotación del eje y la velocidad se mide en revoluciones por minuto (RPM).



Figura 3.2 Tacómetro.

El tacómetro es un dispositivo de medición digital, es decir, utiliza un láser que es dirigido al eje para medir las RPM.

Los pasos para la lectura de velocidad se realizaron en el siguiente orden:

1. Primero se coloca una cinta reflectante o una marca en el eje del tornillo de Arquímedes, para que el tacómetro pueda detectar cada rotación.
2. Se enciende el tacómetro y posterior brinda las posibilidades de medir manual o automáticamente las RPM.
3. Y mediante la luz laser detectar cada vez que se refleja mediante la cinta para obtener la velocidad de rotación.

3.4.2 SolidWorks 2022

Para el diseño y simulación se utilizó SolidWorks, permitiendo crear un modelo 3D de la turbina y definir las dimensiones de las hélices, eje y otros componentes, además de que posee una gran variedad de materiales para ser utilizados y poder generar también una vista tridimensional y planos técnicos del diseño.

SolidWorks es un programa de diseño asistido por computadora (CAD), se utiliza en el ámbito de diseño e ingeniería. Su interfaz permite crear y probar diferentes prototipos lo que facilita la optimización de diseño del tornillo y personalización según las necesidades específicas que lo requieran.

Además, posee una herramienta conocida como dinámica de fluidos (CFD), con el cual nos permite visualizar como actúa el fluido en función a la turbina, así también, se emplea para realizar simulaciones de resistencia y análisis en los componentes. El prototipo se prueba en condiciones simuladas y posterior en reales, reduciendo la necesidad de fabricar múltiples prototipos físicos minimizando costos y tiempo.

3.4 VARIABLE

3.4.1 Determinación de la velocidad

Mediante la investigación de campo, se empleó el método del flotador para medir la velocidad dentro del canal. Consiste en colocar un objeto en la superficie del agua y registrar el tiempo que demora en desplazarse en la distancia estudiada, como resultado se obtuvieron los siguientes valores medidos, como muestra la tabla 3.4.

Tabla 3.4 toma de medidas de velocidad.

Distancia recorrida	Tiempo	Velocidad del agua
3 metros	6,12 seg	0,490 m/s
3 metros	5,58 seg	0,537 m/s
3 metros	5,92 seg	0,506 m/s

Se utilizo un objeto, cuyo resultado de velocidad del agua es de 0,506 m/s por lo que se considera un sistema óptimo para cumplir con el propósito de la turbina.

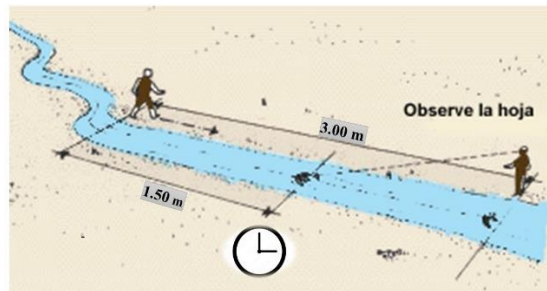


Figura 3.3 Método de flotamiento.

Dicha velocidad se considera para el desarrollo de la turbina.

$$V_f = \frac{d}{t} \quad (3.1)$$

Donde:

V_f : Velocidad del agua [m/s]

d : Metros [m]

t : Tiempo [s]

3.4.2 Área del caudal

Teniendo en cuenta que se trata de un canal rectangular, el área de sección transversal es:

$$A = b \cdot h \quad (3.2)$$

Donde:

A : Área [m²]

b : Base [m]

h : Altura [m]

3.4.3 Determinación del caudal

Para calcular el caudal, previamente se calcula el área del canal que es 0.25m² y se multiplica por la velocidad del fluido mediante la siguiente ecuación:

$$A = \frac{Q}{V_f} \quad (3.3)$$

Despejamos el caudal, obteniendo:

$$Q = A \cdot V_f \quad (3.4)$$

Donde:

Q : Caudal [m^3/s]

A : Área de sección transversal [m^2]

V_f : Velocidad del fluido [m/s]

3.4.4 Pérdidas de fricción en el canal

Las pérdidas de energía en la velocidad del agua son causadas principalmente por la resistencia al movimiento del concreto, es decir, por rozamiento o fricción contra las paredes.

Tabla 3.5 Coeficiente de Manning [23].

Material	Coeficiente de rugosidad
Revestidos con plástico	0,009
Revestidos con concreto	0,012
En tierra y alineados	0,017
Enhierbados	0,025

Mediante la fórmula de Chezy-Manning:

$$h_f = \frac{n^2 \cdot V_f^2 \cdot L}{R_h^{4/3}} \quad (3.5)$$

Donde:

h_f : Pérdidas por fricción [m]

n : Factor de fricción

V_f : Velocidad del agua [m/s]

L : Longitud del canal [m]

R_h : Radio hidráulico [m]

3.4.5 Presión del agua

En canales abiertos la presión existe debido a la profundidad del del agua.

$$P = h \cdot \rho \cdot g \quad (3.6)$$

Donde:

P : Presión del agua [Pa]

ρ : Densidad del agua [kg/m^3]

h : Altura del fluido [m]

g : gravedad [m/s^2]

3.4.5.1 Masa del agua

$$m = \rho \cdot V \quad (3.7)$$

Donde

m : Masa del agua [Kg]

ρ : Densidad del agua [kg/m^3]

V : Volumen del agua [Lt]

3.4.5.2 Peso específico

Indica a cuenta pesa un material en relación con el espacio que ocupa.

$$\gamma = \rho \cdot g \quad (3.8)$$

Donde:

γ : Peso específico [N/m^3]

ρ : Densidad del agua [kg/m^3]

g : gravedad [m/s^2]

3.4.6 Potencia hidráulica

$$P = \rho \cdot H \cdot Q \cdot g \quad (3.9)$$

Donde:

P : Potencia [W]

ρ : Densidad del agua [kg/m^3]

Q : Caudal [m^3/s]

H : Altura neta [m]

g : Gravedad [m/s^2]

3.5 PARAMERTROS DISEÑO DEL TORNILLO

Bajo previo estudio de diferentes casos, se determinó que existen 6 parámetros base para el diseño de la turbina, estos datos se obtienen analítica y experimentalmente para obtener las dimensiones óptimas del tornillo de forma que se pueda garantizar su funcionamiento y logre una mayor eficiencia. Estos parámetros son:

Caudal disponible

Es el caudal medio que se presenta en el cauce. La cantidad de agua será responsable directo de que se pueda generar energía. Se determina un caudal de $0,126 \text{ m}^3/\text{s}$.

Caída disponible

Al igual que el caudal, es esencial para determinar el potencial hidroeléctrico del cauce, pues dependiendo la diferencia de altura entre el punto de captación y salida, se define la energía potencia disponible. Se determina la altura de $0,5 \text{ m}$.

Diámetro exterior del tornillo

Parte importante ya que de él depende el torque y velocidad que el tornillo será capaz de generar. Se determino un diámetro de $0,2 \text{ m}$ por las condiciones que el cauce presenta.

Ángulos de inclinación

El ángulo de inclinación de la hélice y tonillo es un factor que afecta a la eficiencia y es necesario para que el tornillo logre su mayor eficiencia. Este valor se seleccionó uno de los valores promedios obtenidos de anteriores casos:

De acuerdo con Bolívar y Gordillo, mencionan que con trabajos previamente realizados, el ángulo de inclinación de un tornillo de Arquímedes será entre 22° y 30° , ya que permiten captar de mejor manera la cantidad de caudal optimizando el diámetro del eje [24].

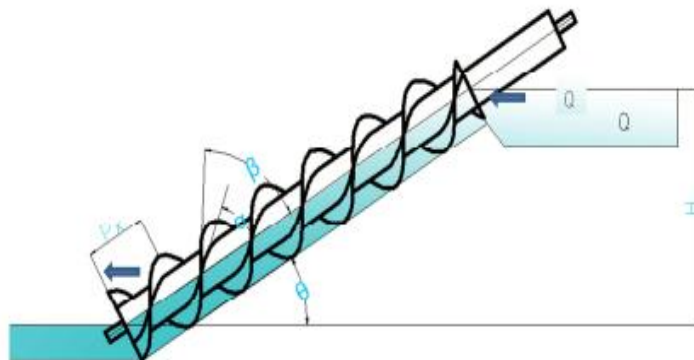


Figura 3.4 Ángulos de inclinación del tornillo de Arquímedes.

Fuente: [18]

Además, mediante un análisis y estudio de casos similares se determina que un ángulo de inclinación del tornillo α será 30° , ya que dicho valor pretende un ahorro en los gastos del tornillo, así como del canal, permitiendo contar con un eje de menor tamaño sin afectar la generación de energía [18].

Tabla 3.6 Angulo de inclinación óptimo [25].

Angulo ($^\circ$)	Simmons	Dellinger	Santa Cruz Herrera	Hamdi	Ding
θ	$20^\circ - 25^\circ$	$20^\circ - 24,5^\circ$	$20^\circ - 30^\circ$	$22^\circ - 30^\circ$	30°
α	-	$30^\circ - 44^\circ$	42°	-	40°

Con dicha recomendación de también se optó como mejor ángulo de inclinación de la hélice α de 42° , valor donde el tornillo alcanza un comportamiento hidráulico óptimo, gracias a que es donde se alcanza un mayor avance.

Numero de hilos

El número de hilos presentes a lo largo del tornillo son 2, ya que presentan mayor eficiencia en cuestión de velocidad en comparación de 1 a 6 número de hilos.

Las dimensiones geométricas propuestas se relacionan con la finalidad de diseñar dispositivo con dimensiones físicas fácil de operar, considerado que también permitirán llevar a cabo realizar pruebas experimentales una vez que se haya determinado el número de hilos.

3.5.1 Geometría del tornillo

Los parámetros para el diseño de la turbina tornillo de Arquímedes ayudan a determinar las dimensiones y forma, como son, diámetro exterior D_3 e interior del eje D_2 , ángulo de inclinación θ , longitud de la hélice L_e y numero de hilos N , teniendo en cuenta la velocidad y caudal en el canal.

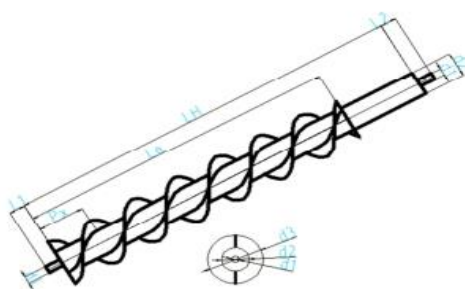


Figura 3.5 Modelo de turbina tipo tornillo de 2 hilos.
Fuente: [18]

3.5.1.1 Avance del tornillo

Es necesario calcular el avance del tornillo que se mide entre cresta y cresta de una hélice, mientras que, el paso del tornillo se considera la distancia entre dos crestas de diferentes hilos.

$$P = P_x \cdot N \quad (3.10)$$

Al igualar los razonamientos matemáticos, obtenemos:

$$\begin{aligned} \tan(\beta) &= \frac{\pi d_3}{N \cdot P_x} \quad \Rightarrow \quad \frac{\pi d_3}{\tan(\beta)} = N \cdot P_x \\ \tan(\theta) &= \frac{\pi d_2}{N \cdot P_x} \quad \Rightarrow \quad \frac{\pi d_2}{\tan(\theta)} = N \cdot P_x \\ P &= N \cdot P_x = \frac{\pi d_2}{\tan(\theta)} = \frac{\pi d_3}{\tan(\beta)} \end{aligned} \quad (3.11)$$

Donde:

P : Avance del tornillo [m]

P_x : Paso del tornillo [m]

N : Número de hilos

d_2 : Diámetro del eje sólido [m]

d_3 : Diámetro del exterior del tornillo [m]

β : Ángulo interior de la hélice [°]

θ : Ángulo de inclinación del tornillo [°]

3.5.1.2 Longitud del tornillo

Para conocer la geometría del tornillo. Dichos valores se relacionan con el número de hilos y cantidad de alabes.

$$L_e = \frac{H}{\text{sen}(\theta)} \quad (3.12)$$

Donde:

L_e : Longitud del tornillo [m]

H : Altura de salto [m]

θ : Ángulo de inclinación del tornillo [°]

3.5.2 DESARROLLO DE LA HELICE

Al conocer como está compuesta la turbina tipo tornillo de Arquímedes y el desarrollo de las hélices, se obtiene los cálculos para determinar el ángulo de inclinación.

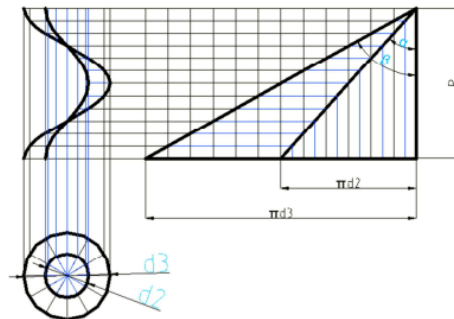


Figura 3.6 desarrollo de la hélice.
Fuente: [18]

3.5.2.1 Área de contacto

Ayuda a determinar la capacidad en transportar el agua a lo largo del tornillo, basado en la geometría del tornillo y alabes.

$$\frac{d}{D} = 0,5$$

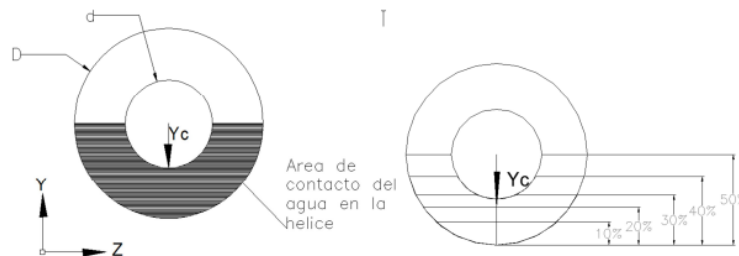


Figura 3.7 Área de contacto del agua con las hélices.
Fuente: [18]

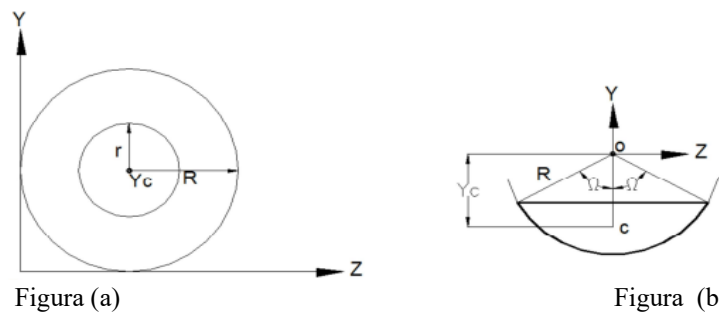


Figura (a)

Figura (b)

Figura 3.8 (a) y (b) Inercia en la superficie de las hélices.

Fuente: [18]

3.5.2.2 Área frontal del tornillo

Por regla de tres y con las propiedades de superficies planas, Se deduce el área frontal del tornillo, como se muestra en la **Tabla 3.7**:

Tabla 3.7 Propiedades de superficies planas [18].

	Figura a	Figura b
A	$\pi(R^2 - r^2)$	$R^2[\Omega - \text{sen}(\Omega) \cdot \cos(\Omega)]$
y_c	R	$\frac{2R}{3} \left[\frac{\text{sen}^3(\Omega)}{\Omega - \text{sen}(\Omega) \cdot \cos(\Omega)} \right]$
x_c	R	0

$$A = \pi(R^2 - r^2) = \pi \left(R^2 - \frac{R^2}{4} \right)$$

$$A = \frac{3}{4} \pi R^2 \tag{3.13}$$

Donde:

A: Área frontal del tornillo [m²]

R: Radio exterior del tornillo [m]

3.6.2.3 Hallando la Área y ubicación del centroide

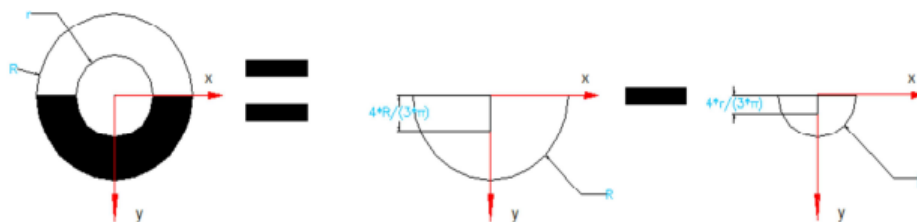


Figura 3.9 Centroides del tornillo.

Fuente: [18]

En base a los radios de la hélice y eje, se determina el centroide (Y_c), como muestra la siguiente

Tabla 3.8:

Tabla 3.8 Ubicación de los centroides [18].

Componente	Área (m ²)	X _c	Y _c	Y _c * Área
Semicírculo (R)	$\frac{\pi \cdot R^2}{2}$	0	$\frac{4 \cdot R}{3 \cdot \pi}$	$\frac{2 \cdot R^3}{3}$
Semicírculo (r)	$-\frac{\pi \cdot r^2}{2}$	0	$\frac{4 \cdot r}{3 \cdot \pi}$	$-\frac{2 \cdot r^3}{3}$
	$\sum Area = \frac{\pi \cdot (R^2 - r^2)}{2}$			$\sum Area y_c = \frac{2 \cdot (R^3 - r^3)}{3}$

$$\sum Area y_c = \frac{2 \cdot (R^3 - r^3)}{3} = 0.5833 R^3$$

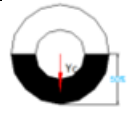
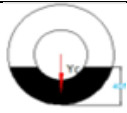
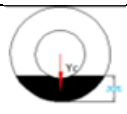
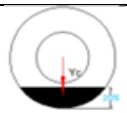
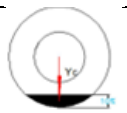
$$\sum y_c Area = \sum y_c \frac{\pi \cdot (R^2 - r^2)}{2} = 1.1781 R^2$$

Obtenemos:

$$\sum y_c = \frac{0.5833 R^3}{1.1781 R^2} = 0.4951 R^2 \tag{3.14}$$

Al determinar cómo influye el área de contacto, podemos observar en la **Tabla 3.9** un resumen de como determinar el centroide a medida que el área de contacto varíe.

Tabla 3.9 Formulas para determinar el área de contacto [18].

Área de contacto	Área	Porcentaje	Yc
	$A = \frac{3}{8} \pi R^2$	50%	$Yc = 0.4951 R$
	$A = \frac{3}{10} \pi R^2$	40%	$Yc = 0.6037 R$
	$A = \frac{9}{40} \pi R^2$	30%	$Yc = 0.6907 R$
	$A = \frac{3}{20} \pi R^2$	20%	$Yc = 0.7544 R$
	$A = \frac{3}{40} \pi R^2$	10%	$Yc = 0.8471 R$

$$A = \frac{3}{8} \pi R^2 \tag{3.15}$$

3.5.3 Fuerzas en el tornillo

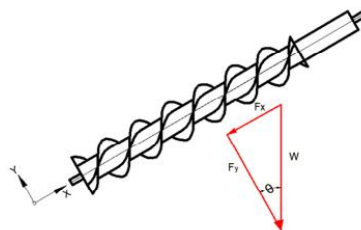


Figura 3.10 diagrama de fuerzas en plano xy.

Fuente:[18]

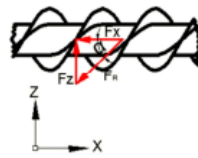


Figura 3.11 diagrama de fuerzas plano xz.
Fuente: [18]

3.5.3.1 Fuerzas del agua en dirección del tornillo

$$w = y \cdot volumen = y \cdot A \cdot Px \quad (3.16)$$

Relaciones trigonométricas obtenidas en plano xy

$$a) \tan(\theta) = \frac{Fx}{FN} \quad b) \cos(\theta) = \frac{FN}{w} \quad c) \text{sen}(\theta) = \frac{Fx}{w}$$

Despejando la relación trigonométrica sen

$$w = \frac{Fx}{\text{sen}(\theta)} = \rho \cdot g \cdot Px \cdot A$$

3.5.3.2 Fuerza de empuje

$$Fx = \rho \cdot g \cdot Px \cdot A \cdot \text{sen}(\theta) \quad (3.17)$$

Donde:

F_x : Fuerza de empuje que ejerce el agua en dirección del plano x u horizontal [N]

ρ : Densidad del agua [kg/m^3]

g : Gravedad [m/s^2]

P_x : Paso del tornillo [m]

θ : Ángulo de inclinación del tornillo [$^\circ$]

A : Área de contacto de agua [m^2]

Mientras, en el plano xz al tornillo se calcula la fuerza utilizando la relación trigonométrica obtenida de xz

$$\tan(\alpha) = \frac{Fz}{Fx} \quad (3.18)$$

3.5.3.3 Fuerza del agua en dirección tangencial

$$F_z = F_x \cdot \tan(\alpha) \quad (3.19)$$

$$F_z = p \cdot g \cdot P_x \cdot A \cdot \text{sen}(\theta) \cdot \tan(\alpha)$$

Donde:

F_z : Fuerza que ejerce el agua en dirección del plano z o tangencial [N]

F_x : Fuerza de empuje que ejerce el agua en dirección del plano x u horizontal [N]

α : Ángulo de inclinación exterior de la hélice [°]

3.5.3.4 Torque

Para el torque se asume que la fuerza se aplica en la superficie de contacto del agua como

$$T = F_z \cdot Y_c \cdot \frac{L_e}{P_x} = p \cdot g \cdot P_x \cdot A \cdot \text{sen}(\theta) \cdot \tan(\alpha) \cdot Y_c \cdot \frac{L_e}{P_x} \quad (3.20)$$

EL torque para todo el tornillo con la formula:

$$T = \rho \cdot g \cdot L_e \cdot A \cdot \text{sen}(\theta) \cdot \tan(\alpha) \cdot Y_c \quad (3.21)$$

Donde:

T : Torque [Nm]

ρ : Densidad del agua [kg/m^3]

g : Gravedad [m/s^2]

L_e : Longitud del tornillo [m]

A : Área de contacto [m^2]

θ : Ángulo de inclinación tornillo [°]

α : Ángulo de inclinación hélice [°]

Y_c : Centroide [m]

3.5.4 Velocidad angular

En teoría la velocidad de entrada sería igual a la salida por ser una turbina gravitatoria solo el efecto el peso del agua distribuido en la hélice produce la rotación de la turbina. Siendo la velocidad de rotación igual.

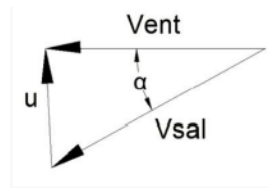


Figura 3.12 Triangulo de velocidades.

Fuente: [18]

$$\tan(\alpha) = \frac{u}{Vent} \quad (3.22)$$

$$u = Vent \cdot \tan(\alpha) = w \cdot Yc$$

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

$$u = \frac{Q \cdot \tan(\alpha)}{A} \quad (3.23)$$

Reemplazando se obtiene:

$$w = \frac{Q \cdot \tan(\alpha)}{A \cdot Yc} \quad (3.24)$$

Donde:

w : Velocidad angular [rad/s]

Q : Caudal [m^3/s]

α : Ángulo de inclinación hélice [$^\circ$]

A : Área [m^2]

Yc : Centroide [m]

3.5.5 Potencia teórica

Deduciendo la fórmula de potencia teórica generada por el tornillo se tiene:

$$Pot = T \cdot w \quad (3.25)$$

Donde:

Pot : Potencia teorica [W]

T : Torque [Nm]

w : Velocidad angular [rad/s]

Sustituyendo el trabajo y velocidad angular

$$Pot = (\rho \cdot g \cdot Le \cdot A \cdot \text{sen}(\theta) \cdot \tan(\alpha) \cdot Yc) \cdot \left(\frac{Q \cdot \tan(\alpha)}{A \cdot Yc} \right) \quad (3.26)$$

La ecuación de potencia se reduce en relación al ángulo de la hélice con la inclinación del tornillo:

$$\text{sen}(\theta) = \frac{H}{Le}$$

$$Pot = (\rho \cdot g \cdot Q \cdot H \cdot (\tan(\theta))^2) \quad (3.27)$$

Donde:

Pot : Potencia teórica [W]

ρ : Densidad del agua [kg/m^3]

g : Gravedad [m/s^2]

Q : Caudal [m^3/s]

H : Altura de salto [m]

θ : Ángulo de inclinación del tornillo [$^\circ$]

Para el cálculo de la potencia máxima se utiliza los siguientes valores $\alpha=45$ y $\theta=90$, porque son valores máximos en las identidades trigonométricas

$$\tan(\alpha) = \tan(45) = 1$$

$$\text{sen}(\theta) = \text{sen}(90) = 1$$

3.5.5.1 Potencia máxima teórica

$$P_{max} = (\rho \cdot g \cdot H \cdot Q) \quad (3.28)$$

Donde:

P_{max} : Potencia máxima [W]

ρ : Densidad del agua [kg/m^3]

g : Gravedad [m/s^2]

Q : Caudal [m^3/s]

H : Altura de salto [m]

3.5.6 Velocidad inicial

$$v = w \cdot r \quad (3.29)$$

Donde:

v : Velocidad inicial [m/s]

w : Velocidad angular [rad/s]

r : Radio del alabe [m]

3.5.7 Revoluciones

$$rpm = \frac{v \cdot 60}{r \cdot d} \quad (3.30)$$

Donde:

v : Velocidad inicial [m/s]

r : Radio del alabe [m]

d : Diámetro [m]

3.5.8 Eficiencia

$$\eta = \frac{Pot}{PH} \quad (3.31)$$

Donde:

η : Eficiencia [%]

Pot : Potencia mecánica [W]

PH : Potencia hidráulica [W]

3.5.8 Método de selección de materiales

Se considera que los componentes se basen en materiales con características y propiedades mecánicas que aseguren que la turbina pueda soportar las fuerzas ejercidas por el flujo de agua.

Tabla 3.10 Tipos de material.

Aspecto	ALTERNATIVAS	
	PLA	Acero inoxidable 304
Facilidad de fabricación	-No requieren procesos como soldadura o mecanizado. -Compatible con impresoras 3D de bajo costo.	-Requieren mecanizado, soldadura y otros procesos industriales complejos. -Necesitan herramientas especializadas.
Costo	-Material de bajo costo. -Permite múltiples iteraciones sin grandes gastos.	-Material costoso. Procesamiento y mano de obra encarecen la fabricación.
Rapidez en el proceso de desarrollo	-Permite cambio rápido con impresión 3D. -Flexibilidad para modificar diseños y producir nuevos prototipos rápidamente.	-Procesos de fabricación más lentos. -Modificaciones en acero requieren más tiempo y recursos adicionales.
Aplicación en pruebas de concepto	-Suficiente resistencia para pruebas iniciales y validación de diseño. -Ideal para validad geometría y funcionalidad básica.	-Resistencia excesiva para pruebas iniciales. -Puede resultar un sobredimensionamiento en la fase de concepto.
Escalabilidad y ajustes	-Fácil de escalar y ajustar. -Prototipos en diferentes tamaños son económicos y rápidos de producir.	-Escalabilidad limitada debido al costo. -Ajuste de diseño más complejo.
Durabilidad y aplicación	-Adecuado para prototipos temporales. -Resistencia suficiente para pruebas controladas.	-Durabilidad extrema, ideal para productos finales. -Mejor opción donde se requiere alta resistencia.

Mediante la **Tabla 3.10** se considera el PLA como mejor opción para la fabricación del prototipo, debido a su facilidad de uso, bajo costo y rápida iteración de diseños en el proceso.

Mientras que, para la base se selecciona la tubería cuadrada galvanizada, es una aleación de hierro y carbón resistente a la corrosión y las temperaturas extremas, sus dimensiones son 20x20x1.5 mm, tiene un peso de 0,83 kg/m y una longitud de 5m fabricado bajo la norma NTE INEN 2415.

Tabla 3.11 Tubería estructural cuadrada [26].

Designaciones		Área	Peso	Propiedades Estáticas		
				Eje x-x = y-y		Radio de giro
				Momento de inercia	Módulo de resistencia	
B	e	A	P	I	W	I
mm	mm	cm ²	kg/m	cm ⁴	cm ³	cm
20	1,4	0,99	0,78	0,56	0,56	0,75
	1,5	1,05	0,83	0,58	0,58	0,75
	1,8	1,23	0,96	0,66	0,66	0,73
	2	1,34	1,05	0,7	0,7	0,72

3.5.9 Selección de chumaceras

Aunque hay muchos tipos de aceros con diversas propiedades y cualidades, se selecciona el acero AISI 1045 debido a que es una aleación al carbono con un costo bajo que permite evaluar sin un gran gasto antes de pasar a materiales más resistentes.

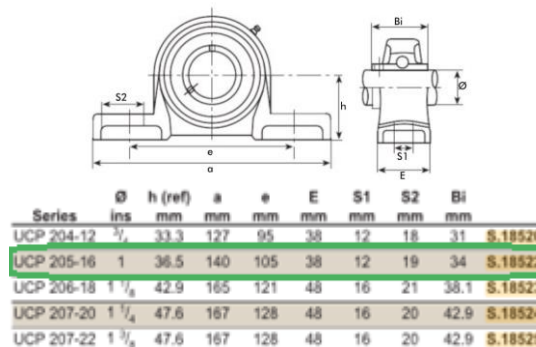


Figura 3.13 Medidas de la chumacera seleccionada [27].

3.5.10 Selección de pernos

Se elige el acero SAE 1045 para los pernos por su buen equilibrio entre resistencia y maquinabilidad, ofreciendo una resistencia mecánica adecuada a un costo bajo, ideal para aplicaciones generales.

3.5.11 Materiales

Para la fabricación del prototipo de la turbina se ocuparon los siguientes materiales.

Tabla 3.12 Materiales.

Cantidad	Material	Imagen	Material
8	Pernos M10x1.5x60		Acero Negro
8	Pernos M10x1.5x30		
4	Pernos M10x1.5x25		
4	Tuerca M12x1.75		Acero Negro
16	Tuerca M10x1.5		
4	Arandela 12 mm		Acero
16	Arandela 10mm		
1	Plancha de Acero		Acero inoxidable
2	Tubo Cuadrado 1 in 5m		Acero estructural
2	Chumaceras de piso de 1 in		Hierro Fundido
1	Eje de 1 in		Acero inoxidable
1	Tornillo de Arquímedes		Impresión 3D

3.6 ESTRUCTURA DEL MODELADO DE UNA SIMULACION EN SOLID WORKS

El tipo de análisis de Solid Works es CFD

Definir la geometría

Sirve para modelar el tornillo de Arquímedes s 3D, garantizando que la hélice y eje estén bien definidos.

Definir el mallado

Crea una malla inicial alrededor de la hélice donde ocurren cambios en el flujo del agua.

Controlar el mallado

Se refina en zonas críticas como las puntas de las hélices y bordes por donde ingresa el agua.

Definir condiciones de borde y calidad de mallado

Se establece las condiciones de entrada y salida del fluido, asegurando que la malla cumpla capturar las características del flujo.

Definir el procesamiento

Se configura el análisis CFD, seleccionando la solución apropiada para simular el flujo en el tornillo.

Parámetros iniciales y modelo de fluido

Se definen las condiciones iniciales, como el nivel de caudal que tiene el cauce y la velocidad de rotación del tornillo. Además, el modelo de fluido apropiado, que es el agua.

Definir parámetros iniciales y condiciones de borde

Se configura las condiciones en las paredes del tornillo y el cauce para evitar fugas del fluido.

Definir parámetros de borde

Se ajusta las condiciones de borde, como la temperatura o presión del agua en el entorno del tornillo.

Definir valores de fluido

Se introduce las propiedades físicas del agua, como son la viscosidad, densidad entre otros parámetros.

Definir proceso de solución

Se enfoca en obtener una mejor convergencia y estabilidad para la simulación del flujo.

Unidades y control

Se establece parámetros y unidades específicos del fluido y modelo, asegurando como el tiempo de simulación y la convergencia de la solución.

Salida de datos

Se obtiene datos como la distribución de presión, velocidades y el comportamiento del flujo.

Ejecutar simulación

Se inicia la simulación CFD, monitoreando las condiciones y parámetros si es necesario.

Generar resultados

Se recopila y analiza las RPM resultantes de la simulación.

Presión y velocidad superficial

Evalúa la distribución de presión a lo largo del tornillo y velocidades del fluido en la superficie de la hélice.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis y discusión de resultados del prototipo de la turbina de tornillo de Arquímedes se presenta como un modelo que puede satisfacer pequeñas demandas de energía basadas en recursos del medio ambiente. Para el diseño se toma en cuenta variables como el caudal, ángulo de inclinación y dimensionamiento de la turbina.

4.1 CÁLCULOS DE CAMPO

4.1.1 Velocidad del agua

Mediante la investigación de campo, se empleó el método de flotador para medir la velocidad del agua dentro del canal, el que consistió en colocar un objeto en el agua y registrar su desplazamiento a lo largo de la distancia estudiada.

Para determinar la velocidad se calculó en una distancia de 3 metros, mismo que al aplicar la fórmula de velocidad se obtuvo un valor de 0,506 m/s.

Tabla 4.1 Velocidad del agua.

Ecuación:	(3.1)
Parámetro:	$V_f = 0,506 \text{ m/s}$

4.1.2 Área del caudal

Al ser un canal rectangular sin deformaciones ni obstáculos en su trayecto, se obtiene mediante la base y altura del mismo.

Tabla 4.2 Velocidad del agua.

Ecuación:	(3.2)
Parámetro:	$A = 0.25 \text{ m}^2$

4.1.3 Determinación del caudal

Tabla 4.3 Caudal disponible.

Ecuación:	(3.3)
Parámetro:	$Q = 0,126 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ $V = 126 \text{ Lt}$

4.1.4 Pérdida de fricción

La pérdida de fricción hace referencia a la energía que se disipa debido a la resistencia del flujo del agua contra las paredes del canal. El factor de fricción para el revestimiento natural según Manning se determinó que será de 0,017.

Tabla 4.4 Pérdidas de fricción.

Ecuación:	(3.4)
Parámetro:	$h_f = 0,002458 m$

4.1.5 Presión del agua

Se obtuvo que la presión equivale a 4890,28 Pa, utilizando la siguiente ecuación.

Tabla 4.5 Presión del agua.

Ecuación:	(3.5)
Parámetro:	$P = 4890,28 Pa$

4.1.5.2 Peso específico*Tabla 4.6 Peso específico del agua.*

Ecuación:	(3.7)
Parámetro:	$\gamma = 9780,57 N/m^3$

4.1.6 Potencia hidráulica*Tabla 4.7 Potencia hidráulica.*

Ecuación:	(3.8)
Parámetro:	$P = 618,13 W$

4.1.8 Velocidad de rotación máxima Revoluciones por minuto*Tabla 4.8 Numero de revoluciones.*

Ecuación:	(3.9)
Parámetro:	$n = 146,2 rev/min$

4.1.9 Velocidad angular*Tabla 4.9 Velocidad angular.*

Ecuación:	(3.10)
Parámetro:	$w = 15,289 rad/s$

4.1.10 Par Motor/ Torque*Tabla 4.10 Torque.*

Ecuación:	(3.11)
Parámetro:	$T = 40,429 Nm$

4.2 CALCULOS DEL TORNILLO DE ARQUÍMEDES

Se determina los datos de tornillo para analizar su geometría y las fuerzas que actúan en el sistema.

Tabla 4.11 Datos del tornillo.

Parámetro	Valor	Unidad
Caudal	0,126	m^3/s
Salto	0,5	m
Longitud del tornillo	0,4	m
Radio de alabe	0,1	m
Angulo de inclinación (tornillo)	30	$^{\circ}$
Angulo de inclinación (hélice)	42	$^{\circ}$
Numero de hilos	2	
Densidad	997	kg/m^3
Gravedad	9,81	m/s^2

4.2.1 Desarrollo del tornillo**4.2.1.1 Paso del tornillo***Tabla 4.12 Paso del tornillo.*

Ecuación:	(3.12)
Parámetro:	$P_x = 0,1 m$

4.2.1.2 Área del alabe*Tabla 4.13 Área del alabe.*

Ecuación:	(3.15)
Parámetro:	$A = 0,0117 m^2$

4.2.1.3 Inercia del alabe

Tabla 4.14 Inercia del alabe.

Ecuación:	(3.14)
Parámetro:	$Y_c = 0,0495 \text{ m}$

4.2.1.4 Fuerza de empuje del agua en dirección del plano “X”

Tabla 4.15 Fuerza del agua en dirección del plano “X”.

Ecuación:	(3.17)
Parámetro:	$F_x = 5,7216 \text{ N}$

4.2.1.5 Fuerza de empuje del agua en dirección del plano “Z”

Tabla 4.16 Fuerza del agua en dirección “Z”.

Ecuación:	(3.19)
Parámetro:	$F_z = 5,1517 \text{ N}$

4.2.1.6 Torque

Tabla 4.17 Torque.

Ecuación:	(3.21)
Parámetro:	$T = 1,020 \text{ Nm}$

4.2.1.7 Velocidad angular

Tabla 4.18 Velocidad angular.

Ecuación:	(3.24)
Parámetro:	$w = 195,89 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$

4.2.1.8 Potencia teórica

Tabla 4.19 Potencia teórica.

Ecuación:	(3.25)
Parámetro:	$Pot = 199,8 \text{ W}$

4.2.1.9 Velocidad lineal

Tabla 4.20 Velocidad lineal.

Ecuación:	(3.29)
Parámetro:	$v = 19,58 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

4.2.1.10 Número de revoluciones

Tabla 4.21 Velocidad lineal.

Ecuación:	(3.30)
Parámetro:	$n = 1870 \text{ rev/min}$

4.2.1.11 Eficiencia

Tabla 4.22 Eficiencia.

Ecuación:	(3.31)
Parámetro:	$\eta = 0,32 \approx 32\%$

4.2.1.12 Eje de transmisión

Para su funcionamiento tuvo una variación de inclinaciones.

Tabla 4.23 Datos del eje.

Parámetro	Valor	Unidad
Masa del tornillo	5	Kg
Angulo de inclinación	30	°
Diámetro del eje	0,0254	m

4.2.1.13 Peso del tornillo

Tabla 4.24 Peso del tornillo.

Ecuación:	$WT = mT \cdot g$
Parámetro:	$WT = 49,05 \text{ N}$

4.3 DIAGRAMA DE REACCIONES Y MOMENTOS EN EL EJE

Para el cálculo de fuerza se toma en cuenta valores de la turbina como peso del tornillo y la gravedad, variables que están relacionadas para dicho cálculo dando como resultado una fuerza de 49,05 N.

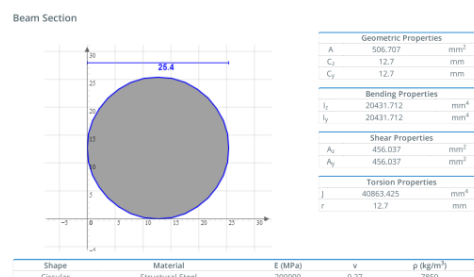


Figura 4.1 Dimensión del eje.

Mediante el análisis de distribución de fuerzas respecto al eje, se determina una fuerza puntual.

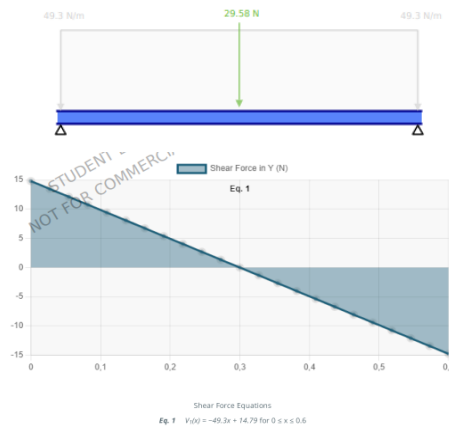


Figura 4.2 Diagrama de fuerzas

En la **Figura 4.3** se observa la distribución de las fuerzas respecto al eje.

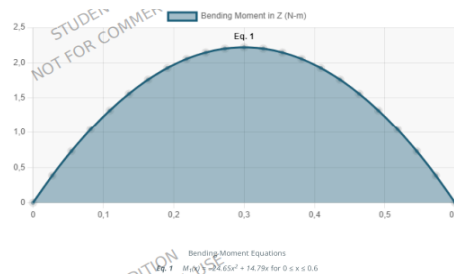


Figura 4.3 diagrama de momentos máximos.

Para la obtención del momento máximo se emplea un software que nos refleja un valor resultante de 14,79 Nm.

Tabla 4.25 Reacciones en el eje

Punto	X	Y	Mx
0	0 N	14.79 N	0 N-m
0.6	0 N	14.79 N	0 N-m

Tabla 4.26 Fuerzas extremas

Resultados	Max	Min
Momento de flexión	2.219 N-m	0 N-m
Corte	14.79 N	-14.79 N
Desplazamiento	0 mm	-0.02 mm

Tabla 4.27 Estrés extremos

Resultados	Max	Min
Tensión de flexión	1.379 MPa	-1.379 MPa
Esfuerzo cortante	0.044 MPa	0 MPa
Estrés normal máximo	1.379 MPa	0 MPa
Estrés normal mínimo	0 MPa	-1.379 MPa

4.4 DISEÑO DE LA TURBINA

4.4.1 Número de hilos

El análisis de la turbina por esfuerzos muestra que la presión ejercida sobre los alabes incrementa al aumenta el número de alabes, por otra parte, se puede observar el comportamiento de la presión a lo largo de los alabes de la turbina, siendo las presiones más bajas con 1 hilo y la más alta con 6 hilos. Partiendo del comienzo de la turbina ha sido diseñada con 2 números de hilos, de 6 alabes cada uno en un ángulo de 42° .

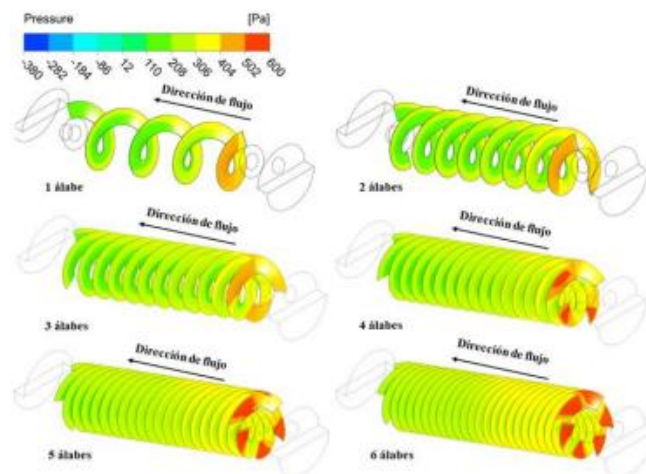


Figura 4.4 Análisis sobre el número de alabes.
Fuente: [28]

Con el fin de determinar la tendencia y medidas acordes al eje, se procese al diseño de la turbina, comprobando cada una de ellas con un numero de hilos diferentes y un mismo ángulo.

Para el análisis del diseño de a turbina de tornillo de Arquímedes se toma en cuenta los parámetros de presión y velocidad en distintos puntos de la turbina. Esto nos ayuda a verificar los resultados mostrados en la siguiente gráfica y evidenciar la eficiencia que tiene el tornillo de 2 hilos con los alabes a 42° de ángulo.

Con el fin de observar la tendencia de los parámetros de presión y velocidad en distintos puntos de la turbina, se seleccionaron 3 puntos de análisis:

- Plano 1: Entrada de la turbina
- Plano 2: A la mitad de la turbina (0.20 m)
- Plano 3: Salida de la turbina

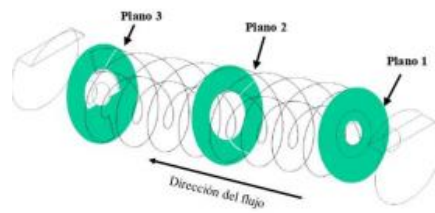


Figura 4.5 Puntos de análisis del tornillo.

Fuente: [28]

A continuación, se presenta la presión obtenida en cada punto de análisis, cada línea proporciona la variabilidad de la presión y velocidades en diferentes direcciones dentro del sistema de fluidos, concluyendo que con un mismo caudal y mayor número de hilos de alabes existirá más presión en la entrada de la turbina.

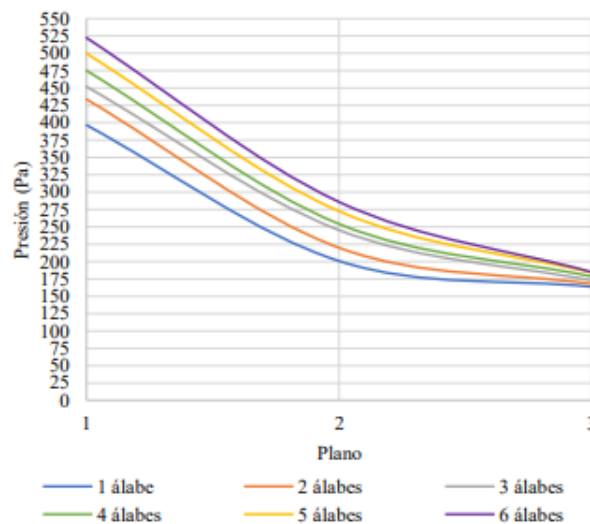


Figura 4.6 Comportamiento de presión según el número de hilos.

Fuente: [28]

En el análisis de velocidad, se espera que tenga un comportamiento inverso a la presión, por lo que la velocidad aumenta a la salida de la turbina. Dichos análisis son útiles para comprender mejor la dinámica y comportamiento del flujo en el sistema.

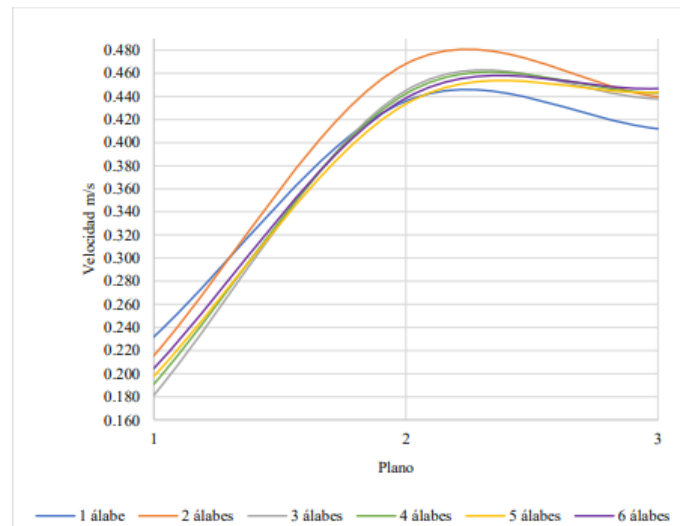


Figura 4.7 Comportamiento de la velocidad según el número de hilos.
Fuente: [28]

Finalmente, con tales criterios se tiene una mayor transferencia en momento entre el punto de análisis 1 y 2, además de obtener los valores de velocidades más altos en las turbinas con 2 y 3 números de hilos.

Número de hilos

Los valores de número de hilos varían de 1 a 6, ya que a mayor número de hilos la construcción del tornillo se torna complejo. Al relacionarse directamente con la capacidad del fluido como muestra la **Figura 4.4**, se opta por un tornillo de Arquímedes de 2 hilos, con la que se cuenta con una adecuada eficiencia.

El diseño de la turbina tipo tornillo de Arquímedes al no tener restricciones geométricas para las dimensiones o ángulo de inclinación, se optan por tomar valores que garanticen un diseño óptimo, respecto al caudal y salto de altura.

4.4.2 Base del tornillo

La base o tolva es el lugar donde se ubicará la turbina tipo tornillo en conjunto con el eje de transmisión, está diseñada para soportar y alinear el tornillo, actuando como recipiente para que haya fugas de agua. La tolva es cubierta con un soporte de tubo cuadrado de 20 mm para que mantenga la forma circular, y en los extremos frontal y trasero es donde se coloca el soporte base del rodamiento, a su vez, siendo el punto por donde ingresa el flujo de agua que golpeará con los álabes. Finalmente, en cada extremo superior posee 4 soportes los cuales estarán sujetas a las patas distribuidas alrededor de la misma.

El diámetro de la tolva es de 250 mm y la longitud de 500 mm, los soportes para las patas están ubicados a una distancia de 400 mm, mientras que los soportes de los rodamientos están a una distancia de 200 mm. El extremo por donde ingresa el fluido se cubrirá de agua hasta el 50%

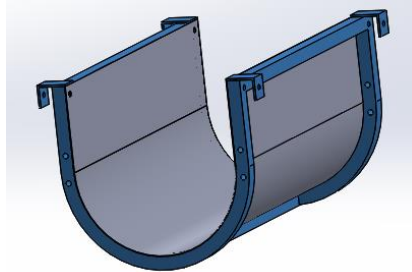


Figura 4.8 Base del tornillo.

4.4.3 Base soporte patas

Las patas que sostendrá en sistema están diseñadas para proporcionar una base sólida y estable cada parte tiene una forma tubular cuadrada. Cada tubo es de 20 mm de espesor, tiene una longitud total de 500 mm, y una altura de 400 mm que llega hasta 500 mm por los ángulos a trabajar. Las perforaciones para sujetar con la tolva tienen un diámetro de 10 mm y para la estabilidad de las patas se colocó unas placas con las medidas 75 mm x 75 mm.

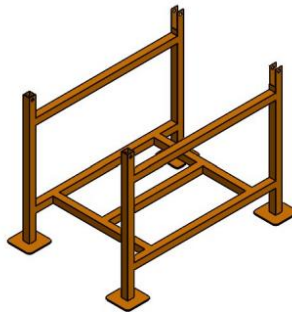


Figura 4.9 Soporte.

4.4.4 Base soporte rodamiento

En el soporte se encuentra un rodamiento el cual guiará al eje de la turbina, estará sujeto con 4 pernos al soporte de la tolva, e forma rectangular

Tiene un área de 130x45x70 mm. en cada extremo tiene una perforación de 8 mm de diámetro para su sujeción en la base con los pernos.

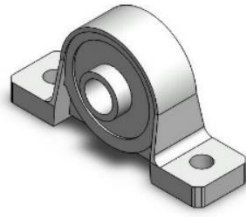


Figura 4.10 Soporte rodamientos.

4.4.5 Eje de transmisión y tornillo de Arquímedes

El eje es una pieza que se conecta directamente con la turbina y es guiado por dos rodamientos en la parte superior e inferior, es encargado de producir la potencia mecánica basada en la potencia hidráulica del canal.

La longitud del eje es 600 mm; la longitud del tornillo es de 400 mm, con un total 2 hilos de 6 hélices distribuidos uniformemente. Además, cada alabe tiene un diámetro de 200 mm con un 1 paso.

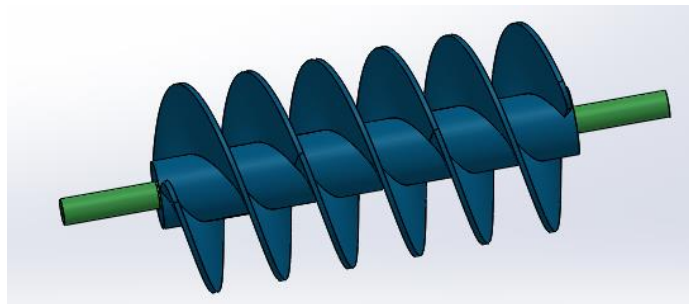


Figura 4.11 Eje y tornillo de Arquímedes.

El tornillo se fabricará mediante impresión 3D con el filamento PLA, material más rentable, fácil de imprimir y de buena calidad para la validación del diseño y funcionalidad. Entonces, una vez con el diseño , el modelo digital se convierte en un archivo compatible con impresoras 3D y usando el formato STL. la impresión se realiza en 34 horas.

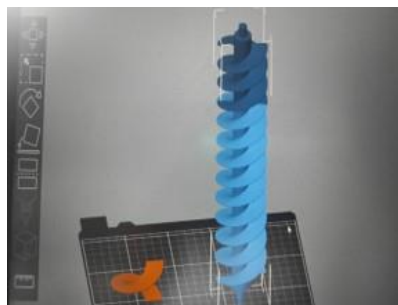


Figura 4.12 Ingreso del modelado en archivo STL.

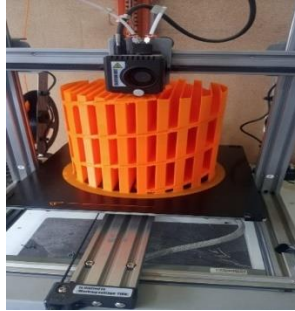


Figura 4.13 proceso de fabricación del tornillo.

Durante el proceso de impresión se optó agregar unos soportes entre aspas para que mantenga sus dimensiones diseñadas y que no exista deformaciones en el proceso.

4.4.6 Análisis de simulación

Tabla 4.28 Parámetros de simulación.

	Material	
	PLA	AISI 304
Nombre:		
Tipo de modelo:	Isotrópico elástico	Isotrópico elástico
Criterio de error predeterminado:	Desconocido	Desconocido
Límite elástico:	3000-4000 N/m^2	2,06807e+08 N/m^2
Límite de tracción:	500-700 N/m^2	5,17017e+08 N/m^2
Resistencia a la flexión	3000-4000 N/m^2	-
Modulo elástico:	3000-4000 N/m^2	1,9e+11 N/m^2
Coefficiente de Poisson:	0,36	0,29
Densidad:	3000-4000 kg/m^3	8.000 kg/m^3
Modulo cortante:	-	7,5e+10 N/m^2
Temperatura de transición vítrea	60-70 °C	-
Coefficiente de dilatación térmica:	-	1,8e-05 /Kelvin

4.4.6.1 Simulación CFD

Define los aspectos del comportamiento que presenta el fluido estudiado. Para el tornillo de Arquímedes, al aplicar parámetros de simulación se presenta la distribución del flujo. La presión generada, o la iteración entre el fluido y las superficies helicoidales del tornillo.

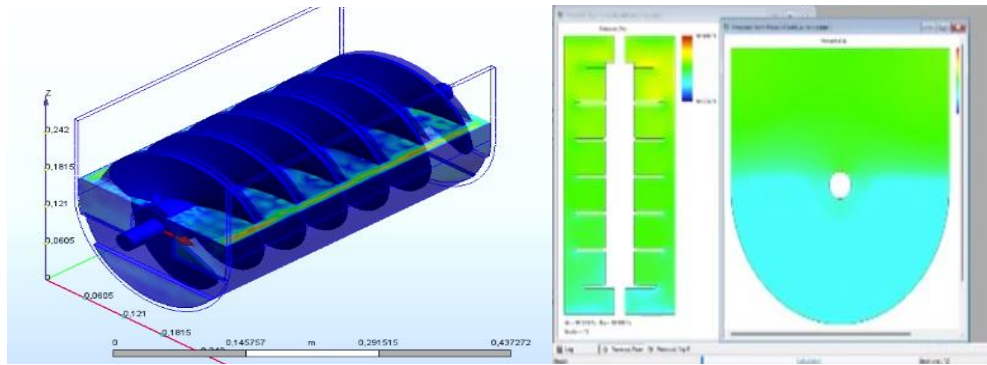


Figura 4.14 Comportamiento del agua en simulación CFD.

Se determina que el caudal empleado en la simulación CFD de $0,126 \text{ m}^3/\text{s}$ generar 146 rpm con una presión de 9282,558 Pa.+

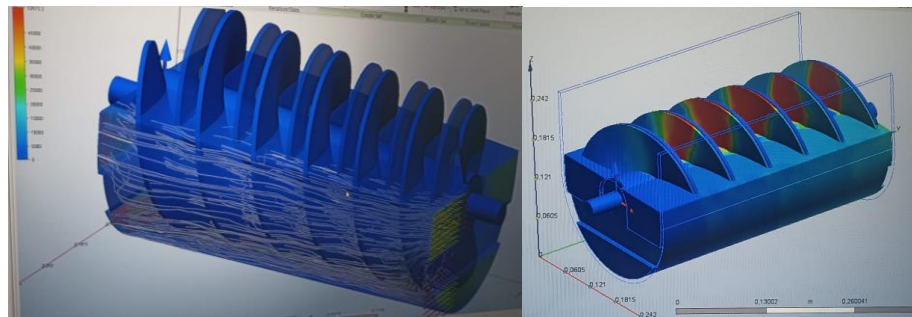


Figura 4.15 Comportamiento del agua a lo largo del tornillo.

4.4.6.2 Análisis de Tensiones

Este análisis por esfuerzos de tensión de Von mises se compara con el límite elástico del material para identificar posibles puntos de fallo estructural, evidenciando un valor de 8,83385 Pa, el cual nos da una mejor seguridad para la fabricación de hélices para que pueda soportar la presión del fluido.

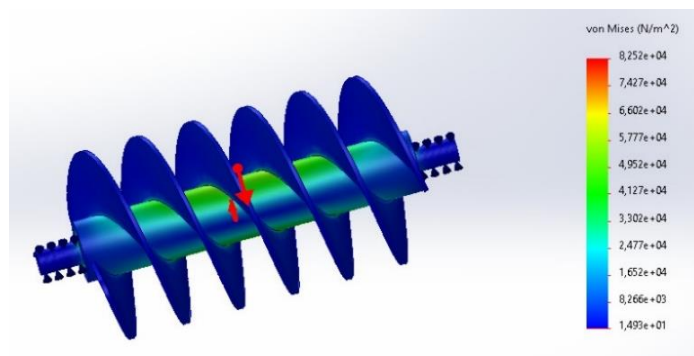


Figura 4.16 Tensiones de esfuerzo de Von Mises.

4.4.6.3 Análisis de Deformaciones

Las deformaciones que se genere en los alabes del tornillo, dependen del material, en este caso se eligió un acero AISI 304 con un espesor de 3mm. La siguiente figura evidencia que su

desplazamiento no es muy notorio, el cual concluye que las hélices pueden soportar el fluido durante el proceso de funcionamiento.

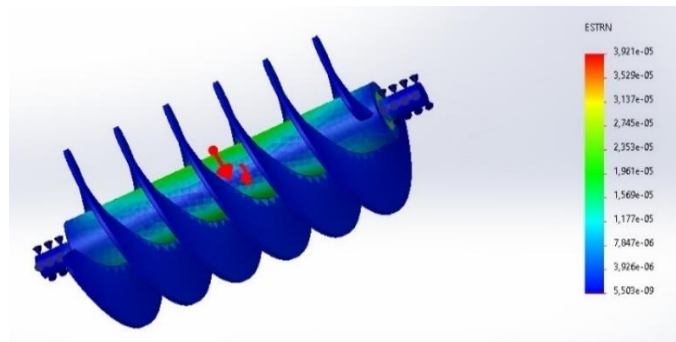


Figura 4.17 Deformaciones del tornillo.

Este tipo de análisis define si existe un cambio de longitud, por unidad de longitud, debido a una carga situada sobre el material. Relaciona el esfuerzo generado sobre el material, dividiendo la carga de deformación entre el área transversal.

4.4.6.4 Análisis de factor de seguridad

Tiene como objetivo determinar la seguridad de una estructura o componente capaz de resistir las cargas a las que está expuesto. Si el valor de factor es inferior a 1 indica que existe mayor riesgo de fallas bajo las condiciones de cargas actuales, mientras que si el valor es superior a 1 indica que la estructura puede soportar dichas cargas sin presentar fallos.

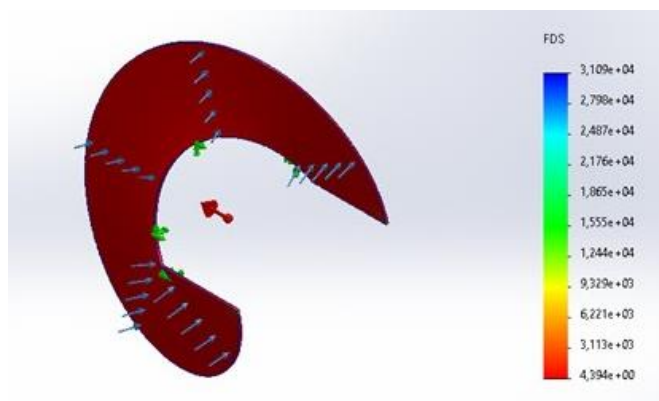


Figura 4.18 Análisis de factor de potencia hélice.

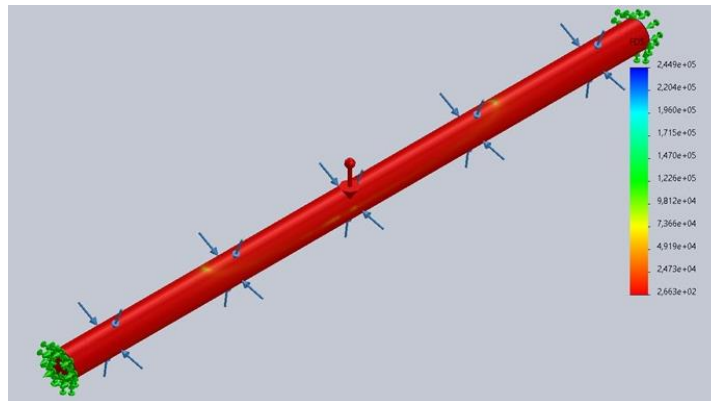


Figura 4.19 Análisis de factor de seguridad – Eje.

Considerando que la fabricación del prototipo de la turbina se realiza mediante impresión 3D, el proceso necesita inicialmente un modelo tridimensional del diseño deseado. Mediante software de SolidWorks, se elaboró el archivo que representa las dimensiones y geometría del eje y la hélice. Luego, este archivo se cargaría a la impresora 3D, seleccionando el filamento PLS.

La inversión que se presentó para la fabricación del prototipo del tornillo es menor al comparar con un servicio de mecanizado, presentado aspectos positivos como, por ejemplo, el ahorro de materiales, ya que únicamente se utilizó la imprea 3D y filamento plástico.

Fase de experimentación.

Una vez seleccionado los componentes que se utilizaron en la experimentación, se procedió a la construcción de la misma y mediante pruebas experimentales se logró determinar su buen funcionamiento.

Canal

Se recolecto información detallada sobre el sitio donde se implementará la turbina que sirve como base del diseño, dando como resultado:

- Velocidad del agua: 0,506 m/s
- Caudal disponible: 0.126 m³/s
- Área de canal: 0.25 m²

Lo cual satisface la necesidad para una buena operación y no tener problemas de presión a lo largo del canal por el caudal.

Con los caudales obtenido y los diferentes grados de inclinación se obtuvieron los siguientes resultados:

Con el previo estudio de la zona de experimentación se obtuvieron valores de caudal y velocidad aprovechables para generar energía mecánica.

4.5 DIMENSION DEL TORNILLO DE ARQUÍMEDES

Mediante los cálculos teóricos y experimentales se obtiene los siguientes resultados sobre las dimensiones y características de la turbina tipo tornillo de Arquímedes.

Tabla 4.28 Parámetros sobre el tornillo de Arquímedes.

Nombre	Símbolo	Valor	Unidades
Diámetro exterior de la hélice	ϕ_3	0,20	m
Diámetro del eje del tornillo	ϕ_2	0,0254	m
Angulo exterior de la hélice	α	42	a
Longitud de la hélice	L_e	0,40	m
Avance	p	0,2	m
Paso	P_x	0,1	m
Área de contacto del agua	A	0,0117	m^2
Centroide	Y_c	0.0496	m
Fuerza de empuje del agua en dirección del plano x	F_x	5,7216	N
Fuerza tangencial al tornillo	F_z	5,1517	N
Torque en el tornillo	T	1.020	N*m
Velocidad angular	w	195,89	rad/s
Revoluciones por minuto	N	160	RPM
Potencia teórica	$P_{teorica}$	199,80	kW
Eficiencia teórica	η	0,32	

Con ayuda del prototipo y simulaciones que se empleó, obtuvimos valores experimentales en campo, al realizar una comparación determinamos la rentabilidad que tendrá el proyecto.

Tabla 4.29 Resultados.

	Simulado	Experimental	Simulado	Experimental
Inclinación	20°	20°	30°	30°
Velocidad	0,221 m/s	0,2961 m/s	0,619 m/s	0,506 m/s
Caudal	0,074 m ³ /s	0,074 m ³ /s	0.126 m ³ /s	0.126 m ³ /s
Potencia	618.13 w	199,80 W	618.13 W	199,80 W
RPM	97	94	146	159.8

4.5.1 Rendimiento de la turbina

La capacidad de funcionamiento de la turbina abarca una gran capacidad de adaptarse a diferentes caudales si se requiere menor o mayor energía de la que se obtuvo con las condiciones iniciales, se obtuvo como resultado que el prototipo de turbina de tornillo de Arquímedes puede trabajar desde un caudal mínimo de $0.0009 \text{ m}^3/\text{s}$ a $11 \text{ rev}/\text{min}$ hasta un caudal máximo de $0.0126 \text{ m}^3/\text{s}$ con $160 \text{ rev}/\text{min}$.

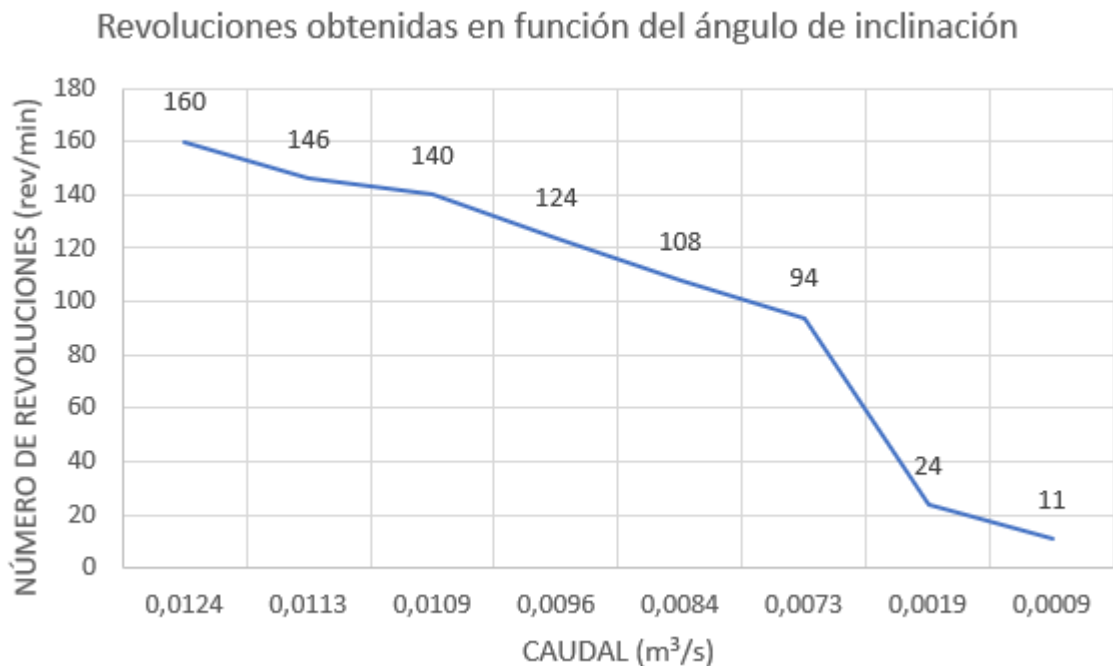


Figura 4.20 Rendimiento de la turbina en base al caudal.

En la **Figura 4.13** se muestra el número de revoluciones generadas con el caudal que se trabaja. Determinando bajo experimentación que la turbina a 30° funciona con un caudal de $0.0126 \text{ m}^3/\text{s}$ generando 160 RPM . Comparando con el resultado simulación se concluye que la turbina es capaz de soportar y generar mayor energía.

Para determinar la potencia mecánica generada por el tornillo en base a la potencia hidráulica se obtuvo que mayores caudales existe mayor eficiencia y a menores caudales menor eficiencia tal como muestra la **Figura 4.14**.

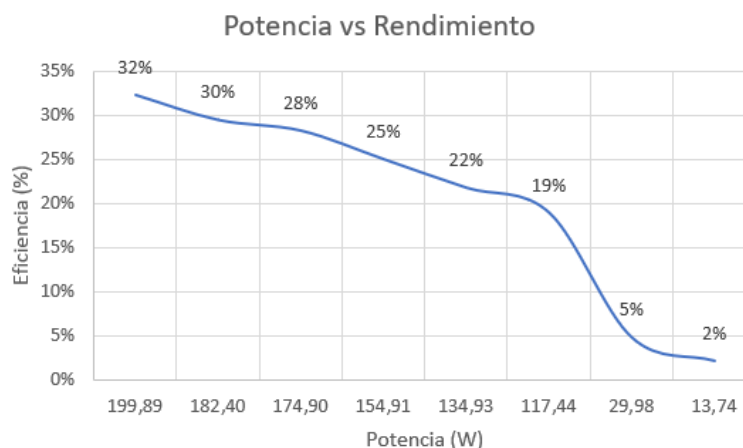


Figura 4.21 Eficiencia de la turbina en base a la potencia.

4.6 ANÁLISIS ECONÓMICO

El presupuesto para la construcción de la turbina de Arquímedes cubre todos los aspectos para su fabricación, incluyendo materiales, mano de obra y equipos necesarios para su desarrollo, según se detalla en las siguientes tablas:

Tabla 4.30. Análisis económico de la fabricación de la turbina

Material	Cantidad	Precio USD
Pernos M10x1.5x30	8	6,00
Tuerca M10x1.5	16	5,00
Arandela 10mm	16	3,6
Pernos M10x1.5x60	8	6,00
Pernos M10x1.5x25	4	3,00
Tuerca M12x1.75	4	4,00
Arandela 12 mm	4	1,40
Plancha de Acero Inoxidable	1	20,00
Tubo Cuadrado in 5m	2	6,50
Chumaceras AISI 1045	2	8,00
Eje solido 1in	1	8,00
Turbina Hélice IMPRESIÓN 3D	1	140,00
Total		211,5

El presupuesto para la construcción de la turbina de Arquímedes cubre todos los aspectos para

Tabla 4.31 Gastos directos.

Costos directos de fabricación	Valor Final (USD)
Costo de materiales	211,5
Costo de mano de obra	130,00
Total	341,50

Análisis costos directos

Como resultado se obtuvo un costo directo total de \$341,5 basado en una suma de costos de los materiales y costos de la mano de obra, valores con los que podremos calcular el porcentaje relativo de cada uno en relación al total.

Tabla 4.32 Datos previos experimentales.

	Formula	Porcentaje (%)
% Costos de materiales	$\left(\frac{\text{Costos de materiales}}{\text{costo directo total}}\right) * 100$	61,93
% Costos de mano de obra	$\left(\frac{\text{Costos de mano de obra}}{\text{costo directo total}}\right) * 100$	38,07
Total		100,00

Este análisis permite identificar y evaluar los gastos que se relacionan directamente con la producción de la turbina. En particular, el valor porcentual más significativo de los costos directos es de 61.93% correspondiente a los materiales empleados, mientras que aproximadamente el 38,07% restante se asigna a la mano de obra.

De esta forma se puede tomar decisiones estratégicas que aumenten la rentabilidad del proyecto, entendiendo de mejor manera los costos de cada componente, permitiendo detectar el uso de recursos a menores gastos capaces de brindar una mejor eficiencia.

Análisis costos indirectos

Los costos indirectos son valores económicos que están relacionados directamente con el desarrollo de la turbina, aunque son fundamentales para su ejecución.

según se detalla en las siguientes tablas:

Tabla 4.33 Análisis económico de desarrollo de pruebas

Asunto	Precio USD
Transporte y suministros	20,00
Ingeniera en detalle e investigación	15,00
Gastos inesperados	30,00
Total	65,00

Análisis

Para determinar el porcentaje correspondiente a los costos indirectos se toma en cuenta el costo directo total, tal como muestra

Tabla 4.34 Datos previos experimentales.

	Formula	Porcentaje (%)
% Costos indirectos	$\left(\frac{\text{Costos indirectos}}{\text{CT directos} + \text{costos indirectos}}\right) * 100$	15.99

Como resultado se obtiene que los costos indirectos representan el 15,99% aproximadamente de total de los costos. Dichos valores ayudan a proporcionar una visión general sobre el gasto total, siendo útil para la toma de decisiones, planificación y comprensión sobre el presupuesto económico, permitiendo una gestión financiera que pueda beneficiar a su producción.

Tabla 4.35 Análisis económico total

Descripción	Precio USD
Costos directos	341,50
Costos indirectos	65,00
Total	406,50

Análisis detallado

Los costos directos, como son los materiales y mano de obra son asignados directamente a la fabricación de la turbina, mientras que los costos indirectos se distribuyen gastos que no se contemplaban en el presupuesto inicial, ya que aparecen dentro del proceso de producción.

Los costos directos afectan el costo unitario de la turbina, mientras que los costos indirectos se encargan de determinar el costo total de producción.

Los costos directos son más fáciles de controlar y ajustar durante su desarrollo, mientras que los costos indirectos requieren un análisis mayor para gestionar gastos generales.

Los costos directos ayudan a evaluar la rentabilidad de la fabricación, para entender el costo de producción, mientras que los costos indirectos sirven para evaluar el impacto en el costo total del proyecto.

Permite examinar la eficiencia en la utilización de materiales y mano de obra, siendo un beneficio para optimizar costos. Mientras que los costos indirectos pueden ser ventajosos para evaluar y encontrar oportunidades de mejorar y controlar cada componente.

5. IMPACTOS

5.1 IMPACTO TECNOLÓGICO

En la actualidad más del 55% de la energía limpia que se genera a nivel mundial es producida mediante la fuerza motriz del agua por la Hidroeléctricas.

La adaptabilidad del diseño a diversas condiciones hidráulicas, la conversión de energía y la estabilidad estructural son aspectos cruciales brindando la posibilidad de personalizar el diseño del tornillo según las necesidades requeridas. Además, la impresión 3D permite la fabricación

de tornillos de Arquímedes a menor escala, facilitando la validación del concepto siendo un acceso a tecnología de energía renovable en áreas donde sistemas tradicionales son demasiado grandes.

5.2 IMPACTOS AMBIENTALES

En Ecuador, las centrales hidroeléctricas se consideran uno de los principales mecanismos de producción de energía de fuentes renovables, cubriendo cerca del 90% de generación total del país. Estas instalaciones pueden influir en los ecosistemas o áreas aledañas, es decir, los efectos ambientales serán mínimos, ya que el diseño no necesita modificaciones del área.

5.3 IMPACTOS ECONÓMICOS

La generación de energía limpia y renovable genera un ahorro energético del 72,4% a través de uso de caudales, así también ganancias en procesos y tiempo si se necesita energía adicional para sistemas eléctricos.

La inversión en materiales representa el 61.93%, siendo un aspecto clave para el diseño que, si bien no existen manuales ni leyes de construcción para turbinas a pequeña escala, se considera como indicador para diferentes objetivos.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- La revisión de documentación bibliográfica, permitió reconocer elementos y parámetros esenciales para el diseño de la turbina tipo tornillo de Arquímedes. El diseño del tornillo y la estructura se creó con el software de simulación SolidWorks modelando un tornillo con diámetro de 0,2 m y longitud de 0,4 m, alabes con un grado de inclinación de 42° y el tornillo con un ángulo de inclinación de 30°.
- La tecnología de impresión 3D se mostro como una alternativa para la creación del prototipo de la turbina, ya que brinda la posibilidad de realizar modificaciones dentro del proceso de impresión, permitiendo crear un diseño personalizado. El filamento que se ocupó en la fabricación es de tipo PLA y tu un tiempo de impresión de 34 horas. Los costos de inversión para este tipo de turbinas hidráulicas.
- Mediante simulación CFD se analizó el comportamiento del agua dentro del sistema teniendo en cuenta parámetros como el caudal, velocidad del agua, dimensión del tornillo permitiendo crear el prototipo experimental, demostrando que la simulación es

un método efectivo para predecir el comportamiento de la turbina bajo ciertas condiciones.

Los procesos de simulación y experimentación facilito conocer el funcionamiento del del diseño y teniendo en cuenta parámetros como la velocidad y caudal del agua y grados de inclinación del tornillo para comparar y determinar que en la simulación el tornillo gira a 146 rev/min mientras que el prototipo experimental lo hace a 160 rev/min, mostrando una correlación en los resultados obtenidos.

- Los costos de inversión para este tipo de turbinas son relativamente bajo tomando en cuenta los gastos en el material, la mano de obra y gastos inesperados, además es un sistema que se autorregula y no necesita mantenimiento recurrente siendo una opción viable si se desea generar energía de forma autónoma. La inversión en la fabricación del prototipo es de 406,5 USD.

6.2 RECOMENDACIONES

- Realizar una investigación de campo para diseñar un modelo acorde a las condiciones del lugar, asegurando que el diseño cumpla con su funcionabilidad en la zona.
- Para el diseño del tornillo de Arquímedes, es recomendable investigar el uso de materiales avanzados y compuestos para la impresión 3D.
- En la fabricación de la base para la turbina es mejor utilizar máquinas herramientas adecuadas para su elaboración y facilitar el avance del trabajo.
- Se debe tomar en cuenta que el torque de la turbina es relativamente bajo por lo cual si ponemos una carga el movimiento del tornillo se detendrá ya que el torque del tornillo es de 1.02 Nm.

REFERENCIAS

- [1] J. Santa Cruz, *Análisis energético de un tornillo de Arquímedes para canales de regadío con una caída de 2m y caudal de 2m³/s*. Lima: Universidad Católica del Perú, 2018. Accedido: 22 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio//handle/20.500.12404/13235>
- [2] L. E. Escobar Luna y D. M. Lucio Yugsi, «Diseño y construcción de una mini turbina tipo tornillo de Arquímedes para ser instalada en canales primarios abiertos y generar energía

mecánica», Repositorio Universidad Técnica de Ambato, Ambato, 2019. Accedido: 1 de febrero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/29768>

[3] C. A. Barreto Gómez y J. A. Ramos Pereda, «Influencia del ángulo de inclinación en el rendimiento de una turbina de arquímedes», *Repos. Inst. - UCV*, 2022, Accedido: 15 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/105478>

[4] UNESCO, «33 - Ciencias Tecnológicas | Revista Scientific». Accedido: 22 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.indteca.com/ojs/index.php/Revista_Scientific/technological_sciences

[5] BBVA, «¿Cuáles son los usos del agua? La importancia de los recursos hídricos», BBVA NOTICIAS. Accedido: 15 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.bbva.com/es/sostenibilidad/cuales-son-los-usos-del-agua-la-importancia-de-los-recursos-hidricos/>

[6] V. I. Miranda Márquez, «Análisis del aporte de los proyectos hidroeléctricos al cambio de la matriz energética en el Ecuador, período 2013-2017», ago. 2018, Accedido: 22 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.ug.edu.ec/handle/redug/34325>

[7] Arcernnr, «Generación», en *2022 - Atlas del sector eléctrico ecuatoria*, 2022, p. 22. Accedido: 22 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.studocu.com/ec/document/universidad-politecnica-salesiana/electricidad-industrial/atlas-2022-baja-atlas-electrico-2023/53559789>


[8] Plena Energía, «Generación de energía eléctrica: Qué es, tipos, tendencia en España y más». Accedido: 15 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.plena-energia.com//post/generacion-de-energia-electrica>

[9] Ingfocol Ltda, «HIROENERGÍA», en *ATLAS POTENCIAL HIDROENERGÉTICO DE COLOMBIA*, Bogotá: Gobierno de Colombia, 2015, pp. 26-28. [En línea]. Disponible en: <https://www1.upme.gov.co/Paginas/Primer-Atlas-hidroenergetico-revela-gran-potencial-en-Colombia.aspx>

[10] Secretaria de Energía, «Pequeños Aprovechamientos Hidroeléctricos», p. 6, 2008.

[11] G. Chávez y A. Ricardo, «Micro Generación Hidroeléctrica», 2003, Accedido: 21 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.academia.edu/13894216/Micro_Generaci%C3%B3n_Hidroel%C3%A9ctrica

- [12] «Hydrodynamic Screws.pdf». Accedido: 24 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://www.energyenc.com/data/Hydrodynamic%20Screws.pdf>
- [13] B. Zamora Parra y A. Viedma Robles, *Máquinas hidráulicas: teoría y problemas*. Universidad Politécnica de Cartagena, 2016. Accedido: 24 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.upct.es/handle/10317/5476>
- [14] «TURBINAS HIDRÁULICAS». Accedido: 24 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en:
<http://www.jimic.cl/appv/Congreso/PDF/TURBINAS%20HIDR%20ULICAS%20Pedro%20Fernandez%20Diez.pdf>
- [15] ResearchGate, «Figure 1. The typical range of flow rates and application heights of...» Accedido: 24 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/The-typical-range-of-flow-rates-and-application-heights-of-each-type-of-turbine-in-3_fig1_328397910
- [16] Enel Green Power, «Turbina hidroeléctrica». Accedido: 24 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.enelgreenpower.com/es/learning-hub/energias-renovables/energia-hidroelectrica/turbina-hidroelectrica>
- [17] areatecnologia, «Turbinas Hidraulicas». Accedido: 24 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.areatecnologia.com/mecanismos/turbinas-hidraulicas.html>
- [18] J. C. Alberto Mejía, «Diseño de una turbina hidráulica basada en el tornillo de Arquímedes», engd, Universidad de El Salvador, 2011. Accedido: 24 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/1788/>
- [19] exproable, «Cómo hacer un tornillo de Arquímedes». Accedido: 24 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://explorable.com/es/tornillo-de-arquimedes>
- [20] A. Raza, M. Saleem, y Y. Saleem, «Modeling Of Archimedes Turbine For Low Head Hydro Power Plant In Simulink MATLAB», *Int. J. Eng. Res. Technol.*, vol. 2, n.º 7, jul. 2013, doi: 10.17577/IJERTV2IS70633.
- [21] H. V. Cando Valverde, «Implementación de una mini turbina tipo tornillo sin fin para la generación de energía eléctrica», mar. 2022, Accedido: 19 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.utc.edu.ec/handle/27000/9332>

- [22] C. V. Miranda, «Impresoras 3D: el futuro del modelado», [En línea]. Disponible en: https://www.acta.es/medios/articulos/ciencias_y_tecnologia/074001.pdf
- [23] P. Rojas, «Valores de rugosidad “n” de Manning en canales», Ingeciv. Accedido: 21 de junio de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ingeciv.com/valores-de-rugosidad-n-de-manning-en-canales/>
- [24] J. Bolivar y J. Gordillo, «Propuesta de un manual de diseño, estandarización y fabricación de turbinas tipo tornillo de Arquímedes para pequeñas centrales hidroeléctricas», UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA, CUENCA, 2022. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/24059/1/UPS-CT010282.pdf>
- [25] J. L. Alcantara Otiniano y D. Velasquez Maza, «Simulación de generador hidroeléctrico basado en el tornillo de Arquímedes para suministrar energía eléctrica en el fundo San Miguel-Balsapuerto», *Repos. Inst. - UCV*, 2023, Accedido: 14 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/130113>
- [26] Importaceros, «Tubo Cuadrado Ecuador  Tubo estructural». Accedido: 19 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.importaceros.com/ecuador-quito/tubo-cuadrado-estructural-y-grandes-dimensiones/>
- [27] Sparex Publication, «CHUMACERAS». Accedido: 19 de agosto de 2024. [En línea]. Disponible en: https://nz.sparex.com/catalogue_3d/700047/index.html?page=416
- [28] M.-F. Mohedano-Castillo, B. M. López-Rebollar, C. Díaz-Delgado, H. Salinas-Tapia, y A. Posadas-Bejarano, «Análisis de la influencia del número de álabes en la hidrodinámica y potencia mecánica de un tornillo de Arquímedes empleando CFD», *Ideas En Cienc. Ing.*, vol. 1, n.º 1, Art. n.º 1, mar. 2023, doi: 10.36677/ideaseningeneria.v1i1.20051.

7. ANEXOS

CERTIFICACIÓN DE INFORME DE SIMILITUD

En mi calidad de Tutor de la Propuesta Tecnológica con el tema: “SIMULACIÓN NUMÉRICA Y EXPERIMENTAL DE UNA TURBINA DE TORNILLO DE ARQUÍMEDES FABRICADA EN 3D PARA OPTIMIZAR SU RENDIMIENTO EN ENERGÍA HIDROCINÉTICA”, de García Guano Roosevelt Israel; Pillisa Rocha Marlon Humberto de la carrera de Ingeniería Electromecánica, remito la captura de pantalla del reporte del sistema de reconocimiento de texto Classroom, con un porcentaje de coincidencias del 1%; y, expreso una vez más, mi conformidad en cuanto a la dirección del trabajo de titulación.

Resumen

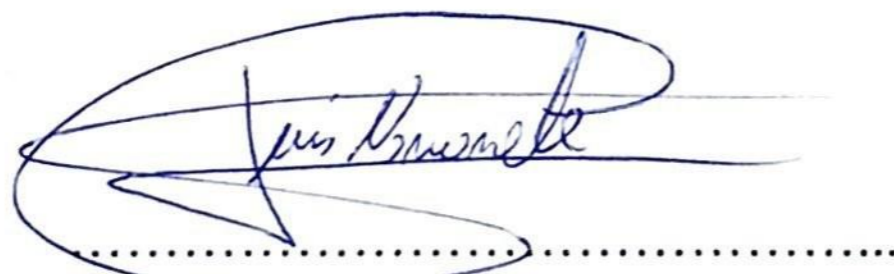
Fragmentos marcados	10	1 %
Fragmentos citados o entrecomillados	3	0,4 %

Coincidencias de la Web

http://190.15.139.147/bitstream/27000/11990/1/PI-002706.pdf	5	0,7 %
pucp.edu.pe	3	0,4 %
uta.edu.ec	3	0,4 %
academia.edu	1	0,1 %
ugto.mx	1	0,1 %

Particular que comunico a usted para los fines pertinentes.

Latacunga, 19 de agosto de 2024



Ing. Navarrete López Luis Miguel M.Sc.

C.C: 050259517-6

TUTOR

ANEXOS

- VELOCIDAD DEL AGUA

$$V_f = \frac{d}{t}$$
$$V_f = \frac{3 \text{ m}}{5,92 \text{ s}}$$
$$V_f = 0,506 \text{ m/s}$$

- ÁREA DE CAUDAL

$$A = b \cdot h$$
$$A = 0,5 \text{ m} \cdot 0,5 \text{ m}$$
$$A = 0,25 \text{ m}^2$$

- CAUDAL

$$Q = A \cdot V_f$$
$$Q = 0,25 \text{ m}^2 \cdot 0,506 \text{ m/s}$$
$$Q = 0,126 \text{ m}^3/\text{s}$$
$$\mathbf{V= 126 \text{ Lt}}$$

- PERDIDA DE FRICCIÓN

$$h_f = \frac{n^2 \cdot V_f^2 \cdot L}{R_h^{4/3}}$$
$$h_f = \frac{(0,017)^2 \cdot (0,506 \text{ m/s})^2 \cdot 3 \text{ m}}{\left(\frac{0,5 \text{ m} \cdot 0,5 \text{ m}}{0,5 \text{ m} + 2(0,5 \text{ m})} \right)^{4/3}}$$
$$h_f = 0,002458 \text{ m}$$

- PRESIÓN

$$P = H \cdot \rho \cdot g$$
$$P = 0,5 \text{ m} \cdot 997 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2$$
$$P = 4890,28 \text{ Pa}$$

- PESO ESPECÍFICO

$$\gamma = \rho \cdot g$$
$$\gamma = 997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot \frac{9,81 \text{ m}}{\text{s}^2}$$
$$\gamma = 9780,57 \text{ N/m}^3$$

- POTENCIA HIDRÁULICA

$$P = \rho \cdot g \cdot Q \cdot H$$
$$P = 997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,126 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot 0,5 \text{ m}$$
$$P = 618,13 \text{ W}$$

- VELOCIDAD DE ROTACIÓN MÁXIMA REVOLUCIONES POR MINUTO

$$RPM = \frac{50}{De^{2/3}}$$

$$RPM = \frac{50}{0,2^{2/3}}$$

$$RPM = 146,2$$

- VELOCIDAD ANGULAR

$$w = \frac{2\pi N}{60}$$

$$w = \frac{(2\pi * 146)}{60}$$

$$w = 15,289 \text{ rad/s}$$

- PAR MOTOR/ TORQUE

$$T = \frac{\text{potencia hidraulica}}{\text{velocidad angular}}$$

$$T = \frac{618,13 \text{ W}}{15,289 \text{ rad/s}}$$

$$T = 40,429 \text{ N} * m$$

- PASO DEL TORNILLO

$$P_x = \frac{P}{N}$$

$$P_x = \frac{0,2m}{2}$$

$$P_x = 0,1 \text{ m}$$

- ÁREA DEL ALABE

$$A = \frac{3}{8}\pi \cdot R^2$$

$$A = \frac{3}{8}\pi \cdot (0,1)^2$$

$$A = 0,0117 \text{ m}^2$$

- INERCIA DEL ALABE

$$Y_c = 0,4951 \cdot R$$

$$Y_c = 0,4951 \cdot 0,1 \text{ m}$$

$$Y_c = 0,0495 \text{ m}$$

- FUERZA DE EMPUJE DEL AGUA EN DIRECCIÓN DEL PLANO “X”

$$F_x = \rho \cdot g \cdot P_x \cdot A \cdot \text{sen}(\theta)$$

$$F_x = 997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,1 \text{ m} \cdot 0,0117 \text{ m}^2 \cdot \text{sen}(30)$$

$$F_x = 5,7216 \text{ N}$$

- FUERZA DE EMPUJE DEL AGUA EN DIRECCIÓN DEL PLANO “Z”

$$F_z = F_x \cdot \tan(\alpha)$$

$$F_z = 5,7216 \text{ N} \cdot \tan(42)$$

$$F_z = 5,1517 \text{ N}$$

- TORQUE

$$T = p \cdot g \cdot Le \cdot A \cdot \text{sen}(\theta) \cdot \tan(\alpha) \cdot Y_c$$

$$T = 997 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 0,4 \text{ m} \cdot 0,0117 \text{ m}^2 \cdot \text{sen}(30) \cdot \tan(42) \cdot 0,0495 \text{ m}$$

$$T = 1,020 \text{ Nm}$$

- VELOCIDAD ANGULAR

$$w = \frac{Q \cdot \tan(\alpha)}{A \cdot Y_c}$$

$$w = \frac{0,126 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot \text{TAN}(42)}{0,0117 \text{ m}^2 \cdot 0,0495 \text{ m}}$$

$$w = 195,89 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

- POTENCIA TEÓRICA

$$Pot = T \cdot w$$

$$Pot = 1,02 \text{ Nm} \cdot 195,89 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$$

$$Pot = 199,8 \text{ W}$$

- VELOCIDAD LINEAL

$$v = w \cdot r$$

$$v = 195,89 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \cdot 0,1 \text{ m}$$

$$v = 19,58 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

- **REVOLUCIONES**

$$n = \frac{v \cdot 60}{\pi \cdot d}$$
$$n = \frac{19,58 \cdot 60}{\pi \cdot 0,2}$$
$$n = 1870 \text{ rpm}$$

- **EFICIENCIA**

$$\eta = \frac{\text{Potencia teorica}}{\text{Potencia Hidráulica}}$$

$$\eta = \frac{199,80}{618,13}$$

$$\eta = 0,32 \approx 32\%$$

- **PESO DEL TORNILLO**

$$WT = mT \cdot g$$

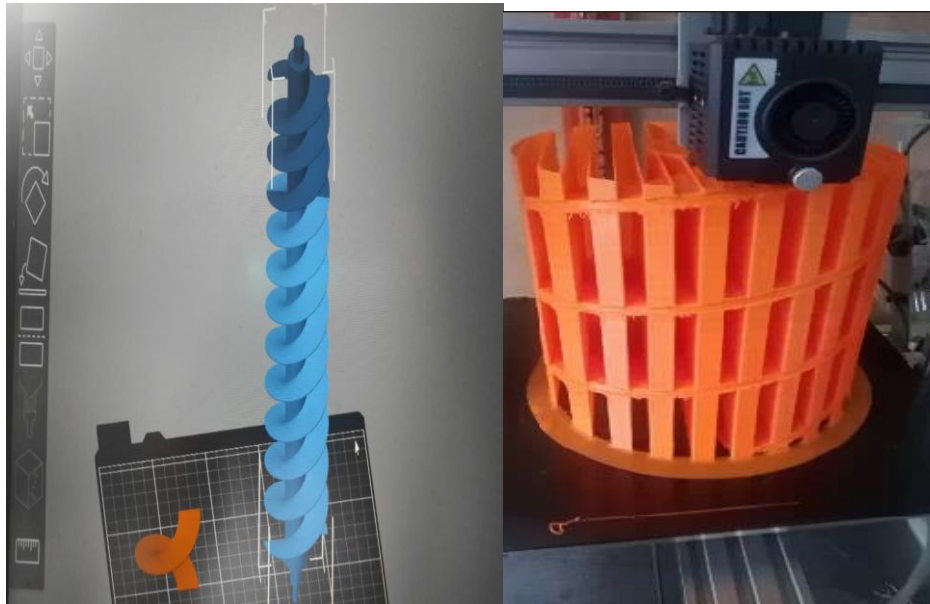
$$WT = 5 \text{ Kg} \cdot 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$WT = 49,05 \text{ N}$$

ANEXO 1

FABRICACION DEL TORNILLO DE ARQUÍMEDES
MEDIANTE IMPRESIÓN 3D

1-1



Proceso de impresión del eje hueco y tornillo.



Tornillo de Arquímedes en material PLA.

ANEXO 2

CAMA Y BASE DONDE SE COLOCA EL TORNILLO DE
ARQUÍMEDES

1-1



Fabricación de cama y base para el tornillo



Ensamblaje de la base, cama y tolva

ANEXO 3

ENSAMBLAJE DEL PROTOTIPO DE LA TURBINA
HIDRAULICA

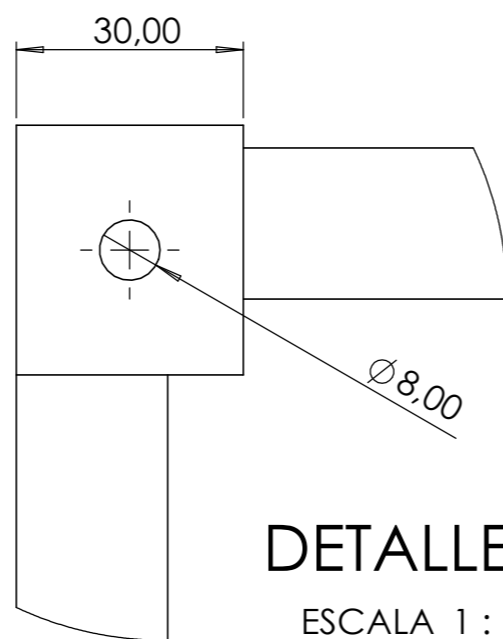
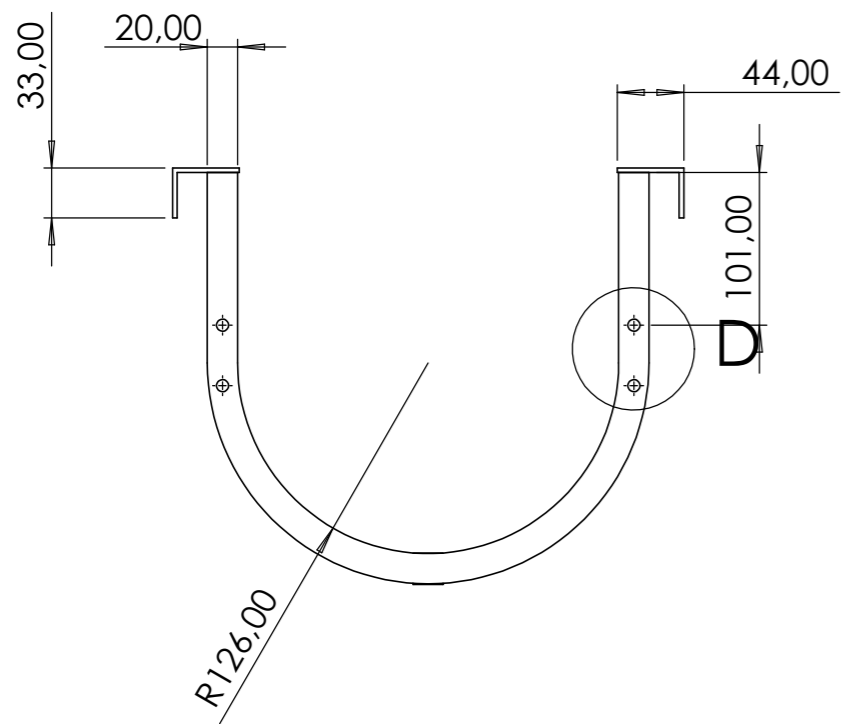
1-1



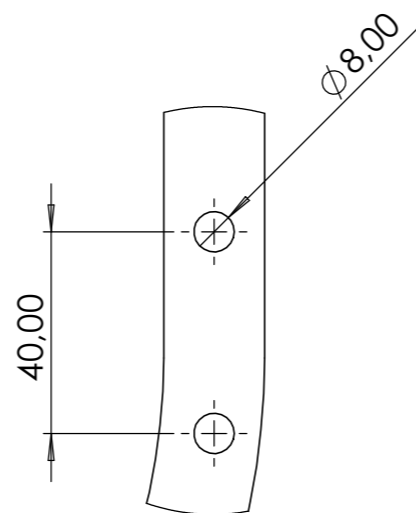
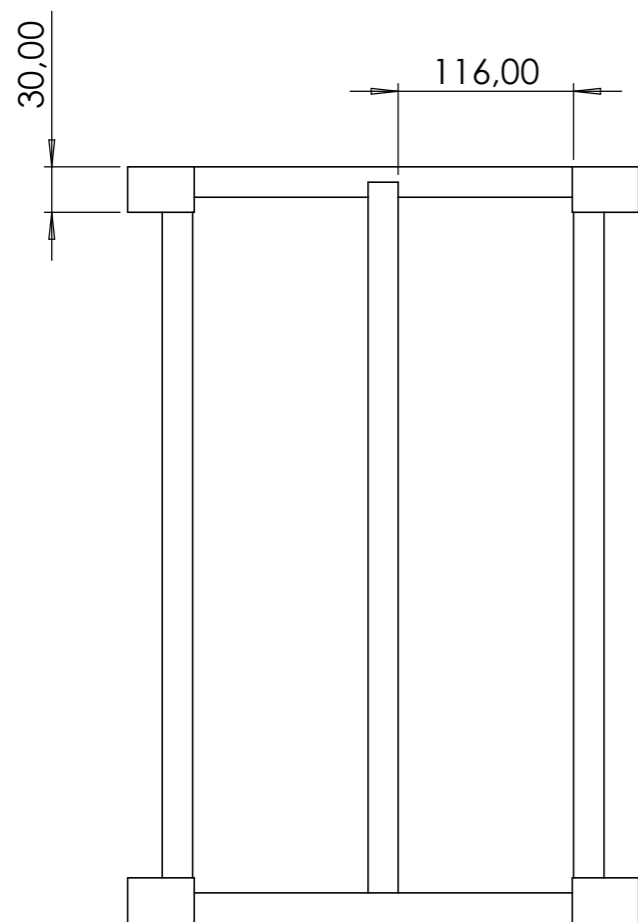
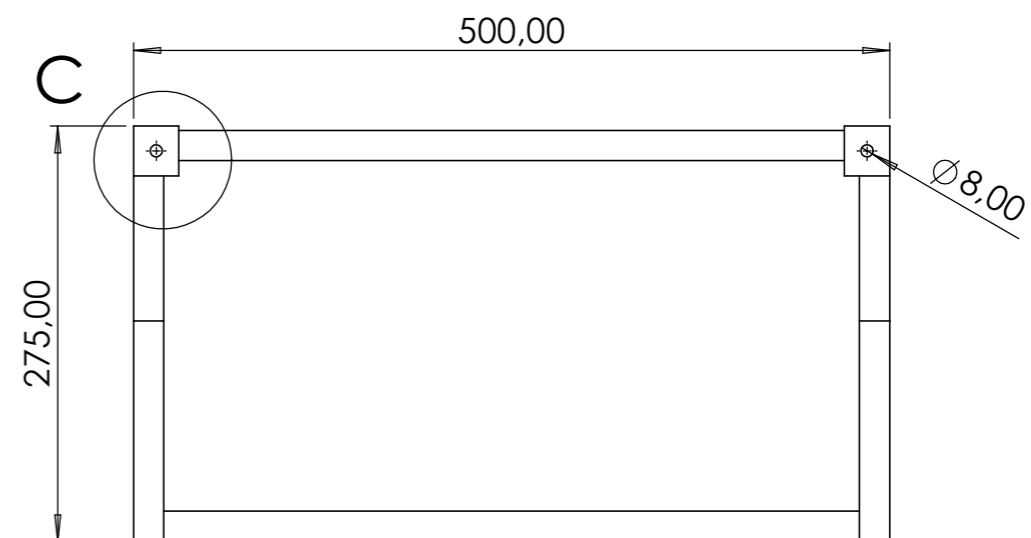
Proceso de colocación del tornillo en la base y medida de grados de inclinación



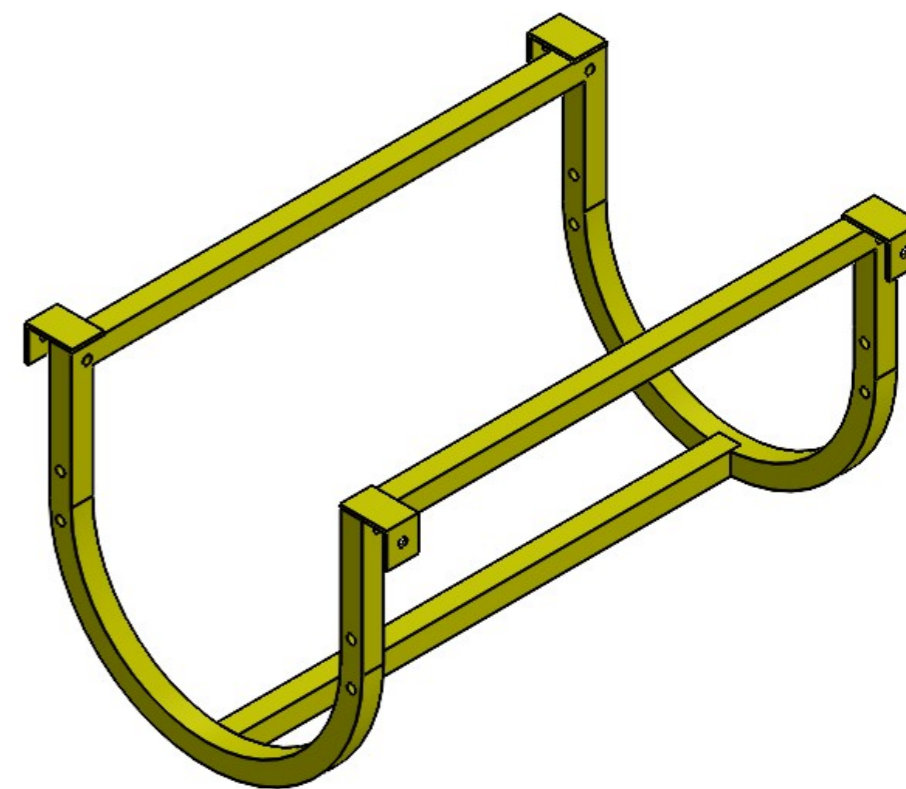
Proceso de pintado de la base y estructura



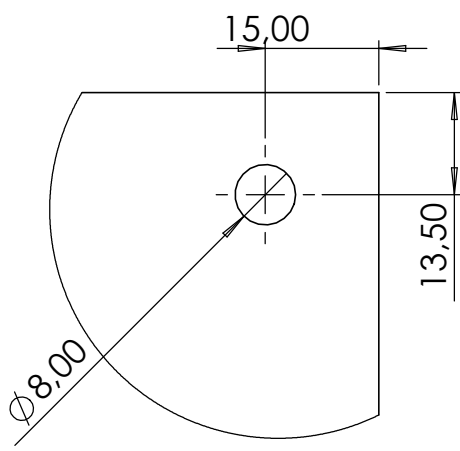
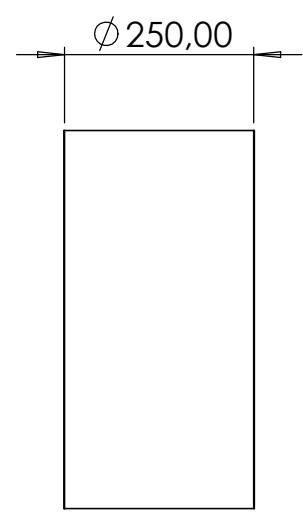
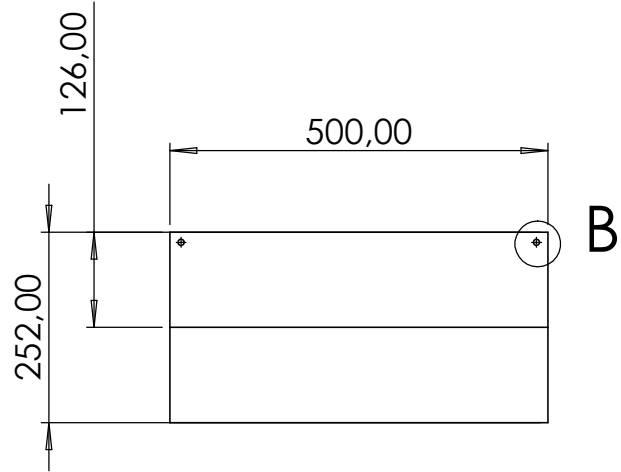
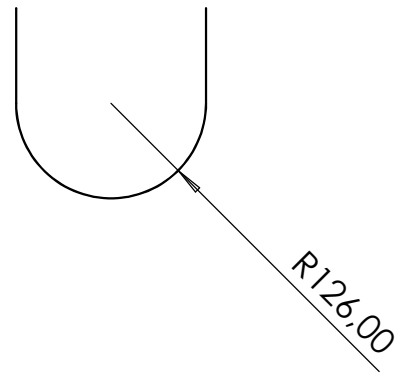
DETALLE C
ESCALA 1 : 1



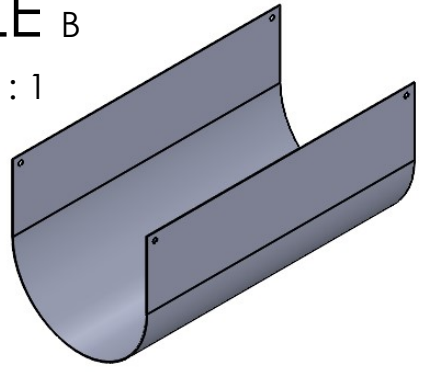
DETALLE D
ESCALA 2 : 3



				Tolerancia	Peso	Material	
				+/- 1		Acero Inoxidable	
						Denominación	Escala
						Soporte de la Tolva	1:5
				Fecha	Nombres		
				Dib.	Garcia R, Pillisa M		
				Rev.	Tutor		
				Aprob.	Tutor		
				UTC		N.º DE HOJA	
				INGENIERIA ELECTROMECHANICA		3	
Edic.	Modificacion	Fecha	Nombre				



DETALLE B
ESCALA 1 : 1



				Tolerancia	Peso	Material	
				+/- 1		Acero Inoxidable	
				Fecha	Nombres		Denominacion
				Dib.	Garcia R, Pillisa M		TOLVA
				Rev.	Tutor		
				Aprob.	Tutor		
				UTC INGENIERIA ELECTROMECANICA		N.º DE HOJA	Escala
						2	1:10
Edic.	Modificacion	Fecha	Nombre				