



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA
PROYECTO TÉCNICO

PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

TEMA:

**“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MINI TURBINA TIPO TORNILLO
DE ARQUÍMEDES PARA SER INSTALADA EN CANALES PRIMARIOS
ABIERTOS Y GENERAR ENERGÍA MECÁNICA”**

AUTOR:

Daniel Mesías Lucio Yugsi

TUTOR:

Ing. Luis Eduardo Escobar Luna

2019

CERTIFICACIÓN

Yo Ing. Luis Escobar certifico que el presente proyecto técnico bajo el tema **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MINI TURBINA TIPO TORNILLO DE ARQUÍMEDES PARA SER INSTALADA EN CANALES PRIMARIOS ABIERTOS Y GENERAR ENERGÍA MECÁNICA”**, realizado por el señor Daniel Mesías Lucio Yugsi egresado de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica, carrera de Ingeniería Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, se desarrolló bajo mi inspección, siendo un proyecto elaborado de manera personal.

Ambato, Noviembre del 2018.

Ing. Luis Escobar

TUTOR

AUTORÍA

Yo, Daniel Mesías Lucio Yugsi, con CI. 1804437166 egresado de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, certifico por medio de la presente que los criterios y el contenido del proyecto técnico con el tema **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MINI TURBINA TIPO TORNILLO DE ARQUÍMEDES PARA SER INSTALADA EN CANALES PRIMARIOS ABIERTOS Y GENERAR ENERGÍA MECÁNICA”**, es de mi completa autoría.

Ambato, Noviembre del 2018.

Daniel Mesías Lucio Yugsi

AUTOR

DERECHOS DE AUTOR

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que haga de este proyecto técnico o parte de él, un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución. Cedo los Derechos en línea patrimoniales de mi proyecto técnico dentro de las regulaciones de la universidad, siempre y cuando esta reproducción no suponga una ganancia económica y se realice respetando mis derechos de autor.

Ambato, Noviembre del 2018.

Daniel Mesías Lucio Yugsi

AUTOR

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

Los suscritos profesores calificadores, una vez revisado en su totalidad el proyecto técnico realizado por el señor Daniel Mesías Lucio Yugsi, de la Carrera de Ingeniería Mecánica, aprueban el tema: **“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MINI TURBINA TIPO TORNILLO DE ARQUÍMEDES PARA SER INSTALADA EN CANALES PRIMARIOS ABIERTOS Y GENERAR ENERGÍA MECÁNICA”**

Ambato, Noviembre del 2018

DOCENTE CALIFICADOR

DOCENTE CALIFICADOR

DEDICATORIA

La vida es una constante lucha para superar difíciles retos, y uno de ellos es la universidad. Después de haber pasado tantos años por ella, puedo darme cuenta que más que un reto es una etapa de gran importancia hoy en día, ya que por medio de esta puedo conseguir una herramienta que me ayude a vivir de una manera digna.

Esta tesis se la dedico a mis padres que día a día me han apoyado incondicionalmente, pese a mis fracasos.

A mi abuelita que desde el cielo me ha dado su bendición y siempre me ha guiado por el camino del bien.

AGRADECIMIENTO

Para poder alcanzar este logro he necesitado ayuda de muchas personas, sin embargo, tengo que agradecer principalmente a Dios, ya que sin su bendición no hubiera logrado esto, de igual manera a mi abuelita que fue como mi madre cuando estuvo conmigo, siempre apoyándome y educándome, mostrándome el camino correcto.

A mis padres Román Lucio y Margarita Yugsi que, a pesar de mis constantes errores y rebeldías durante este periodo, siempre me han apoyado y han creído en mí, han estado presentes en las buenas y malas brindándome palabras de aliento para seguir adelante.

A mi primo el Ing. Patricio Erazo, ya que desde que tengo uso de razón ha sido como mi hermano mayor y mi ejemplo a seguir, él me ha brindado su apoyo y consejos cuando más lo he necesitado y puedo decir que han sido de gran ayuda para alcanzar este logro.

Contenido

1. CAPÍTULO I. ANTECEDENTES	2
1.1. Tema.....	2
1.2. Antecedentes.....	2
1.3. Justificación.....	3
1.4. Objetivos.....	4
1.4.1. Objetivo general	4
1.4.2. Objetivos específicos	4
2. CAPÍTULO II. FUNDAMENTACIÓN	5
2.1. Microgeneración eléctrica	5
2.1.1. Introducción	5
2.1.2. Conceptos de microgeneración	6
2.1.3. Energía hidroeléctrica	7
2.2. Máquinas hidráulicas.....	8
2.2.1.1. Definición.....	8
2.2.2. Componentes.....	10
2.2.3. Clasificación de las turbinas hidráulicas	11
2.3. Turbina tipo tornillo de Arquímedes	12
2.3.1. Análisis de la turbina tipo tornillo de Arquímedes	12
2.3.2. Características de los canales de regadíos.....	23
2.3.3. Ventajas y desventajas de la turbina de Arquímedes.....	23
2.3.4. Caudales óptimos para la turbina de Arquímedes.....	24
2.4. Ecuaciones fundamentales de la hidráulica.....	25
2.4.1. Ecuación de continuidad	26
2.4.2. Ecuación de la energía	27
2.4.3. Ecuación de pérdidas.....	27
3. CAPÍTULO III. DISEÑO DEL PROYECTO	29
3.1. Selección de alternativas	29
3.1.1. Alternativa 1.....	29
3.1.2. Alternativa 2.....	30
3.1.3. Alternativa 3.....	31
3.1.4. Evaluación de soluciones.	32
3.2. Cálculos y modelo operativo	34
3.2.1. Parámetros para el diseño.....	34

3.2.1.1.	Medición de la geometría del canal	34
3.2.2.	Metodología	35
3.2.3.	Cálculos del tornillo sin fin	35
3.2.4.	Cálculos del eje de transmisión.....	38
3.2.5.	Cálculo de la estructura.....	43
3.2.6.	Cálculos de los pernos.....	45
3.2.7.	Selección de materiales	49
3.3.	Presupuesto.....	54
3.3.1.	Costos de materiales.....	54
3.3.2.	Costos de Mano de obra en soldadura y gastos generales	55
3.3.3.	Costos de soldadura.....	55
3.3.5.	Costo de fabricación de la turbina.....	58
3.4.	Especificaciones técnicas	59
4.	CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	60
4.1.	Conclusiones.....	60
4.2.	Recomendaciones	60
5.	Bibliografía	62
6.	Anexos	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Tornillo de Arquímedes.....	2
Figura 2. Central hidroeléctrica.....	5
Figura 3. Planta hidroeléctrica	6
Figura 4. Modelo de turbina tipo tornillo de Arquímedes.	7
Figura 5. Vista aérea de una hidroeléctrica.....	8
Figura 6. Modelo de turbina tipo tornillo de Arquímedes	12
Figura 7. Vista lateral del modelo	12
Figura 8. Ángulos y paso del tornillo.....	13
Figura 9. Desarrollo de la hélice	14
Figura 10. Inercia de los álabes del tornillo	15
Figura 11. Ubicación de centroides.....	16
Figura 12. Resumen de fórmulas	17
Figura 13. Triangulo de fuerzas	18
Figura 14. Triangulo de velocidades.....	20
Figura 15. Comparación en diagrama flujo vs cabeza de velocidad.....	24
Figura 16. Eficiencia de turbinas por medio del diagrama caudal vs rendimiento ...	25
Figura 17. Primer tipo de turbina	29
Figura 18. Segundo tipo de turbina.....	30
Figura 19. Tercer tipo de turbina.....	31
Figura 20. Diagrama de fuerzas.	39
Figura 21. Diagrama de momentos.	39
Figura 22. Reacciones y momentos	41
Figura 23 Reacciones y momentos	43
Figura 24. Unión empernada.....	45

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Evaluación de alternativas.	33
Tabla 2. Velocidad tomada del 20% de la línea de agua hacia abajo.	34
Tabla 3. Velocidad tomada del 60% de la línea de agua hacia abajo.	35
Tabla 4. Lista de materiales	49
Tabla 5. Costos de materiales.....	54
Tabla 6 . Costos de mano de obra de soldadura	55
Tabla 7. Parámetros de electrodo E6011.....	55
Tabla 8. Eficiencia de deposición	56
Tabla 9. Velocidad de deposición	56
Tabla 10. Factor de operación.....	57
Tabla 11. Costo de soldadura.....	57
Tabla 12. Costo del material de aporte.....	58
Tabla 13. Costo total	58
Tabla 14. Especificaciones técnicas de la turbina	59

RESUMEN EJECUTIVO.

Tema: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MINI TURBINA TIPO TORNILLO DE ARQUÍMEDES PARA SER INSTALADA EN CANALES PRIMARIOS ABIERTOS Y GENERAR ENERGÍA MECÁNICA”

Autor: Daniel Mesías Lucio Yugsi

Tutor: Ing. Luis Escobar Luna Mg.

Fecha: Enero 2019.

Para la elaboración de este proyecto técnico se utilizó datos obtenidos en el canal de riego Huachi-Pelileo, se procedió al diseño mecánico e hidráulico de la mini turbina tipo tornillo de Arquímedes, para lo cual fue de gran necesidad el uso de varios documentos de trabajos previos referentes al tema.

La mayor parte del tornillo se lo realizó con acero A36, exceptuando el eje, y las chumaceras, estos materiales no fueron fabricados, sino solo se adquirió en el mercado.

Se realizó un diseño óptimo para el cual se tomó en cuenta las medidas del canal, el peso de la estructura, su montaje y transporte.

Por medio de cálculos según el modelo teórico de la turbina se obtuvo una potencia que se encuentra en el rango de 335 a 380 W y un torque de entre 15 a 25 Nm.

Se determinó que la construcción de la turbina debe tener un largo de 3 metros, un ancho de 2 metros y una altura de 1 metro, con las pruebas se midió las revoluciones entregadas por la mini turbina dando como resultados valores entre 125 a 160 rpm.

Por último, tomando en cuenta todas las pruebas, se pudo notar que en la salida de los óvalos se obtiene una mayor velocidad del agua.

ABSTRACT

TOPIC: "DESIGN AND CONSTRUCTION OF A SCREW ARCHIMEDES MINI TURBINE TYPE TO BE INSTALLED IN OPEN PRIMARY CHANNELS AND GENERATE MECHANICAL ENERGY"

AUTHOR: Daniel Messiah Lucio Yugsi

TUTOR: Eng. Luis Escobar Luna Mg.

DATE: January 2019.

Using the data obtained in the channel, the mechanical and hydraulic design of the mini screw-type turbine of archimedes was carried out, for which it was of great need to use several documents of previous works on the subject, however, the most relevant document was "Design of a hydraulic turbine based on the screw of Archimedes", which is a thesis made by Julio Cesar Alberto Mejía.

Most of the screw was made with A36 steel, except for the axle, and the bearings, these materials were not manufactured, but only purchased on the market.

An optimal design was carried out for which the measurements of the channel, the weight of the structure, its assembly and transport were taken into account.

It was determined that the construction of the turbine should have a length of 3 meters, a width of 2 meters and a height of 1 meter, with the tests the revolutions delivered by the mini turbine were measured, resulting in values between 125 and 160 rpm.

Finally, taking into account all the tests, it was noted that at the exit of the ovals, a greater water velocity is obtained.

1. CAPÍTULO I. ANTECEDENTES

1.1.Tema

“Diseño y construcción de una mini-turbina tipo tornillo de Arquímedes para ser instalada en canales primarios abiertos y generar energía mecánica”.

1.2.Antecedentes

El tornillo de Arquímedes es una máquina gravimétrica con una forma helicoidal, en la antigüedad se utilizaba dicha máquina para elevar diferentes tipos de sólidos y fluidos como, por ejemplo: agua, harina, cereales o materiales de excavación. Arquímedes nació en una ciudad italiana llamada Siracusa alrededor del año de 287 AC. Él fue un científico muy sabio que contribuyó con innumerables avances científicos de la época, destacando principalmente el tornillo hidráulico, el cual, aunque no lo parezca fue uno de los avances científicos más significativo del momento, también se lo llamó como espiral sin fin.[1]

Desde su invención la máquina tuvo entre sus propósitos bombear fluidos principalmente agua. Esta máquina está constituida por un cilindro hueco el cual posee una hélice en su interior, como podemos observar en la figura 1.[1]

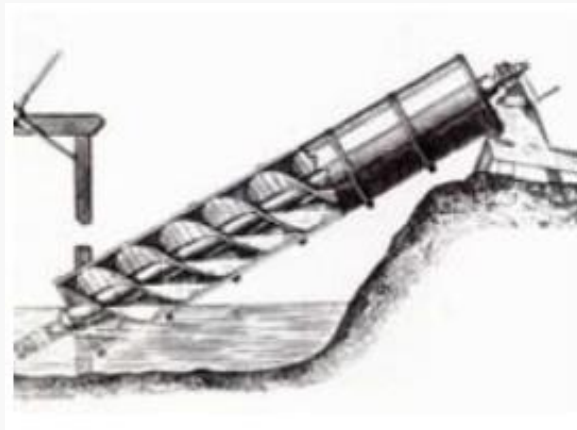


Figura 1. Tornillo de Arquímedes

Fuente: [1]

Para la generación de energía mecánica se ha tomado el mismo principio al revés, es decir, en la antigüedad se le proporcionaba movimiento al tornillo para poder

transportar agua a unas diferentes alturas, en este caso se va a aprovechar el movimiento del agua por el tornillo para generar dicha energía.[1]

1.3.Justificación

Las energías renovables son fuentes de energía limpias, inagotables y crecientemente competitivas. Se diferencian de los combustibles fósiles principalmente en su diversidad, abundancia y potencial de aprovechamiento en cualquier parte del planeta, pero sobre todo en que no producen gases de efecto invernadero –causantes del cambio climático- ni emisiones contaminantes.

Además, sus costes evolucionan a la baja de forma sostenida, mientras que la tendencia general de costes de los combustibles fósiles es la opuesta, al margen de su volatilidad coyuntural.[2]

Las energías renovables han recibido un importante respaldo de la comunidad internacional con el “Acuerdo de París” suscrito en la Cumbre Mundial del Clima celebrada en diciembre de 2015 en la capital francesa.[3]

El acuerdo, que entrará en vigor en 2020, establece por primera vez en la historia un objetivo global vinculante, por el que los casi 200 países firmantes se comprometen a reducir sus emisiones de forma que la temperatura media del planeta a final del presente siglo quede “muy por debajo” de los dos grados, -el límite por encima del cual el cambio climático tiene efectos más catastróficos- e incluso a intentar dejarlo en 1,5 grados.[3]

En el Ecuador la generación eléctrica es un 47% depende de la combustión de fósiles, el 51% en fuentes hídricas, ya sean estas represas o embalses, estos datos son obtenidos de la Agencia Internacional de Energía. [4]

En la actualidad existe un gran potencial energético desaprovechado en la provincia de Tungurahua, dicho recurso de generación es la transformación del movimiento provocado por las corrientes presentes en los canales de riego en energía eléctrica.[4]

Una de las energías amigables con el medio ambiente es la que se aprovecha del agua llamada energía hidráulica, en esta zona del país existen diversos canales los

cuales sirven para el regadío de productos agrícolas, sin embargo, se puede aprovechar el movimiento del fluido y generar movimiento mecánico por medio de la implementación de una turbina la cual se basaría en el principio del tornillo de Arquímedes. [5]

Con una técnica adecuada y tomando en cuenta una serie de características podemos aprovechar dicho movimiento sin afectar al ecosistema, además en un futuro con esa energía eléctrica se podría abastecer ya sea maquinaria o equipos utilizados en el sector agroindustrial. No obstante, para toda esta generación se debe realizar un análisis en un software, para garantizar un funcionamiento óptimo. [5]

Con la finalidad de aprovechar todo aquel flujo de agua que se pueda aprovechar en la generación de energía, y con el uso de nuevas tecnologías se han creado las micro-turbinas, dichas turbinas se pueden fabricar a base de materiales reciclados lo que las hace tener un menor peso y además se las puede colocar a la intemperie sin que exista algún problema.[6]

Las potencias alcanzadas por estas turbinas son relativamente bajas, para este trabajo de investigación se utilizará un generador de $\frac{1}{4}$ HP. [6]

1.4.Objetivos

1.4.1. Objetivo general

Diseñar y construir una mini-turbina hidráulica tipo tornillo de Arquímedes para canales primarios abiertos.

1.4.2. Objetivos específicos

- Diseñar mediante fórmulas matemáticas una mini-turbina tipo tornillo de Arquímedes.
- Construir la mini-turbina tipo tornillo de Arquímedes e instalarla en un canal primario abierto de la Provincia de Tungurahua.
- Realizar pruebas para determinar las RPM por el modelo construido.

2. CAPÍTULO II. FUNDAMENTACIÓN

2.1. Microgeneración eléctrica

2.1.1. Introducción

La microgeneración eléctrica es básicamente la producción de energía hidráulica en pequeñas escalas. Para estos sistemas existe una clasificación que por lo general se divide en tres rangos que son: a gran escala, mini y micro generación.[7]

Los sistemas a gran escala son las grandes centrales hidroeléctricas que existen a nivel mundial como, por ejemplo: La presa de las tres gargantas en china, la represa de Itaipú en Brasil y Paraguay, presa Guri en Venezuela, La presa Grand Coulee, entre otras. Las cuales son lo suficientemente grandes para abastecer de energía eléctrica a ciudades enteras. Cuando se habla de centrales de este tipo se puede decir que por lo general generan más de 10MW de potencia lo suficiente como para abastecer a 20000 focos de 50W, un ejemplo de una gran central hidroeléctrica es la que se muestra en la figura 2.[7]



Figura 2. Central hidroeléctrica

Fuente: [8]

También podemos encontrar los sistemas de mini generación los cuales son mucho más pequeños y por lo tanto también poseen una producción menor, la cual va en el orden de los 300KW a los 10MW. A estos sistemas también se los conoce con el nombre de “generación a pequeña escala”. [7]

Y por último tenemos a los sistemas de microgeneración que son aún más pequeños en comparación a los sistemas antes mencionados, dichos sistemas no abastecen de energía en las redes nacionales, por lo general estos sistemas se los

utiliza en los lugares apartados, a los que no llega la red nacional o para el abastecimiento de pequeñas industrias y comunidades rurales. Su rango de producción va entre 200W hasta 300KW. [7]

En algunos países existe una necesidad que constantemente crece de energía eléctrica, lo cual se da principalmente en las áreas rurales tanto para el abastecimiento de pequeñas comunidades, así como también de pequeñas industrias y talleres, ya que existe un elevado costo de extensión de la red eléctrica. Con mucha frecuencia la micro-hidrogeneración se ha convertido en una alternativa viable económicamente. Además, estos sistemas de microgeneración pueden ser diseñados y montados por personas de la localidad o por organizaciones más pequeñas, dando cumplimiento a requisitos menos estrictos y usando componentes de fabricación en serie y dándole uso a maquinaria presente en la localidad, en la figura 3 se puede visualizar un esquema simplificado de una central hidroeléctrica. [7]



Figura 3. Planta hidroeléctrica

Fuente: [9]

2.1.2. Conceptos de microgeneración

Los componentes principales de un sistema tipo micro-hidrogeneración son un caudal óptimo, un desarenador el cual funciona como un filtro de arena, luego el

agua ingresa a un depósito llamado cámara de carga, luego pasa por una tubería de forzada, la cual se conecta con la turbina. [7]

Un sistema de microgeneración de energía hidroeléctrica, es un elemento que transforma la energía potencial del fluido en energía mecánica por lo general es una turbina hidráulica que de manera sintetizada se puede definir como compuesto de un rodete el cual posee una serie de álabes o paletas que gira mediante el impulso que le proporciona el fluido y el estator.[7]

La microgeneración se la realiza generalmente en derivaciones las cuales son desviaciones del caudal presente en un río o en un canal hasta dirigirlo a la turbina. La gran parte de microgeneración se la realiza con derivaciones, los sistemas presentan ventajas como la de su fácil construcción, su bajo costo, también su simplicidad proporciona una mejor confiabilidad a largo plazo, en la figura 4 se muestra un modelo de la turbina tipo tornillo de Arquímedes. [10]

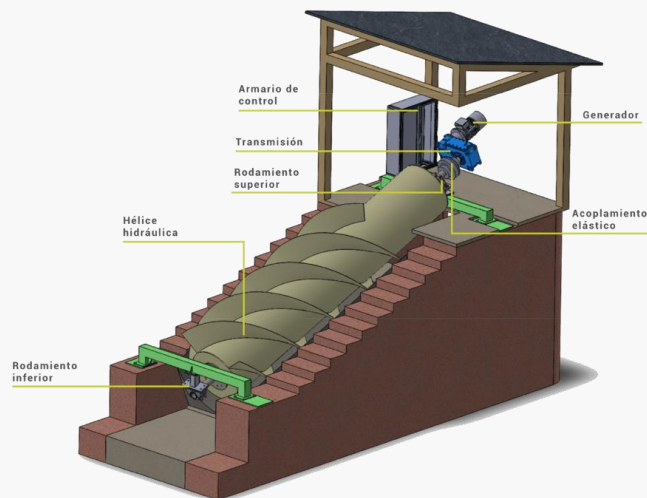


Figura 4. Modelo de turbina tipo tornillo de Arquímedes.

Fuente: [10]

2.1.3. Energía hidroeléctrica

La generación de energía hidroeléctrica es la generación de electricidad mediante el aprovechamiento de la energía que proporciona el agua en movimiento. El movimiento del agua es una de las primeras fuentes de energía la cual fue aprovechada para reducir el trabajo manual de personas o animales. Estos sistemas

aparecieron más o menos hace 5000 años y probablemente la primera máquina hidráulica fue la noria, esta era una máquina diseñada para bombear agua y elevarla.[11]

A finales del siglo XIX, la energía hidroeléctrica fue tomando fuerza y ganado campo en la industria de generación de energía eléctrica ya que es una fuente de generación amigable con el medio ambiente. La primera central hidroeléctrica fue construida en las cataratas del Niagra en 1879. En el año de 1882, la primera central hidroeléctrica del mundo comenzó a funcionar en Estados Unidos en Appleton, Wisconsin, en la figura 5 se puede observar una vista aérea de una hidroeléctrica. [11]

Básicamente una central hidroeléctrica consta de tres partes marcadas que son:

- Una presa que pueda abrirse y cerrarse de acuerdo a la necesidad.
- Un depósito en el cual se pueda almacenar el agua.
- Una turbina que hace girar un generador el cual produce electricidad.



Figura 5. Vista aérea de una hidroeléctrica

Fuente: [12]

2.2.Máquinas hidráulicas

2.2.1.1.Definición

Una máquina hidráulica se puede definir como un sistema mecánico el cual se encarga de intercambiar energía mecánica con el fluido de trabajo que utilice la misma. Se considera máquinas hidráulicas a las que los efectos de la compresibilidad del fluido son despreciables. La utilización de máquinas que

emplean fluidos o máquinas hidráulicas han sido utilizadas desde hace mucho tiempo. La bomba es una de las máquinas creadas en la antigüedad, también podemos poner como ejemplos la noria y el tornillo de Arquímedes los cuales fueron empleados durante siglos antes de cristo. La auténtica precursora de las actuales turbo máquinas es la rueda hidráulica de paletas, la cual fue desarrollada en Egipto, Mesopotamia y China. También dichas máquinas de fluidos constituyen uno de los motores fundamentales de la revolución industrial, para la creación de las diversas máquinas tuvieron una gran importancia la contribución de los ingenieros tales como: Burdín, Fourneyron, Sablukow, Pelton, Francis o Kaplan. Algunos de los ingenieros antes mencionados han dado su nombre a turbinas hidráulicas.[13]

El fluido de trabajo que circula a través de la máquina puede tener un comportamiento laminar lo cual significa que las partículas siguen trayectorias ordenadas y pueden determinarse en algunos casos soluciones analíticas, o también puede tener un comportamiento turbulento lo que significa que el fluido no sigue trayectorias ordenadas y tiene fuertes incrementos de los fenómenos de transporte y difusión.[13]

En los últimos años se ha avanzado de forma significativa en el estudio de dichas máquinas. Se ha considerado ciertos efectos tridimensionales suponiendo flujos ideales o la evaluación de los efectos ocasionados por pérdidas de fricción y turbulencia, han puesto aportaciones importantes. No obstante, la extraordinaria complejidad del flujo en estas máquinas convierte estos temas en materia de investigación en los campos analíticos, numéricos y experimentales.[13]

Las máquinas hidráulicas pueden clasificar en dos grupos:

- Motor H.- El cual absorbe la energía hidráulica de un fluido (de presión y/o cinética) y proporciona energía mecánica en el eje, más conocidas como turbinas.
- Generador H.- La cual absorbe la energía mecánica en el eje y proporciona energía hidráulica a un fluido, a estas se las denomina bombas centrífugas.

Las turbinas también conocidas como turbomáquinas están constituidas básicamente con un elemento giratorio llamado (rodete), que posee una serie de álabes los cuales están colocados a ángulos de incidencia del fluido determinados. [13]

2.2.2. Componentes

Las turbinas también conocidas como turbomáquinas es una máquina roto dinámica de fluido incompresible. Este tipo de mecanismos constan de una sola etapa o células o varias dispuestas en serie; cada etapa está compuesta por un elemento fijo el cual toma el nombre de estator y un elemento móvil el mismo al que se lo denomina rotor o rodete. Se podría decir que el rodete es el elemento principal de una turbomáquinas hidráulicas, ya que en este elemento se produce el intercambio de energía entre el fluido y la máquina. Tomando en cuenta el modo en el que entra el fluido al rodete, se puede clasificar a las turbomáquinas en radiales, axiales, o mixtas.[14]

En el estator pueden apreciarse varios elementos entre los cuales tenemos:

- El distribuidor, es el elemento encargado de conducir al fluido hacia la sección de entrada del rodete en dirección y magnitudes apropiadas. Estos pueden estar presentes de forma que sean álabes fijos, pero que puedan tener regulación según lo necesite, también, puede ser un simple conducto de admisión o aspiración del fluido.[14]
- El difusor, el cual es el encargado de captar el fluido que sale del rodete y lo guía de forma eficiente para que reduzca su energía cinética y recupere presión estática. Por lo general en las turbinas se las denomina tubo de aspiración.[14]
- La voluta, consistente en un canal de sección creciente (bombas) o decreciente (turbinas) que rodea al rodete, recogiendo el fluido que sale del mismo en el caso de las bombas o distribuyéndolo en la periferia de las turbinas. En turbinas es frecuente llamarle *caja espiral*. Por su forma característica, a veces se le denomina simplemente caracol.[14]

No necesariamente todas las turbomáquinas deben tener estos elementos fijos. Esto quiere decir que por ejemplo en muchas de ellas no existe distribuidor o voluta, e

incluso en algunas turbomáquinas como son las aeroturbinas o en las de hélices, ni hay distribuidor, ni voluta, ni difusor, consistiendo la máquina únicamente en el rotor. [14]

2.2.3. Clasificación de las turbinas hidráulicas

Para la clasificación de turbinas se puede tomar diferentes puntos de vista como pueden ser:

- Según la variación de presión estática a través del rodete.
- Según la dirección del flujo a través del rodete.
- Según la variación de presión estática a través del rodete.

Mediante los criterios antes mencionados podemos clasificarlos de una mejor manera a las turbinas y tenemos lo siguiente:

- Según la variación de presión estática a través del rodete:
 - Turbinas de acción o impulso, cuando la presión estática pertenece constante entre la entrada y la salida del rodete.
 - Turbinas de reacción, cuando la presión estática disminuye entre la entrada y la salida del rodete.
- Según la dirección del flujo a través del rodete:
 - Turbinas de flujo tangencial.
 - Turbinas de flujo radial.
 - Turbinas de flujo semi-axial.
 - Turbinas de flujo axial.
- Según la variación de presión estática a través del rodete:
 - Turbinas de admisión parcial.
 - Turbinas de admisión total.

La turbina de tipo tornillo de Arquímedes se las puede catalogar como una turbina de reacción.[15]

2.3.Turbina tipo tornillo de Arquímedes

La turbina tipo tornillo de Arquímedes es un dispositivo que consiste principalmente en una superficie que contiene hélices helicoidales dentro de un cilindro, generalmente dicha turbina debe permanecer en posición inclinada. [16]

2.3.1. Análisis de la turbina tipo tornillo de Arquímedes

Para realizar el análisis de una turbina tipo tornillo de Arquímedes se debe tomar en cuenta los siguientes factores principales: diámetro del eje, caudal disponible, altura del salto, ángulo de inclinación del tornillo, longitud del tornillo, radio del diente, ángulo de inclinación del diente, para una mejor interpretación de lo antes mencionado observamos la figura 6 y 7.

Con la ayuda de los parámetros antes mencionados se puede calcular la geometría del tornillo dando como resultado: torque, velocidad angular, paso del tornillo y la potencia generada.[16]

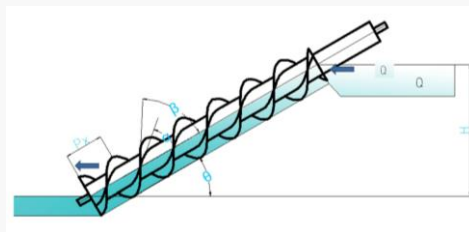


Figura 6. Modelo de turbina tipo tornillo de Arquímedes

Fuente: [16]

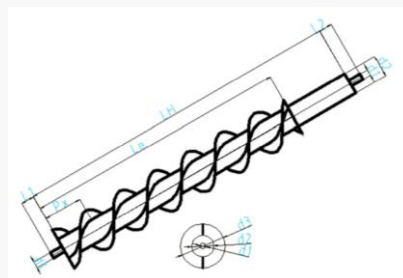


Figura 7. Vista lateral del modelo

Fuente: [16]

Donde:

$L1$ = Longitud del eje sólido inferior. [m]

LH = Longitud del eje hueco. [m]

Le = Longitud de la hélice. [m]

Px = Paso del tornillo. [m]

$d1$ = Diámetro del eje hueco. [m]

$d2$ = Diámetro del eje sólido. [m]

$d3$ = Diámetro del exterior del tornillo. [m]

α = Ángulo de inclinación exterior de la hélice. [°]

θ = Ángulo de inclinación del tornillo. [°]

Q = Caudal $\left[\frac{m^3}{s}\right]$

H = Altura del salto. [m]

R = Radio exterior del tornillo. [m]

N = Número de hilos.

Pot = Potencia [W]

En la figura 8 se puede observar un tornillo de 2 hilos. Sea Le la parte del eje donde se coloca el espiral del tornillo, θ es el ángulo de inclinación del tornillo, H es la caída total desde la superficie del agua en el canal de llegada hasta la superficie libre del agua en el canal de desfogue.[16]

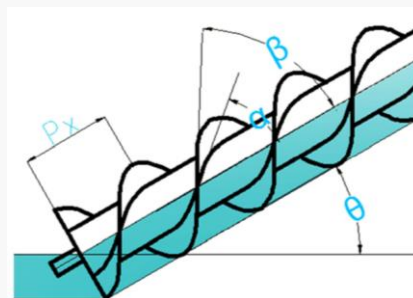


Figura 8. Ángulos y paso del tornillo

Fuente: [16]

En la figura 9 se muestra una ampliación de una parte del tornillo. Para el cálculo del ángulo de inclinación del tornillo y el paso se usó del desarrollo de la hélice. [16]

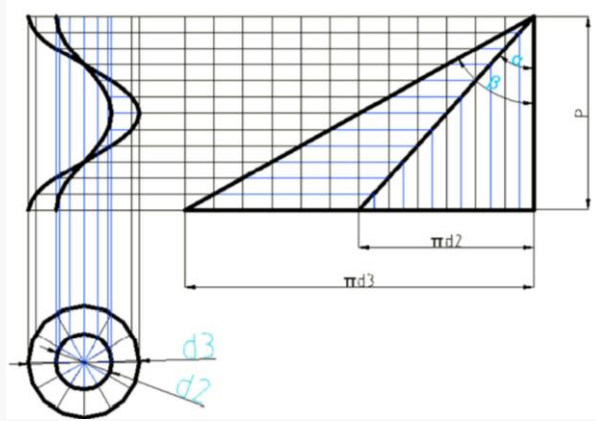


Figura 9. Desarrollo de la hélice

Fuente: [16]

Como el avance del tornillo es $P = P_x * N$

$$\tan(\beta) = \frac{\pi d_3}{N * P_x} \quad \Rightarrow \quad \frac{\pi d_3}{\tan(\beta)} = N * P_x$$

Ec. 2.1

$$\tan(\alpha) = \frac{\pi d_2}{N * P_x} \quad \Rightarrow \quad \frac{\pi d_2}{\tan(\alpha)} = N * P_x$$

Ec. 2.2

Igualando las ecuaciones 2.16 y 2.17 tenemos:

$$P = N * P_x = \frac{\pi d_2}{\tan(\theta)} = \frac{\pi d_3}{\tan(\alpha)}$$

Ec. 2.3

Calculando la longitud de la hélice del tornillo (L_e):

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

Ec. 2.4

La potencia teórica (Pot) de una turbina hidráulica es:

$$Pot = \rho * g * H * Q$$

Ec. 2.5

Para fines de análisis del tornillo es cubierto por el agua hasta la mitad de su diámetro exterior. Se asume que en Y_c es un máximo, donde se da el máximo torque. Utilizando parámetros de diseño óptimo de las bombas de tornillo obtenemos el área de contacto del agua, áreas y también inercias en los álabes del tornillo como se muestra en la figura 10:

$$\frac{d}{D} = 0.5$$

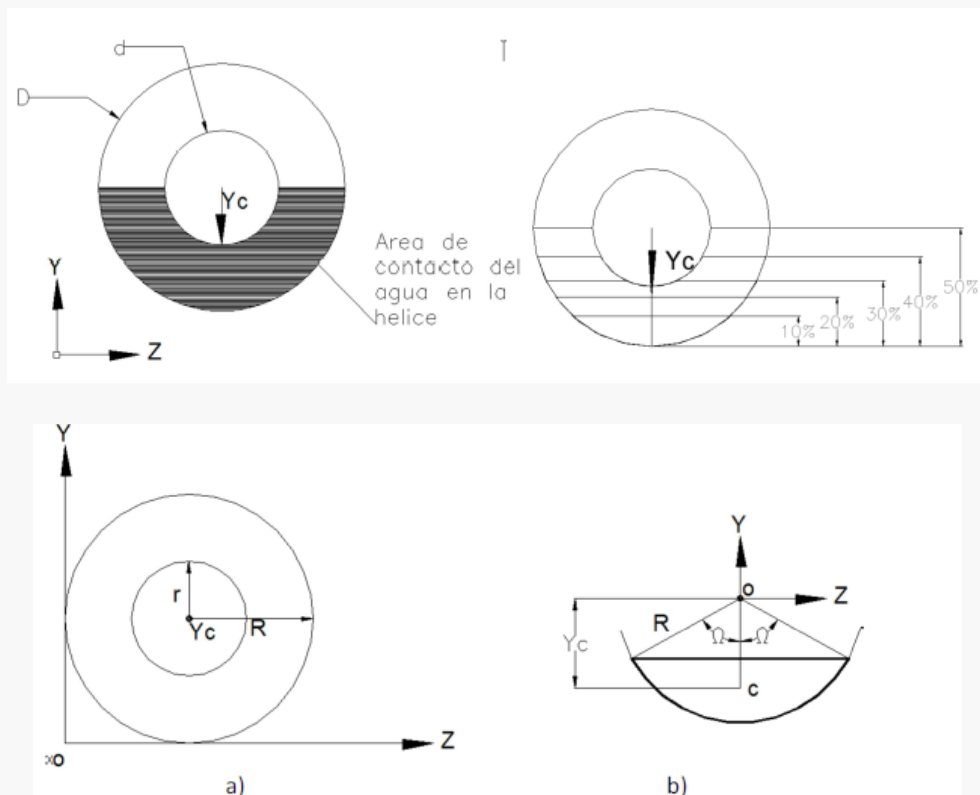


	Figura a	Figura b
$A =$	$\pi(R^2 - r^2)$	$R^2[\Omega - \text{sen}(\Omega) * \text{cos}(\Omega)]$
$y_c =$	R	$\frac{2R}{3} \left[\frac{\text{sen}^3(\Omega)}{\Omega - \text{sen}(\Omega) * \text{cos}(\Omega)} \right]$
$x_c =$	R	0

Figura 10. Inercia de los álabes del tornillo

Fuente: [16]

Por regla de tres y utilizando las propiedades de superficies planas, se deduce el centroide de cada área de contacto los resultados se muestran en la figura 11:

Asumimos que el área frontal del tornillo es:

$$r = \frac{R}{2}$$

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

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

Ec. 2.6

Calculando la ubicación del centroide:

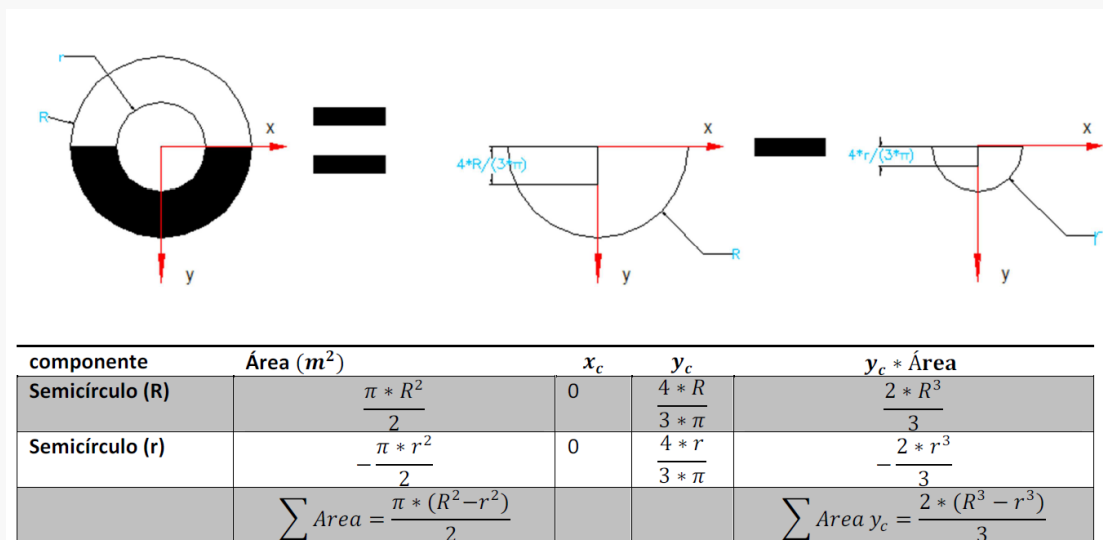


Figura 11. Ubicación de centroides.

Fuente [16]

$$\sum Area Y_c = \frac{2 * (R^3 - r^3)}{3} = 0.58833R^3$$

$$\sum Y_c Area = \sum Y_c \left(\frac{\pi * (R^2 - r^2)}{2} \right) = 1.1781R^2$$

Despejando:

$$\sum Y_c = \frac{0.5833R^3}{1.1781 R^2} = 0.4951R^2$$

Ec. 2.7

Posteriormente se elaboró un resumen de formulas como podemos observar en la figura 12.

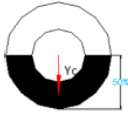
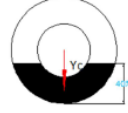
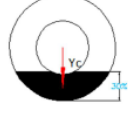
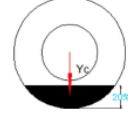
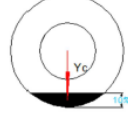
Área de contacto	área	porcentaje	y_c
	$A = \frac{3}{8}\pi R^2$	50%	$y_c = 0.4951 R$
	$A = \frac{3}{10}\pi R^2$	40%	$y_c = 0.6037 R$
	$A = \frac{9}{40}\pi R^2$	30%	$y_c = 0.6907 R$
	$A = \frac{3}{20}\pi R^2$	20%	$y_c = 0.7544 R$
	$A = \frac{3}{40}\pi R^2$	10%	$y_c = 0.8471 R$

Figura 12. Resumen de fórmulas

Fuente: [16]

Para deducir teóricamente la fórmula de potencia se utiliza de referencia la figura número 13:

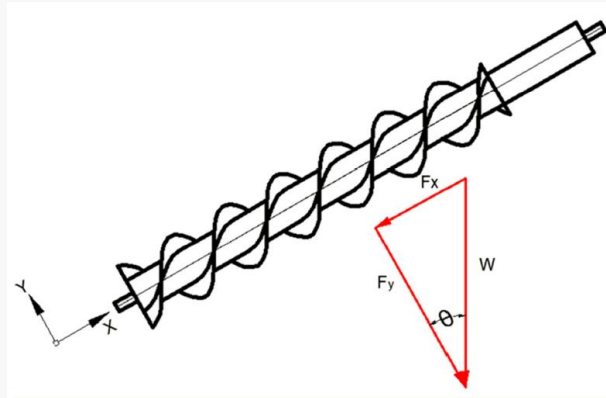


Figura 13. Triangulo de fuerzas

Fuente: [16]

- F_x = Fuerza de empuje que ejerce el agua en dirección del plano “X” u horizontal. [N]
- F_z = Fuerza que ejerce el agua en dirección del plano “Z” o tangencial. [N]
- F_y = Fuerza que ejerce el agua sobre la carcasa o fuerza en dirección al eje “Y”. [N]
- W = Fuerza del agua en dirección vertical. [N]
- A = Área de contacto del agua. [m^2]
- ω = Velocidad angular. [$\frac{rad}{s}$]

Cálculo de la fuerza del agua en dirección del tornillo

$$W = \gamma * volumen$$

$$W = \gamma * A * P_x$$

Ec. 2.8

Relaciones trigonométricas obtenidas del plano xy:

$$A. \tan(\theta) = \frac{F_x}{F_N}$$

Ec. 2.9

$$B. \cos(\theta) = \frac{F_N}{W}$$

Ec. 2.10

$$C. \operatorname{sen}(\theta) = \frac{Fx}{W}$$

Ec. 2.11

Despejando la relación trigonométrica $\operatorname{sen}(\theta)$:

$$W = \frac{Fx}{\operatorname{sen}(\theta)} = \rho * g * Px * A$$

Ec. 2.12

Despejando la fuerza de empuje:

$$Fx = \rho * g * Px * A * \operatorname{sen}(\theta)$$

Ec. 2.13

Relación trigonométrica del plano xz:

$$\tan(\alpha) = \frac{F_z}{F_x}$$

Ec. 2.14

Cálculo de la fuerza del agua en dirección tangencial al tornillo utilizando la relación trigonométrica obtenida en el plano xz:

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

$$F_z = \rho * g * Px * A * \operatorname{sen}(\theta) * \tan(\alpha)$$

Ec. 2.15

Para el cálculo del torque para una sección se asume que la fuerza se aplica en la superficie de contacto del agua.

$$T = F_z * Y_c = \rho * g * Px * A * \operatorname{sen}(\theta) * \tan(\alpha) * Y_c$$

Ec. 2.16

Cálculo del torque para todo el tornillo:

$$T = Fz * Yc = \rho * g * Px * A * \text{sen}(\theta) * \tan(\alpha) * Yc * \frac{Le}{Px}$$

Ec. 2.17

En la hélice el agua golpea con una velocidad (V_{ent}), aproximadamente igual a Q/A , por lo cual el tornillo se mueve con una velocidad de rotación (u), esto es debido al ángulo de inclinación de la hélice (α) y con una velocidad de salida (V_{sal}). Teóricamente la velocidad de entrada como la velocidad de salida son iguales ya que se trata de una turbina gravitatoria, esto se puede observar de mejor manera en la figura 14. Así obtenemos que la velocidad de rotación es igual a: [16]

$$u = \omega * Yc$$

Ec. 2.18

Calculando la velocidad angular:

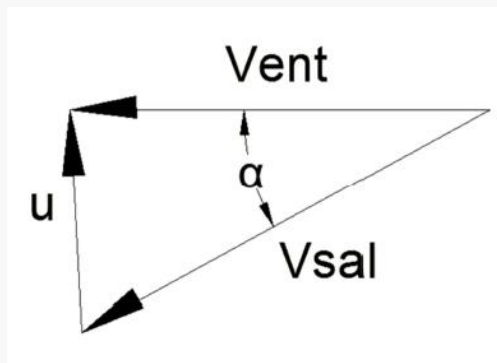


Figura 14. Triangulo de velocidades

Fuente: [16]

$$\tan(\alpha) = \frac{u}{V_{ent}}$$

$$u = V_{ent} * \tan(\alpha) = \omega * Yc$$

$$V_{ent} = \frac{Q}{A}$$

Remplazando:

$$u = \frac{Q * \tan(\alpha)}{A}$$

Ec. 2.19

Despejando la velocidad angular:

$$\omega = \frac{Q * \tan(\alpha)}{A * Yc}$$

Ec. 2.20

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

$$Pot = T * \omega$$

Ec. 2.21

Sustituyendo ω y T en la fórmula de la potencia:

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

Ec. 2.22

Reduciendo la ecuación de potencia que relaciona el ángulo de la hélice con inclinación del tornillo:

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

Ec. 2.23

$$Pot = (\rho * g * Q * H * (\tan(\alpha))^2)$$

Ec. 2.24

Para calcular la potencia máxima se utilizan los siguientes valores $\alpha = 45^\circ$ y $\theta = 90^\circ$, la utilización de estos valores se debe a que son los valores máximos de las identidades trigonométricas:

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

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

Sustituyendo se obtiene la potencia teórica máxima:

$$Pot_{max} = \rho * g * H * Q$$

Ec. 2.25

Eficiencia de la turbina:

$$\eta = \frac{Pot}{Pot_{max}} * 100\%$$

Ec. 2.26

Teniendo en cuenta ciertos parámetros externos como, por ejemplo: la inclinación del tornillo 30° y una eficiencia de 80% se obtiene un ángulo de inclinación del tornillo.

$$\eta = \frac{Pot}{Pot_{max}} * 100\% = 80\%$$

$$\eta = \frac{(\rho * g * Q * H * (\tan(\alpha))^2)}{\rho * g * Q * H}$$

$$\eta = (\tan(\alpha))^2 * 100\% = 80\%$$

Ec. 2.27

Sustituyendo y despejando la ecuación se obtiene un ángulo de inclinación de la hélice en el punto donde el troque es máximo:

$$\alpha = 41.81^\circ \approx 42^\circ$$

Calculando la velocidad lineal y el número de revoluciones:

$$v = \omega * r$$

Ec. 2.28

$$rpm = \frac{v * 60}{\pi * d}$$

Ec. 2.29

2.3.2. Características de los canales de regadíos

Los canales de riego son conductos por el cual el agua circula desde la presa hasta los cultivos, para hidratarlos.[17]

Los canales de regadío se pueden clasificar en tres distintos grupos que son:

- Canales principales.
- Canales laterales, sublaterales, ramales, subramales y acequias que llevan el agua a los surcos o melgas.
- Cauces naturales o arroyos, los cuales en ciertas ocasiones se los utiliza como parte del sistema de distribución del agua.

2.3.2.1. Canales principales

Los canales principales son los que dominan toda el área de regadío, también son los que abastecen a los canales laterales. Este tipo de canal debe suministrar el agua por gravedad a una gran parte de puntos específicos para zonas de riego. Por la razón antes mencionada este tipo de canales deben tener una localización geográficamente alta.[17]

2.3.2.2. Canales laterales

Los canales laterales son los encargados de llevar el agua a las áreas de regadío y finalmente a las parcelas.[17]

2.3.2.3. Cauces naturales

Son los cursos naturales que toma el agua como consecuencias de lluvias o escurrimientos.[17]

2.3.3. Ventajas y desventajas de la turbina de Arquímedes

La turbina basada en el tornillo de Arquímedes presenta una serie de ventajas las cuales ayudan a que esta tecnología pueda ir en aumento en el presente, ya que dicha turbina presenta una energía sostenible, lo que significa que utiliza energía

disponible libremente y no produce emisiones tóxicas al medio ambiente, se puede decir que esta turbina es amigable con el medio ambiente y con el ecosistema que se desenvuelve en este ambiente.[18]

Otra ventaja importante que posee dicha turbina es que para la instalación se necesita un bajo o nulo costo de obra civil, ya que este prototipo es portátil se lo puede colocar en cualquier otro canal que cumpla con las medidas. También una vez colocada la turbina, esta no produce ninguna clase de ruido.[18]

El funcionamiento de esta turbina se lo realiza con bajos caudales lo cual presenta una importante ventaja, a más de que su mantenimiento y control es relativamente fácil. Los rangos de operación para turbinas se presentan en la siguiente figura 15:

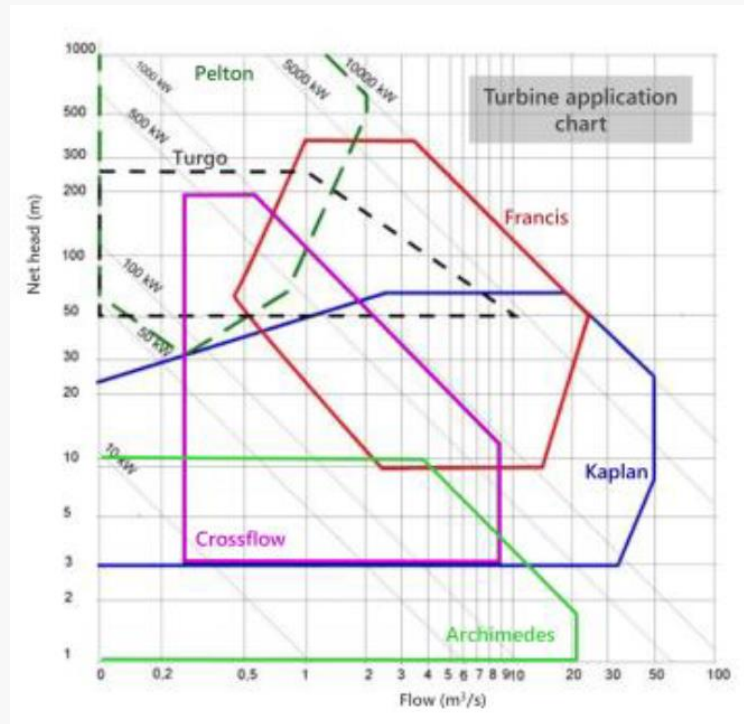


Figura 15. Comparación en diagrama flujo vs cabeza de velocidad.

Fuente: [18]

2.3.4. Caudales óptimos para la turbina de Arquímedes

Los tornillos hidrodinámicos se ubican como alternativas adecuadas para bajas capacidades de generación instaladas, con caudales sugeridos alrededor de $1 \frac{m^3}{s}$ y caídas entre 1 m y 10 m.

Los tornillos de generación hidrodinámicos son viables técnicamente con caídas mínimas de agua en comparación con las requeridas por turbinas convencionales. Esto es porque requieren excavaciones y presas de menores dimensiones comparado con lo que requerirían turbinas usuales para poder operar. Son máquinas que tienen una alta eficiencia de generación en un rango mayor de operación, donde llegan a valores mayores al 90 % con afectación mínima por variaciones en el caudal y su eficiencia es creciente en todo el intervalo, para su mejor comprensión se ha colocado la figura 16, la cual es un diagrama de rendimiento vs caudal.

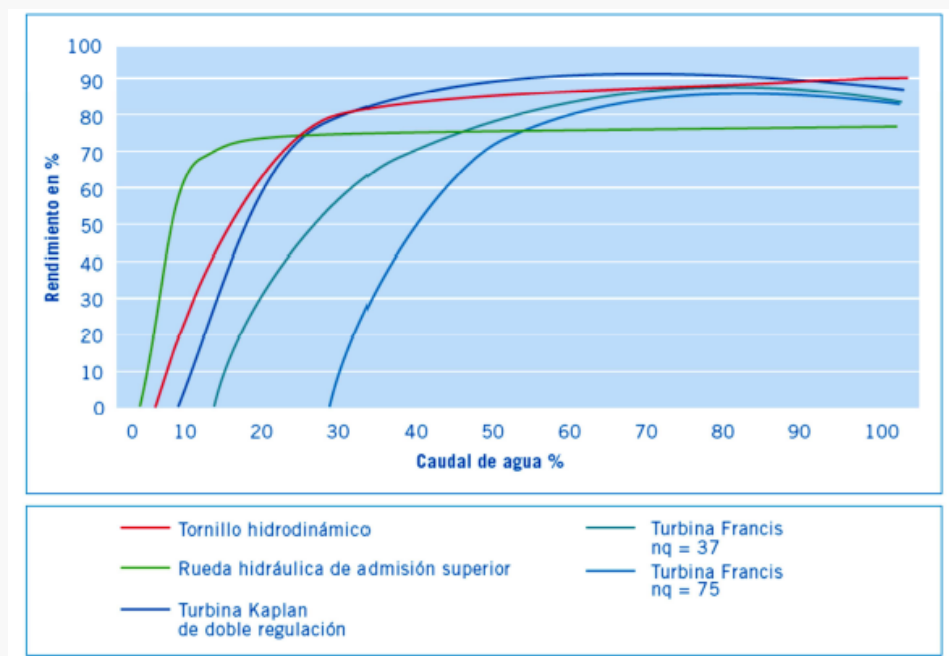


Figura 16. Eficiencia de turbinas por medio del diagrama caudal vs rendimiento

Fuente: [16]

2.4. Ecuaciones fundamentales de la hidráulica

En la hidráulica se consideran principalmente dos tipos de variables, las más importantes que son: fuerza y presión. [19]

La fuerza se la podría definir como toda acción capaz de cambiar de posición un objeto. Mientras que la presión es el resultado de dividir esa fuerza por la superficie que dicho objeto tiene en contacto con una superficie. [19]

La energía hidráulica es la capacidad que tiene una masa de agua para realizar un trabajo que consiste en el desplazamiento del fluido a lo largo de un conducto. Existen tres tipos de energía hidráulica que son:

- El principio de Bernoulli, el cual describe el comportamiento de un fluido moviéndose a lo largo de una línea de corriente.
- La energía cinética la cual es la que posee el agua en virtud del movimiento. Esta es la representación de la altura que puede subir el líquido si es lanzado verticalmente.
- La energía de presión se debe a la fuerza actuante sobre una superficie transversal de un conducto.

2.4.1. Ecuación de continuidad

La ecuación de continuidad es la expresión del principio de conservación de la masa líquida, es el flujo de masa que pasa a través de una superficie cerrada la cual debe ser igual a la disminución, por unidad de tiempo, la masa de fluido contenido en su interior.

La ecuación de continuidad es la que nos expresa que el caudal del agua es igual a la velocidad que posee el agua multiplicado por el área transversal que atraviesa.[19]

$$A_1 * v_1 = A_2 * v_2$$

Ec. 2.30

Lo que significa que el caudal entrante es el igual al caudal de salida, en donde las unidades con las que se representa el caudal son: $\frac{m^3}{s}$.

Dicha ecuación se cumple únicamente cuando es dos secciones de la conducción no se acumula masa, es decir, siempre y cuando el fluido sea incomprensible y por lo tanto tiene una densidad constante, la condición antes mencionada la satisfacen muy bien todos los líquidos, particularmente el agua.[19]

2.4.2. Ecuación de la energía

En la ecuación de Bernoulli se puede notar claramente el principio de conservación de energía aplicado a fluidos. Se conoce como el efecto Bernoulli al descenso de la presión del líquido en las regiones donde la velocidad del flujo es mayor, El flujo de alta velocidad a través de un estrechamiento, se debe incrementar la energía cinética, a expensas de la energía de presión.[19]

El principio de Bernoulli nos expresa que, dentro de un flujo horizontal de fluido, los puntos de mayor velocidad del fluido tendrán menor presión que los de menor velocidad.

En la aplicación de la ecuación se debe tomar dos puntos en específico los cuales se consideran una salida y una entrada, para esta ecuación se considera la energía de presión, la energía cinética por unidad de volumen y la energía potencial por unidad de volumen. A lo largo de una línea de corriente la suma de la altura geométrica, la altura de velocidad y la altura de presión se mantiene constante, como se muestra a continuación: [19]

Σ energía en el punto inicial = Σ energía en el punto final

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 + \rho gh_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 + \rho gh_2$$

Ec. 2.31

2.4.3. Ecuación de pérdidas

Cuando un fluido circula dentro de un conducto siempre existe una fuerza que se opone al movimiento, las cuales son función de la rugosidad del conducto, lo cual depende del material con el que está construido el conducto, otro factor es la viscosidad del fluido, también es importante el régimen de funcionamiento lo cual puede ser laminar o turbulento y del caudal circulante.[19]

En la dinámica de fluidos, la ecuación que representa la pérdida de energía es la ecuación de Darcy-Weisbach la cual es una ecuación empírica que relaciona las pérdidas de presión debido a la fricción que se produce a lo largo de una tubería. Esta ecuación toma estos nombres en honor al francés Henry Darcy y al alemán

Julius Weisbach los cuales fueron los ingenieros con mayor aportación en el desarrollo de tal ecuación.[19]

La ecuación de pérdidas es ampliamente utilizada en la hidráulica, ya que con el uso de esta igualdad se puede calcular la pérdida de presión debido a la fricción actuante dentro de una tubería llena. Una de las ventajas principales de esta ecuación es que puede ser aplicada a todo tipo de fluido hidráulico ya sea este laminar, transicional y turbulento, debido al coeficiente de fricción tomar los valores adecuados, según corresponda, como se muestra a continuación:

$$h_f = f * \frac{L}{D} * \frac{v^2}{2g}$$

Ec. 2.32

Donde:

h_f = pérdida de carga debido a la fricción. (m)

f = factor de fricción de Darcy. (adimensional)

L = longitud de la tubería. (m)

D = diámetro de la tubería. (m)

v = velocidad media del fluido. $\left(\frac{m}{s}\right)$

g = aceleración de la gravedad. $\left(\frac{m}{s^2}\right)$

3. CAPÍTULO III. DISEÑO DEL PROYECTO

3.1. Selección de alternativas

Para el diseño de la turbina se consideraron varios aspectos como son: el tipo de canal, el tipo de fluido, y sobre todo los tipos de mini turbinas más utilizados a nivel mundial para la generación de energía eléctrica.

3.1.1. Alternativa 1.

Con la ayuda de la figura 17, podemos observar la alternativa 1, la cual consistía en una estructura de soporte para el tornillo, con la cual se podría variar el ángulo de inclinación del tornillo por medio de amortiguadores, además, para la colocación de esta estructura se debe cambiar la dirección del modificando el canal.



Figura 17. Primer tipo de turbina

Fuente: [20]

Ventajas:

- i. Variar el ángulo de inclinación según la necesidad.
- ii. Se puede cubrir completamente el tornillo.
- iii. Transporte sencillo a diferentes lugares.

Desventajas:

- i. Elevado costo de fabricación.
- ii. Modificación del canal para su instalación.
- iii. Compleja forma de fabricación.

3.1.2. Alternativa 2.

Como podemos observar en la figura 18, la segunda alternativa tiene que ver con los anclajes al canal ya que se fabricaría vertederos para guiar el flujo del agua hacia el tornillo.

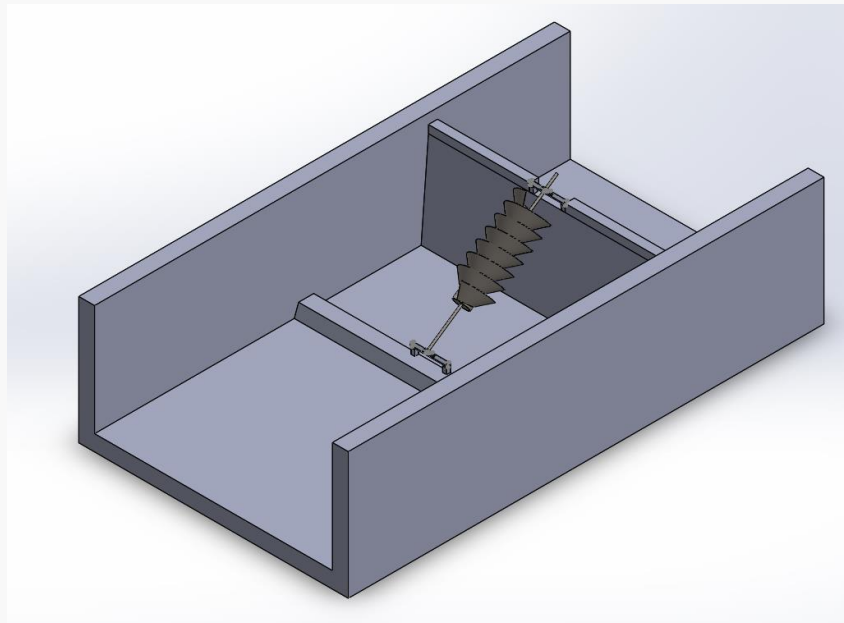


Figura 18. Segundo tipo de turbina

Fuente: [Autor]

Ventajas:

- iv. El caudal se conduce directamente a la turbina.
- v. Se puede colocar un recubrimiento a la turbina para aprovechar aún más el caudal.
- vi. Una vez instalada no se moverá por la fuerza del agua.

Desventajas:

- iv. Desbordamiento del agua, ya que se cierra el flujo normal del canal.
- v. Elevado peso de la estructura.
- vi. Obstrucción creada en el tornillo, ocasionado por los desechos que arrojan al canal.

3.1.3. Alternativa 3.

Para la última alternativa tenemos el diseño de la figura 19, que consta de perfiles estructurales en la estructura de soporte, no existe ningún tipo de anclaje lo cual la hace fácil de transportar a distintos puntos del canal.

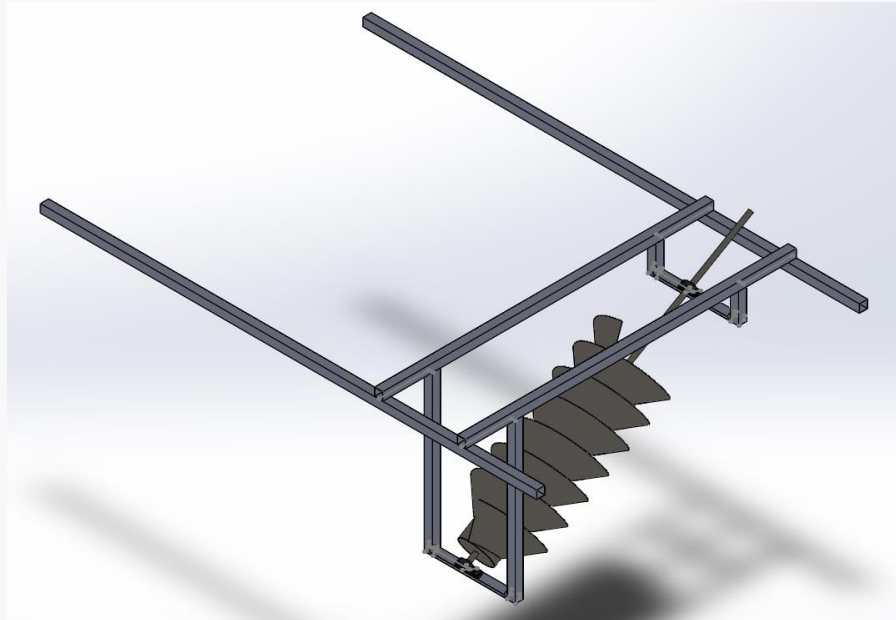


Figura 19. Tercer tipo de turbina

Fuente: [Autor]

Ventajas:

- vii. Sencillo transporte a diferentes lugares.
- viii. Los materiales se pueden conseguir fácilmente en la ciudad.
- ix. Fabricación relativamente simple, contando con las herramientas adecuadas.
- x. Instalación factible y veloz.

Desventajas:

- vii. Corrosión de los materiales, ya que el tornillo tiene contacto con el agua.
- viii. Reducción de vida útil del rodamiento inferior, por contacto con el agua.
- ix. Gran tamaño de los soportes principales.

En este proyecto se tomó la mini turbina tipo tornillo de Arquímedes la cual es un modelo relativamente nuevo ya que existen muy pocas empresas a nivel mundial que se dediquen a la fabricación de este tipo de turbinas, esto puede ser debido a la geometría que presenta ya que para su correcto funcionamiento necesita un cierto ángulo de inclinación tanto del tornillo como de los álabes.

3.1.4. Evaluación de soluciones.**Método de Brown y Gibson para criterios ponderados.**

La selección de alternativas se realizó por medio de la utilización del método de Brown y Gibson, dicho método tiene la característica de combinar factores objetivos, utilizando técnicas de cuantificación de los factores más importantes, para así seleccionar la alternativa, son: factores tangibles e intangibles.

A continuación, se cuantifica todo con la ayuda de una tabla, en la cual se ha colocado los criterios, ponderaciones de todas las alterativas. Para la selección de este caso se utilizan criterios tangibles como intangibles. Es necesario que cada criterio de evaluación obtenga un porcentaje de relevancia y cada alternativa se la calificó en una escala que va de 1 a 10, donde los rangos tendrán la siguiente escala:

1-3 (Malo), 4-7(Regular), 8-10 (Aceptable), el cual se multiplica por el porcentaje del criterio de evaluación.

Criterios de evaluación.

- a) Peso.
- b) Dimensiones generales.
- c) Construcción.
- d) Manejabilidad.
- e) Costo.

Descripción de criterios.

- a) **Peso:** Se supondrá un valor óptimo de 70.75 Kg.
- b) **Dimensiones generales:** Las dimensiones son: 3000x2000x1075.22.
- c) **Construcción:** Se intenta disminuir el número de días.
- d) **Montaje:** La instalación y el mantenimiento se los deberá realizar de una manera rápida y con la menor cantidad posible de personal.
- e) **Costo:** Se toma en cuenta el menor costo.

Teniendo en cuenta las 3 opciones se realizó la tabla 1, la cual nos ayudó a evaluar dichas opciones.

Tabla 1. Evaluación de alternativas.

Criterio	Ponderación	Alternativas		
		I	II	III
Peso.	30%	2	1	8
Dimensiones.	20%	3	3	8
Construcción.	10%	5	2	9
Montaje.	10%	1	1	10
Costo.	30%	2	3	9
Puntuación Total				

Fuente: [Autor]

Se ha determinado según el análisis previo que la opción 3 es la mejor, dicha opción se ha tomado en cuenta por su característica principal que es el anclaje estructural.

3.2. Cálculos y modelo operativo

3.2.1. Parámetros para el diseño

3.2.1.1. Medición de la geometría del canal.

Para realizar los cálculos correspondientes se necesitaron parámetros iniciales, los cuales se obtuvieron mediante una visita de campo al canal en el que se va a colocar dicha turbina, obteniendo así:

Ancho del canal: 1,63 m

Profundidad del canal: 1,7 m

Altura del agua: 1,52 m

3.2.1.2. Medición de la velocidad.

La velocidad que posee el canal se la podía calcular mediante fórmula, sin embargo, para obtener un dato más real se midió la velocidad con la ayuda de un molinete, colocándolo en tres diferentes puntos a lo ancho del canal, también se tomaron de la misma manera dos alturas distintas, las tablas 2 y 3 muestran las velocidades medidas, siguiendo la metodología descrita en [21], obteniendo los siguientes resultados:

Tabla 2. Velocidad tomada del 20% de la línea de agua hacia abajo.

	Distancias [m]		
	0,4	0,8	1,2
1° Medición	$0,93 \frac{m}{s}$	$1,58 \frac{m}{s}$	$1,44 \frac{m}{s}$
2° Medición	$0,91 \frac{m}{s}$	$1,63 \frac{m}{s}$	$1,36 \frac{m}{s}$
3° Medición	$0,94 \frac{m}{s}$	$1,52 \frac{m}{s}$	$1,31 \frac{m}{s}$
Promedio por Medición	$0,927 \frac{m}{s}$	$1,577 \frac{m}{s}$	$1,37 \frac{m}{s}$
Promedio Total	$1,291 \frac{m}{s}$		

Fuente: [21]

Tabla 3. Velocidad tomada del 60% de la línea de agua hacia abajo.

	Distancias [m]		
	0,4	0,8	1,2
1° Medición	$1,63 \frac{m}{s}$	$1,68 \frac{m}{s}$	$1,2 \frac{m}{s}$
2° Medición	$1,65 \frac{m}{s}$	$1,66 \frac{m}{s}$	$1,22 \frac{m}{s}$
3° Medición	$1,67 \frac{m}{s}$	$1,64 \frac{m}{s}$	$1,26 \frac{m}{s}$
Promedio por Medición	$1,65 \frac{m}{s}$	$1,66 \frac{m}{s}$	$1,227 \frac{m}{s}$
Promedio Total	$1,512 \frac{m}{s}$		

Fuente: [21]

Con las mediciones de la tabla 2 y 3 obtenemos un promedio total de 1.4015 m/s, correspondiente a la velocidad del fluido, sin embargo, para el cálculo del caudal se necesita el área de la turbina que entra en contacto con el fluido, en este caso es una circunferencia de radio 0.2m, con lo cual el área total nos da un valor de $0.12566 m^2$, sin embargo, se toma la mitad del área ya que la turbina no está completamente sumergida, luego se procede a calcular el caudal mediante la fórmula: $Q = A * v$, dándonos como resultado un caudal de $0.08805 \frac{m^3}{s}$.

3.2.2. Metodología

Para diseñar la turbina se tomó como punto de partida los datos que se obtuvieron en la visita de campo al canal, esto también determinó otros datos que simplificaron el cálculo del tornillo, teniendo así cálculos hidráulicos y mecánicos.

3.2.3. Cálculos del tornillo sin fin

Datos:

- Ángulo de Inclinación del tornillo = 30°
- Densidad = $10000 \frac{Kg}{m^3}$
- Caudal = $0.08805 \frac{m^3}{s}$

- Paso = 0.142857 m
- Longitud del tornillo = 1m
- Radio del diente = 0.2 m
- Ángulo de inclinación del diente = 42°
- F_x = Fuerza de empuje que ejerce el agua en dirección del plano “X” u horizontal. [N]
- F_z = Fuerza que ejerce el agua en dirección del plano “Z” o tangencial. [N]
- F_y = Fuerza que ejerce el agua sobre la cascara o fuerza en dirección al eje “Y”. [N]
- W = Fuerza del agua en dirección vertical. [N]
- A = Área de contacto del agua. [m^2]
- ω = Velocidad Angular. [$\frac{rad}{s}$]

Desarrollo

3.2.3.1. Altura del salto

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

$$H = 1m \text{sen}(42^\circ)$$

$$H = 0.5 m$$

3.2.3.2. Potencia teórica

$$Pot_{Teórica} = \rho * g * H * Q$$

$$Pot_{Teórica} = 1000 \frac{Kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{s^2} * 0.5 m * 0.08805 \frac{m^3}{s}$$

$$Pot_{Teórica} = 431.64W$$

3.2.3.3. Área del álabe

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

$$A = \frac{3}{8} \pi 0.2^2$$

$$A = 0.0471239 m^2$$

3.2.3.4. Inercia del álabe

$$Y_c = 0.4951 R$$

$$Y_c = 0.4951 * 0.2$$

$$Y_c = 0.09902m$$

3.2.3.5. Fuerza de empuje que ejerce el agua en dirección del plano "X" u horizontal.

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

$$F_x = 1000 \frac{Kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{s^2} * 0.142857m * 0.0471239m^2 * \text{sen}(30^\circ)$$

$$F_x = 33.02035 N$$

3.2.3.6. Fuerza que ejerce el agua en dirección del plano "Z" o tangencial.

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

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

$$F_z = 33.02035N * \tan(42^\circ)$$

$$F_z = 29.7316895N$$

3.2.3.7. Torque

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

$$T = 1000 \frac{Kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{s^2} * 1m * 0.0471239m^2 * \text{sen}(30^\circ) * \tan(42^\circ)$$

$$T = 20.6082232 Nm$$

3.2.3.8. Velocidad angular

$$\omega = \frac{Q * \tan(\alpha)}{A * Y_c}$$

$$\omega = \frac{0.08805 \frac{m^3}{s} * \tan(42^\circ)}{0.0471239m^2 * 0.09902m}$$

$$\omega = \frac{0.08805 \frac{m^3}{s} * \tan(42^\circ)}{0.0471239m^2 * 0.09902m}$$

$$\omega = 16.9807 \frac{rad}{s}$$

3.2.3.9. Potencia teórica

$$Pot = T * \omega$$

$$Pot = 20.6082232 Nm * 16.9807 \frac{rad}{s}$$

$$Pot = 349.92 W$$

3.2.3.10. Velocidad lineal

$$v = \omega * r$$

$$v = 16.9807 \frac{rad}{s} * 0.2m$$

$$v = 3.39614 \frac{m}{s}$$

3.2.3.11. Revoluciones

$$rpm = \frac{v * 60}{\pi * d}$$

$$rpm = \frac{3.2707 \frac{m}{s} * 60}{\pi * 0.4m}$$

$$rpm = 162.1535$$

3.2.4. Cálculos del eje de transmisión

Datos:

$mT = 26.122 Kg$; masa del tornillo.

$\theta = 30^\circ$; Ángulo de inclinación del tornillo.

$d = 1 in = 0.025 mm$; diámetro del eje

WT = peso del tornillo

Distancias en metros

Desarrollo

3.2.4.1. Fuerza debido a la masa del tornillo

$$WT = mT * g$$

$$WT = 26.122Kg * 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$WT = 256.26 N$$

Diagramas

Mediante la figura 20 y 21 podemos observar las reacciones y los momentos presentes en el eje.

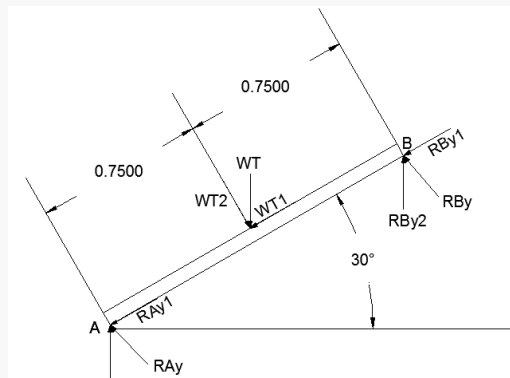


Figura 20. Diagrama de fuerzas.

Fuente: [El Autor]

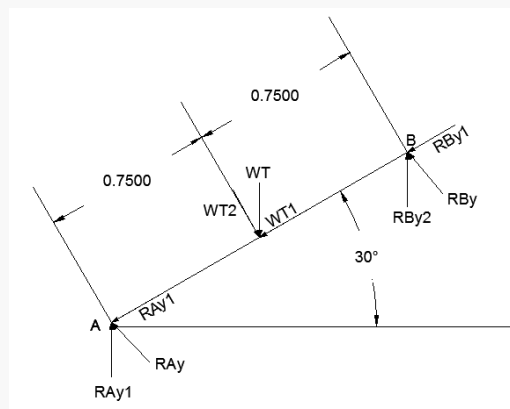


Figura 21. Diagrama de momentos.

Fuente: [El Autor]

3.2.4.2. Transformación de reacciones

$$WT1 = WT \operatorname{sen} 30^\circ$$

$$WT2 = WT \operatorname{cos} 30^\circ$$

$$RAy1 = RAy2 \operatorname{sen} 30^\circ$$

$$RAy = RAy2 \operatorname{cos} 30^\circ$$

$$RBy1 = RBy2 \operatorname{sen} 30^\circ$$

$$RBy = RBy2 \operatorname{cos} 30^\circ$$

3.2.4.3. Reacciones en el eje horizontal

$$+ \uparrow \sum Fy = 0$$

$$RAy2 + RBy2 = WTy$$

$$RAy2 \operatorname{cos} 30^\circ + RBy2 \operatorname{cos} 30^\circ = WT \operatorname{cos} 30^\circ$$

$$RAy2 + RBy2 = WT \quad \underline{\text{Ec 1}}$$

$$+ \text{antihorario} \sum MA = 0$$

$$RBy * 1.5m - WT2 * 0.75m = 0$$

$$(RBy2 * \operatorname{cos} 30^\circ) * 1.5m - (WT * \operatorname{cos} 30^\circ) * 0.75m = 0$$

$$RBy2 * 1.299m - 144.14 = 0$$

$$RBy2 = 110.97 \text{ N}$$

➤ Reemplazando RBy2 en Ec 1

$$RAy2 + RBy2 = WT$$

$$RAy2 = WT - RBy2$$

$$RAy2 = 256.26N - 110.97N$$

$$RAy2 = 110.97N$$

➤ Reemplazando RAy2 y RBy2 en sus funciones

$$RAy = RAy2 \operatorname{cos} 30^\circ$$

$$R_{Ay} = 110.97N \cos 30^\circ$$

$$R_{Ay} = 95.977N$$

$$R_{Ay} = R_{By}$$

$$W_{T2} = WT \cos 30^\circ$$

$$W_{T2} = 221.65N \cos 30^\circ$$

$$W_{T2} = 191.954N$$

Por medio de la figura 22 se puede observar de mejor manera la distribución de fuerzas presente en el eje.

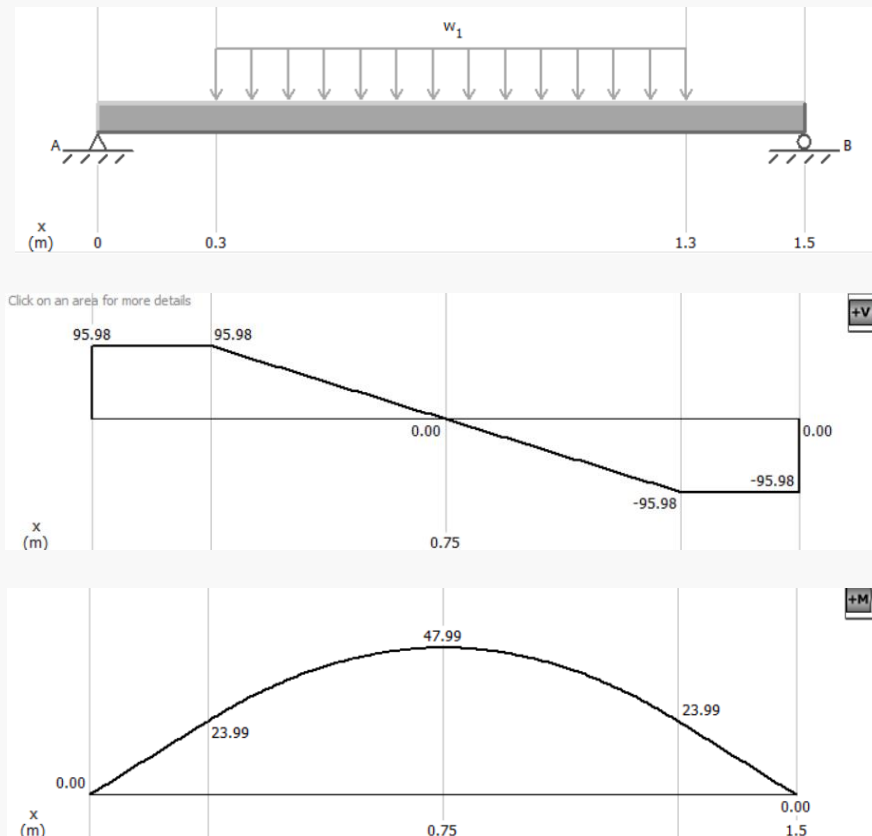


Figura 22. Reacciones y momentos

Fuente: [Autor]

Con la ayuda de un software podemos obtener el momento máximo que obtiene el eje, dando como resultado: 47.99 Nm.

3.2.4.4. Esfuerzos normales y esfuerzos cortantes

$$S = \frac{\pi d^3}{32}$$

$$S = \frac{\pi(0.025)^3}{32}$$

$$S = 1.5339 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$\sigma_x = \frac{M}{S}$$

$$\sigma_x = \frac{47.99 \text{ Nm}}{1.5339 \times 10^{-6} \text{ m}^3}$$

$$\sigma_x = 31.286 \text{ MPa}$$

$$J = \frac{\pi d^4}{32}$$

$$J = \frac{\pi (0.0254)^4}{32}$$

$$J = 4.0863 \times 10^{-8} \text{ m}^4$$

$$\tau_x = \frac{T * r}{J}$$

$$\tau_x = \frac{20.608 \text{ Nm} * 0.0254 \text{ m}}{4.0863 \times 10^{-8} \text{ m}^4}$$

$$\tau_x = 12.8097 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{min}^{max} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau_{xy}^2}$$

$$\sigma_{min}^{max} = \frac{31.286 \text{ MPa}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{31.286 \text{ MPa}}{2}\right)^2 + (12.81 \text{ MPa})^2}$$

$$\sigma_{min}^{max} = 15.643 \text{ MPa} \pm \sqrt{244.7034 + 164.0884} \text{ MPa}$$

$$\sigma_{max} = 35.8616 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{min} = -4.5756 \text{ MPa}$$

3.2.4.5. Factor de seguridad del eje

$$\eta = \frac{S_y \text{ permitido}}{\sigma_{max}}$$

$$\eta = \frac{220 \text{ MPa}}{35.8616 \text{ MPa}}$$

$$\eta = 6.1346$$

3.2.5. Cálculo de la estructura

El anclaje estructural es una parte muy importante en este modelo de turbina ya que debe resistir la carga de peso q que ejerce la turbina.

A continuación, se realizan los cálculos de la fuerza que ejerce el agua sobre la tubería, tomando en cuenta el tubo más largo y suponiendo que la carga se ejerza en la parte más alejada del empotramiento, ya que así se garantizará su resistencia, como podemos observar en la figura 23.

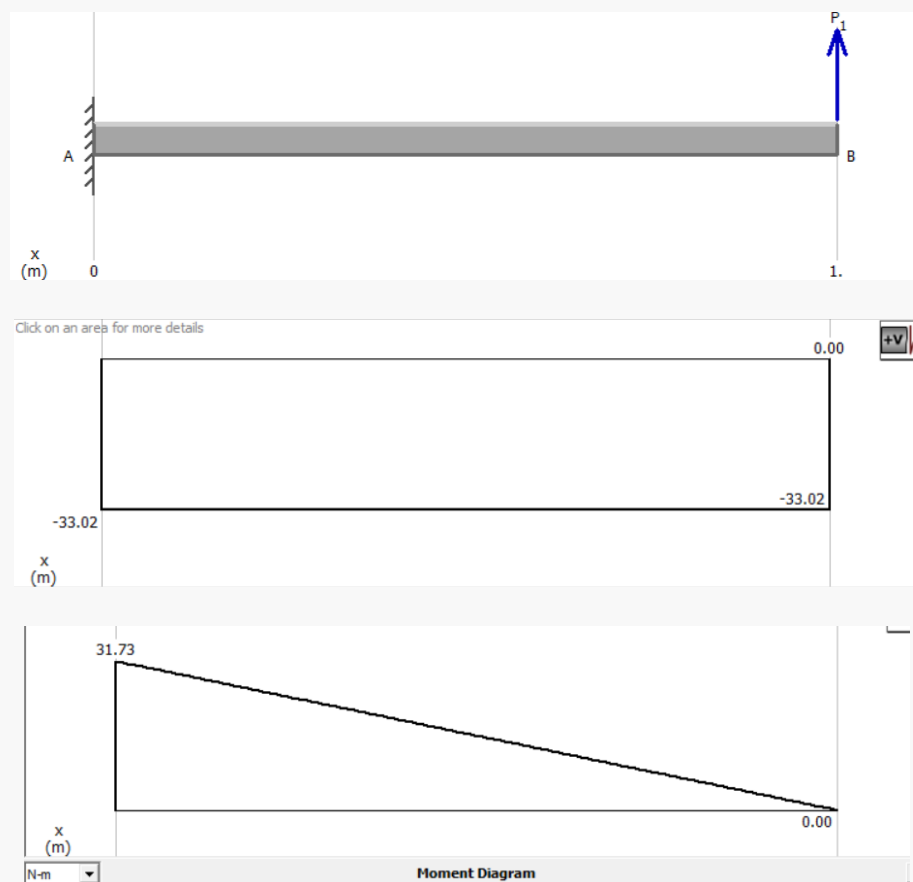


Figura 23 Reacciones y momentos

Fuente: [Autor]

Con la ayuda de un software podemos obtener el momento máximo que obtiene el eje, dando como resultado: 31.73 Nm.

3.2.5.1.Esfuerzos normales y esfuerzos cortantes

$$S = \frac{l_g^4 - l_p^4}{6l_g}$$

$$S = \frac{0.05^4 - 0.046^3}{6 * 0.05}$$

$$S = 5.9084 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

$$\sigma_x = \frac{M}{S}$$

$$\sigma_x = \frac{31.73 \text{ Nm}}{5.9084 \times 10^{-6} \text{ m}^3}$$

$$\sigma_x = 5.3703 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{min}^{max} = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2}\right)^2 + \tau xy^2}$$

$$\sigma_{min}^{max} = \frac{5.3703 \text{ MPa}}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{5.3703 \text{ MPa}}{2}\right)^2 +}$$

$$\sigma_{max} = 5.3703 \text{ MPa}$$

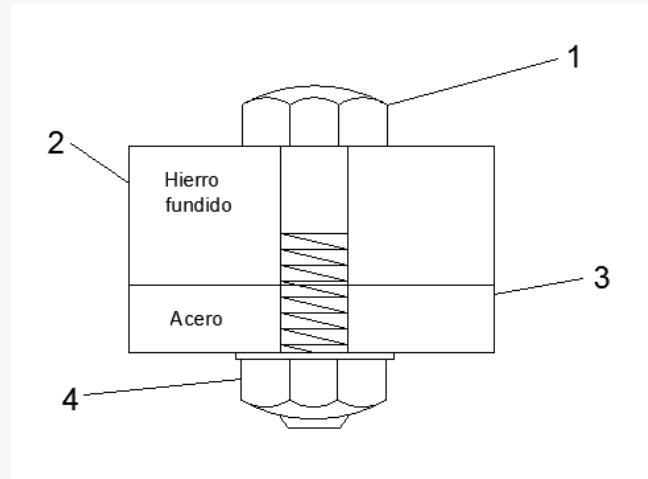
3.2.5.2.Factor de resistencia

$$\eta = \frac{S_y \text{ permitido}}{\sigma_{max}}$$

$$\eta = \frac{220 \text{ MPa}}{5.3703 \text{ MPa}}$$

$$\eta = 40.966$$

3.2.6. Cálculos de los pernos



Donde:

1 Perno, 2 Chumacera, 3 Tubo cuadrado, 4 Tuerca

Figura 24. Unión empernada

Fuente: [Autor]

Datos:

- $N = 4$; número de hilos por pulgada
- $d = \frac{7}{16} \text{ in}$; diámetro del perno
- $P = 35.7543 \text{ Kip}$; carga ejercida
- $L = 1.5 \text{ in}$; longitud del tornillo
- $t1 = \frac{100}{127} \text{ in}$; espesor del hierro fundido
- $E1 = 30 \text{ Mpsi}$; módulo de elasticidad del hierro fundido
- $t2 = \frac{15}{254} \text{ in}$; espesor del tubo cuadrado
- $E2 = 14.5 \text{ Mpsi}$; módulo del tubo cuadrado

Desarrollo

$$h = \frac{100}{127} \text{ in}$$

$$l1 = h + \frac{d}{2}$$

$$l1 = \frac{100}{127}in + \frac{7}{2}$$

$$l1 = 1.00615 in$$

$$D = 1.5d$$

$$D = 1.5 * \frac{7}{16}in$$

$$D = \frac{21}{32}in$$

3.2.6.1. Cálculo de rigidez de las chumaceras

$$t = \frac{l1}{2}$$

$$t = \frac{1}{2} in$$

$$K_1 = \frac{0.5774 * \pi * E1 * d}{In \left[\frac{(1.155t + D - d)(D + d)}{(1.155t + D + d)(D - d)} \right]}$$

$$K_1 = \frac{0.5774 * \pi * 30Mpsi * \frac{7}{16}}{In \left[\frac{((1.155 * 0.5) + \frac{21}{32} - \frac{7}{16})(\frac{21}{32} + \frac{7}{16})}{((1.155 * 0.5) + \frac{21}{32} - \frac{7}{16})(\frac{21}{32} + \frac{7}{16})} \right]}$$

$$K_1 = \frac{23808167.23 \frac{lb}{in}}{In \left[\frac{(\frac{637}{800})(\frac{35}{32})}{(\frac{1337}{800})(\frac{7}{32})} \right]}$$

$$K_1 = \frac{23808167.23 \frac{lb}{in}}{In \left[\frac{455}{191} \right]}$$

$$K_1 = \frac{23808167.23 \frac{lb}{in}}{\ln \left[\frac{455}{191} \right]}$$

$$K_1 = \frac{23.808 \frac{Mlb}{in}}{0.868}$$

$$K_1 = 27.428 \frac{Mlb}{in}$$

La chumacera se eligió teniendo en cuenta el diámetro y la carga que soportará, dándonos como resultado la chumacera 6205, del catálogo SKF, dirigirse al anexo 2.

3.2.6.2.Cálculo de la rigidez del tubo cuadrado

$$t = l - h$$

$$t = 1in - \frac{100}{127}in$$

$$t = \frac{27}{127}in$$

$$K_2 = \frac{0.5774 * \pi * E2 * d}{\ln \left[\frac{(1.155t + D - d)(D + d)}{(1.155t + D + d)(D - d)} \right]}$$

$$K_2 = \frac{0.5774 * \pi * (14.5Mpsi) \left(\frac{7}{16} \right)}{\ln \left[\frac{455}{191} \right]}$$

$$K_2 = \frac{11.507 \frac{Klb}{in}}{0.86802}$$

$$K_2 = 13.2565 \frac{Mlb}{in}$$

$$\frac{1}{Km} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2}$$

$$\frac{1}{Km} = \frac{1}{27.428} + \frac{1}{13.2565}$$

$$K_m = 8.937 \frac{Mlb}{in}$$

$$K_b = \frac{A_t * E}{L}$$

$$K_b = \frac{(0.606 in^2) * 30}{1 in}$$

$$K_b = 18.18 \frac{Mlb}{in}$$

$$C = \frac{K_b}{K_b + K_m}$$

$$C = \frac{18.18 \frac{Mlb}{in}}{18.18 \frac{Mlb}{in} + 8.937 \frac{Mlb}{in}}$$

$$C = 0.6704$$

3.2.6.3. Factor de seguridad

$$\eta = \frac{S_p * A_t - F_i}{C * \left(\frac{P}{n}\right)}$$

Para elegir el valor de A_t dirigirse a Anexo 1

$$A_t = 0.606 in^2$$

$$F_i = 0.75 * F_p \Rightarrow \text{Para conexiones no permanentes}$$

$$F_p = A_t * S_p \text{ Kpsi}$$

$$S_p = 85 \text{ Kpsi}$$

$$F_i = 0.75 * (A_t) * (S_p)$$

$$F_i = 0.75 * (0.606 in^2) * (85 \times 10^3 \frac{lb}{in^2})$$

$$F_i = 38.6325 Klb$$

$$\eta = \frac{\left(85 \frac{Klb}{in^2} * 0.606 in^2\right) - 38.6325 Klb}{0.6704 * \left(\frac{35.75 Kip}{n_4}\right)}$$

$$\eta = 2.1492$$






3.2.7. Selección de materiales

En la mayor parte de la estructura se ha utilizará tubería cuadra la cual resiste de manera correcta la carga de peso que ejerce el tornillo de Arquímedes.

3.2.7.1. Lista de materiales

Una lista de materiales es de suma importancia para la construcción de la máquina ya que ayuda a la optimización de los mismos, para lo cual se elaboró la tabla 4.

Tabla 4. Lista de materiales

Material	Figura
Plancha de tol e=2mm	
Tubo cuadrado 50x50x2	
Tubo cuadrado 50x50x1.5	
Chumaceras de piso de 1 in	
Eje de 1 in	

Pernos de 1.5*7/16 in	
Tuercas 7/16 in	

Fuente: [El Autor]

3.2.7.2. Pesos de los materiales

1. Plancha de tol negro espesor 2mm

Para el cálculo del peso que ejerce el tol negro se ha tomado en cuenta las áreas de acuerdo al modelo que se construyó, obteniendo las siguientes:

- 2 Circunferencias de radio 0.1 m

$$A1 = \pi r^2$$

$$A1 = \pi(0.1m)^2$$

$$A1 = 0.0311516m^2$$

$$At1 = A1 * 2$$

$$At1 = 0.0311516m^2 * 2$$

$$At1 = 0.06283m^2$$

- 1 Plancha rectangular de 1m de largo por 0.2 m

$$A2 = b * h$$

$$A2 = 1m * 0.2m$$

$$A2 = 0.2 m^2$$

- Para la semiluna se realiza la resta del área mayor del círculo menos el área menor del círculo.

$$A3 = A_{mayor} - A1$$

$$A3 = \pi(r_{mayor})^2 - A1$$

$$A3 = 0.1256m^2 - 0.0311516m^2$$

$$A3 = 0.09452m^2$$

$$At3 = A3 * \text{número de semilunas}$$

$$At3 = 0.0945m^2 * 15$$

$$At3 = 1.4177m^2$$

- A continuación, con las áreas calculadas se procede a obtener los volúmenes de cada figura.

$$V1 = At1 * e$$

$$V1 = 0.06283m^2 * 0.002m$$

$$V1 = 1.2566 \times 10^{-4} m^3$$

$$V2 = A2 * e$$

$$V2 = 0.2 m^2 * 0.002m$$

$$V2 = 4 \times 10^{-4} m^3$$

$$V3 = At3 * e$$

$$V3 = 2.472m^2 * 0.002m$$

$$V3 = 2.8354 \times 10^{-3} m^3$$

- Volumen total

$$VT = V1 + V2 + V3$$

$$VT = 1.2566 \times 10^{-4} m^3 + 4 \times 10^{-4} m^3 + 2.8354 \times 10^{-3} m^3$$

$$VT = 3.3610 \times 10^{-3} m^3$$

- Masa total de tol

$$\text{Densidad del acero (} \rho \text{ ACERO)} = 7850 \frac{Kg}{m^3}$$

$$Masa = \rho ACERO * VT$$

$$Masa = 7850 \frac{Kg}{m^3} * 3.3610x 10^{-3}m^3$$

$$Masa = 26.38 Kg$$

$$Peso = masa * g$$

$$Peso = 26.38 Kg * 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$Peso = 258.7878N$$

2. Tubo Cuadrado de 50x50x2

Metros utilizados = 7.18414 m

1 metros pesan 3.03Kg (catálogo de DIPAC)

$$6m \rightarrow 18.18 Kgf$$

$$7.18414 m \rightarrow X$$

$$X = \frac{7.18414 m * 18.18 kgf}{6m} = 21.76 Kgf$$

$$Peso = 21.76 Kgf$$

$$Peso = 213.39 N$$

3. Tubo cuadrado de 50x50x1.5

Metros utilizados = 6 m

1 metros pesan 2.29Kg (catálogo de DIPAC)

$$6m \rightarrow 13.74Kg$$

$$Peso = 134.74 Kgf$$

$$Peso = 155.71N$$

4. Dos Chumaceras de piso de 1 in

Masa de cada Chumacera = 0.83 kg

Masa total 1.66 Kg

$$Peso = m * g$$

$$Peso = 1.66 kg * 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$Peso = 16.2846 N$$

5. Eje de transmisión

Metros utilizados = 2 m

1 metro pesan 3.977655 Kg

$$\text{Masa Total del eje} = 7.95531 \text{ Kg}$$

$$\text{Peso} = m * g$$

$$\text{Peso} = 7.95531 \text{ kg} * 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\text{Peso} = 78.04159 \text{ N}$$

3.2.7.3. Peso total de la máquina

$$\text{Peso Total} = \text{Peso de la plancha de tol}$$

$$+ \text{Peso del tubo cuadrado de } 50 \times 50 \times 1.5$$

$$+ \text{Peso del tubo cuadrado de } 50 \times 50 \times 2$$

$$+ \text{Peso de las chumaceras} + \text{Peso de eje.}$$

$$\text{Peso Total} = 258.7878\text{N} + 155.71\text{N} + 213.39\text{N} + 16.2846\text{N} + 78.04159$$

$$\text{Peso Total} = 722.2139\text{N}$$

3.3.Presupuesto

3.3.1. Costos de materiales

Tabla 5. Costos de materiales

MINI TURBINA TIPO TORNILLO DE ARQUÍMEDES					
Cantidad	Componente	Imagen	Material	Precio Unitario	Precio Total
1	Plancha de Tol		Acero A36	\$41.68	\$41.68
2	Tubo cuadrado 50x50x2		Acero A36	\$17.56	\$35.12
2	Tubo cuadrado 50x50x1.5		Acero A36	\$13.95	\$27.90
2	Chumaceras de piso de 1 in		Hierro Fundido	\$6.00	\$12.00
1	Eje de 1 in		Acero AISI 1018	\$16.00	\$16.00
4	Pernos de 1.5*7/16 in		Acero Negro A36	\$0.230	\$0.92
4	Tuercas 7/16 in		Acero Negro A36	\$0.23	\$0.92
3	Pintura		Pintura	\$15.00	\$45.00
Total					\$179.54

Fuente: [El Autor]

3.3.2. Costos de Mano de obra en soldadura y gastos generales

Para determinar el costo de soldadura se necesita determinar el sueldo del trabajador por lo cual se elaboró la tabla 6.

Tabla 6 . Costos de mano de obra de soldadura

MANO DE OBRA

SUELDO	XIII	XIV	VACACIONES	EPP	FONDOS DE RESERVA
\$ 394.00	\$ 32.83	\$ 20.00	\$ 16.42	\$ 20.00	\$ *

Los fondos de reserva aplican a partir del segundo año.

TOTAL	\$ 483.25	\$/mes
\$/hr	\$ 3.02	
M.O. y G.G	\$ 5.02	
\$/mL	\$ 10.75	
TOTAL	\$ 72.04	

3.3.3. Costos de soldadura

En la tabla 7 podemos observar las características del electrodo 6011.

Tabla 7. Parámetros de electrodo E6011

ELECTRODO E6011			
AMPERES	VELOCIDAD	DIAMETRO (in)	VALOR (\$/kg)
100	1	3/32	\$ 2.65
125	1.4	1/8	\$ 2.65
150	2.5	5/32	\$ 2.65
175	1.8	3/16	\$ 2.65
200	2		
225	2.3		
250	2.7		
275	3		
300	3.3		

Fuente: [22]

En la tabla 8 se puede observar la eficiencia de la deposición de acuerdo con el tipo de soldadura.

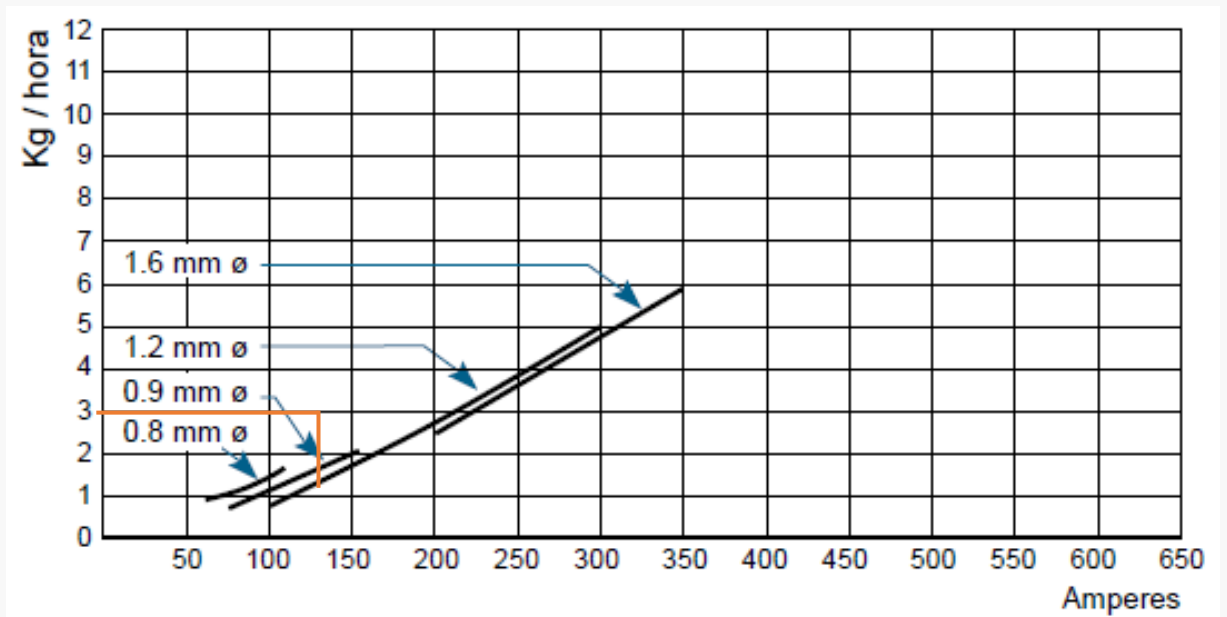
Tabla 8. Eficiencia de deposición

Proceso	Eficiencia Deposición (%)
Electrodo Manual	60 - 70
MIG Sólido	90
MIG Tubular c/protección	83
MIG Tubular s/protección	79
TIG	95
Arco Sumergido	98

Fuente: [22]

La tabla 9 nos muestra la velocidad de deposición vs el amperaje de la soldadora.

Tabla 9. Velocidad de deposición



Fuente: [22]

El factor de operación se lo toma de acuerdo al tipo de soldadura, como se muestra en la tabla 10.

Tabla 10. Factor de operación

Proceso	Factor de Operación (%)
Electrodo Manual	5 - 30
MIG Sólido	10 - 60
MIG Tubular	10 - 60
TIG	5 - 20
Arco Sumergido	50 - 100

Fuente: [2]

Una vez obtenidos todos los valores de tablas se procedió a realizar la tabla 11, en la cual se muestran los datos:

Tabla 11. Costo de soldadura

DATOS		
LONGITUD	6.7	mtrs
GASTOS GENERALES DE FÁBRICA (GGF)	2	\$/Hr
ELECTRODO	E6011	
AMPERES	125	
DIÁMETRO DEL ELECTRÓDO	1/8	IN
VELOCIDAD DE SOLDADURA	1.4	Kg/Hr
SUELDO DEL OPERARIO	394	USD/mes
MESES LABORABLES DEL OPERARIO	1	
VALOR DEL ELECTRODO	3.08	USD/kg
ESPESOR DE LA PLACA	5/8	IN
UNIÓN DE SOLDADURA	2	
EFICIENCIA DE DEPOSICIÓN	60%	
PMD	1.103	kg/mL
SUELDO BÁSICO	240	
FACTOR DE OPERACIÓN	25%	
COSTO ENERGÉTICO	4	KW*h/Kg

Fuente: [Autor]

\$/mL	29.5604
COSTO \$	3.547248

Fuente: [Autor]

Tabla 12. Costo del material de aporte

\$/mL	5.66
\$	\$ 37.94
Kg Electrodo	12

Fuente: [Autor]

3.3.4. Costo total de soldadura

Costo total = \$72.04+\$3.5472+\$37.94

Costo total = \$113.53

3.3.5. Costo de fabricación de la turbina

Tabla 13. Costo total

Descripción	Costo
Materiales	\$334.54
Mano de obra y gastos generales	\$72.04
Maquinaria	\$150.00
Costo de soldadura	\$113.53
TOTAL	\$ 670.11

Fuente: [Autor]

3.4. Especificaciones técnicas

Para determinar las características técnicas de la mini turbina se realizó las pruebas de campo correspondientes, con lo cual se determinó lo que produce la mini turbina.

Tabla 14. Especificaciones técnicas de la turbina

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO					
FCULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA					
FICHA DE:	MÁQUINA	EQUIPO	X	SISTEMA	
		INGENIERÍA MECÁNICA			
					
CARACTERÍSTICAS GENERALES					
DIMENSIONES	3*2*2 m				
PESO	722.2139 N				
REVOLUCIONES	120 rpm				
TORQUE	26.817 Nm				
POTENCIA	337.0183 W				
VELOCIDAD ANGULAR	12.5665 rad/s				
PASO DEL TORNILLO	0.12428 m				
DIÁMETRO DEL EJE	0.0254 m				

Fuente: [Autor]

4. CAPÍTULO IV. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. Conclusiones

- El diseño de una turbina tipo tornillo de Arquímedes, con aplicación de fórmulas y parámetros tomados debido a las dimensiones del canal, dieron como resultado un ángulo de inclinación del álabe del tornillo debe poseer un ángulo de entre 40° a 45° , una potencia que va está en el rango de 335 a 380 W, la velocidad angular está entre 15 a 17 rad/s, el rango de revoluciones está entre 150 a 180 revoluciones por minuto, y el torque entre 15 a 25 Nm.
- Con la ayuda de los parámetros tomados para los cálculos se procedió a modelar en un software especializado, tomando en cuenta el factor de seguridad , una vez obtenidos los planos del modelado, se efectuó el proceso de construcción y se procedió a colocar para realizar las pruebas en el canal Huachi-Pelileo, el cual se considera canal primario debido a que entrega caudales que están en el rango de 0.9 a $1.7 \frac{m^3}{s}$.
- Mediante las pruebas realizadas se midió las revoluciones entregadas por la turbina, por medio de un sensor electromagnético, dichas revoluciones las cuales están en un rango de 125 a 160 rpm, también con la ayuda del modelo teórico obtuvimos una potencia que se encuentra en el rango de 335 a 380 W y un torque de entre 15 a 25 Nm.

4.2. Recomendaciones

- Se debe aislar los rodamientos herméticamente ya que uno de ellos se encuentra completamente sumergido, y el otro está a la intemperie, además debería ser un mecanismo al cual se pueda dar un mantenimiento adecuado.
- Las dimensiones del canal provocan la construcción de una estructura relativamente grande, esta estructura es muy difícil de transportar, por esto se ha colocado un mecanismo de ensamble a los soportes principales, sin embargo, dicho sistemas se puede mejorar colocando un riel, esto permitiría un movimiento más amplio.
- Se debe hacer un mejor estudio sobre la corrosión ya que la mayor parte del tiempo la turbina está sumergida, lo cual ayuda a tener un desgaste

mucho mayor y en menor tiempo, en este caso solo se le aplicó un anticorrosivo pasivo el cual lo protege mínimamente.

- Para la fabricación del tornillo lo mejor sería contar con la maquinaria adecuada, sin embargo, si no se cuenta con ella, se lo puede hacer de forma manual, para este proceso se debe realizar una plantilla en forma de semiluna, la cual sirve para el corte de la plancha de tol, para darle el ángulo de inclinación se puede utilizar los golpes.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Blogia, “El tornillo de Arquímedes,”. (2007, Mayo 4). [Online]. Available: https://tecno_historia.blogia.com/2007/053001-el-tornillo-de-arquimedes.php
- [2] V. Martín, "Llano que contiene el primer 'Hidrotor'",.(2016, Junio18). El Comercio [Online]. Available: <https://www.elcomercio.es/asturias/oriente/201606/18/llano-tiene-primer-hidrotor-20160618004219-v.html>
- [3] Unión Europea,“El acuerdo de París contra el cambio climático,” (2014).[Online]. Available: <http://www.empresaclima.org/articulo-de-prensa/el-acuerdo-de-paris-contra-el-cambio-climatico-impulsa-las-renovables/>
- [4] Ecuatran, “Centrales hidroeléctricas en Ecuador 2017,”.(2018, Diciembre 5). [Online]. Available:<http://www.ecuatran.com/blog/conoce-cuales-son-las-9-centrales-hidroelectricas-que-existen-en-ecuador/>
- [5] A. Ritz. "Archimedean screw pumps,"Alemania, 2006
- [6] I. V. Hervás, "Energía Hidráulica," 2012
- [7] A. Ricardo, G. Chávez, "Micro Generación Hidroeléctrica," 2017.
- [8] R. José, “Las 10 hidroeléctricas más grandes del mundo,” (2015). [Online]. Available: <https://elperiodicodelaenergia.com/las-10-centrales-hidroelectricas-mas-grandes-del-mundo/>
- [9] C. Santiago, “Ventajas y desventajas de la energía hidráulica,”(2010). [Online]. Available: <http://www.dforcesolar.com/energia-solar/ventajas-y-desventajas-de-la-energia-hidraulica/>
- [10] G. Vicent, “Hydroélectrique rentable qui respecte voire améliore la continuité écologique des cours d’eau,” (2016). [Online]. Available: <https://www.lumo-france.com/blog/2016/04/18/la-vis-d-archimede-une-solution-hydroelectrique-rentable-qui-respecte-voire-ameliore-la-continuite-ecologique-des-cours-d-eau>
- [11] I. José,“La tecnología hidroeléctrica,”(2004). [Online]. Available: <https://www.epec.com.ar/docs/educativo/institucional/hidroelectricidad.pdf>
- [12] N. Geographic, "Energía Hidroeléctrica," 2010.

- [13] Z. Blas , V. Aantonio, “Máquinas Hidráulicas,”(2006). [Online]. Available: <http://repositorio.upct.es/bitstream/handle/10317/5476/isbn9788416325191.pdf>
- [14] Q. Luis, “Turbinas Hidráulicas.” [Online]. Available: https://www.academia.edu/11613364/Clasificacion_y_componentes_de_las_turbinas_hidraulicas.
- [15] C. Federico, M. Homero, C. Eusebio, G. Jaime, Segura, “Manual de mini y microcentrales hidráulicas,”(1995), Lima.
- [16] M. Alberto, "DISEÑO DE UNA TURBINA HIDRÁULICA BASADA EN EL TORNILLO DE ARQUÍMEDES," (2011), [Online]. Available: <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/1788/>
- [17] B. Francisco “ Canales,” (2008). [Online]. Available: <https://www.eoi.es/es/file/18589/download?token=qU0x4CXN>
- [18] R. Prophet. “An Investigation into the Feasibility of a Micro-hydro Installation for the Guardbridge Energy Centre as Part of a Brownfield Redevelopment”. (2015). [Online]. Available: http://www.esru.strath.ac.uk/Documents/MSc_2015/Prophet.pdf
- [19] M. Robert, “Mecánica de Fluidos,” Sexta Edición ed, (2006).
- [20] Landustrie. Hidrotornillos. [Online]. Available: <https://www.landustrie.nl/es/productos/hydroenergia/hidrotornillos.html>
- [21] K. Arturo, F. Fernando, P. Efrén, M. Eduardo, “Manual de Aforos,” México: Subcoordinación Editorial, IMTA, (1992, Marzo).
- [22] Indura, "Manual de sistemas y materiales de soldadura," Ed., ed, 1948.

6. ANEXOS
ANEXO 1

Diámetros y áreas de roscas unificadas de tornillo UNC y UNF*

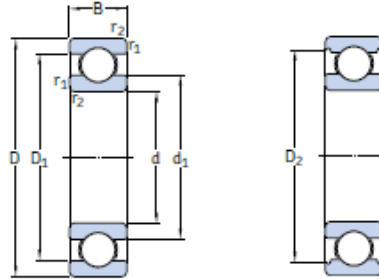
Tabla 8-2

Diámetros y área de roscas unificadas de tornillo UNC y UNF*

Designación de tamaño	Diámetro mayor nominal pulg	Serie gruesa-UNC			Serie fina-UNF		
		Roscas por pulgada, N	Área de esfuerzo de tensión A_t , pulg ²	Área del diámetro menor A_r , pulg ²	Roscas por pulgada, N	Área de esfuerzo de tensión A_t , pulg ²	Área del diámetro menor A_r , pulg ²
0	0.0600				80	0.001 80	0.001 51
1	0.0730	64	0.002 63	0.002 18	72	0.002 78	0.002 37
2	0.0860	56	0.003 70	0.003 10	64	0.003 94	0.003 39
3	0.0990	48	0.004 87	0.004 06	56	0.005 23	0.004 51
4	0.1120	40	0.006 04	0.004 96	48	0.006 61	0.005 66
5	0.1250	40	0.007 96	0.006 72	44	0.008 80	0.007 16
6	0.1380	32	0.009 09	0.007 45	40	0.010 15	0.008 74
8	0.1640	32	0.014 0	0.011 96	36	0.014 74	0.012 85
10	0.1900	24	0.017 5	0.014 50	32	0.020 0	0.017 5
12	0.2160	24	0.024 2	0.020 6	28	0.025 8	0.022 6
$\frac{1}{4}$	0.2500	20	0.031 8	0.026 9	28	0.036 4	0.032 6
$\frac{5}{16}$	0.3125	18	0.052 4	0.045 4	24	0.058 0	0.052 4
$\frac{3}{8}$	0.3750	16	0.077 5	0.067 8	24	0.087 8	0.080 9
$\frac{7}{16}$	0.4375	14	0.106 3	0.093 3	20	0.118 7	0.109 0
$\frac{1}{2}$	0.5000	13	0.141 9	0.125 7	20	0.159 9	0.148 6
$\frac{9}{16}$	0.5625	12	0.182	0.162	18	0.203	0.189
$\frac{5}{8}$	0.6250	11	0.226	0.202	18	0.256	0.240
$\frac{3}{4}$	0.7500	10	0.334	0.302	16	0.373	0.351
$\frac{7}{8}$	0.8750	9	0.462	0.419	14	0.509	0.480
1	1.0000	8	0.606	0.551	12	0.663	0.625
$1\frac{1}{4}$	1.2500	7	0.969	0.890	12	1.073	1.024
$1\frac{1}{2}$	1.5000	6	1.405	1.294	12	1.581	1.521

ANEXO 2

Rodamientos rígidos de una hilera de bolas d 25 – 35 mm



Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga P_u	Velocidades		Masa	Designación	
d	D	B	dinámica C	estática C_0		Velocidad de referencia	Velocidad límite			
mm			kN		kN	rpm	kg		-	
25	37	7	4,36	2,6	0,125	38 000	24 000	0,022	61805	
	42	9	7,02	4,3	0,193	36 000	22 000	0,045	61905	
	47	8	8,06	4,75	0,212	32 000	20 000	0,060	*16005	
	47	12	11,9	6,55	0,275	32 000	20 000	0,080	*6005	
	52	9	10,6	6,55	0,28	28 000	18 000	0,078	98205	
	52	15	14,8	7,8	0,335	28 000	18 000	0,13	*6205	
	52	15	17,8	9,8	0,40	28 000	18 000	0,12	6205 ETN9	
	62	17	23,4	11,6	0,49	24 000	16 000	0,23	*6305	
	62	17	26	13,4	0,57	24 000	16 000	0,21	6305 ETN9	
	80	21	35,8	19,3	0,82	20 000	13 000	0,53	6405	
	28	58	16	16,8	9,5	0,405	26 000	16 000	0,18	62/28
		68	18	25,1	13,7	0,585	22 000	14 000	0,29	63/28
30	42	7	4,49	2,9	0,146	32 000	20 000	0,027	61806	
	47	9	7,28	4,55	0,212	30 000	19 000	0,051	61906	
	55	9	11,9	7,35	0,31	28 000	17 000	0,085	*16006	
	55	13	13,8	8,3	0,355	28 000	17 000	0,12	*6006	
	62	10	15,9	10,2	0,44	22 000	14 000	0,12	98206	
	62	16	20,3	11,2	0,48	24 000	15 000	0,20	*6206	
	62	16	23,4	12,9	0,54	24 000	15 000	0,19	6206 ETN9	
	72	19	29,6	16	0,67	20 000	13 000	0,35	*6306	
35	72	19	32,5	17,3	0,74	22 000	14 000	0,33	6306 ETN9	
	90	23	43,6	23,6	1,00	18 000	11 000	0,74	6406	
	47	7	4,75	3,2	0,17	28 000	18 000	0,030	61807	
	55	10	9,56	6,8	0,29	26 000	16 000	0,080	61907	
	62	9	13	8,15	0,38	24 000	15 000	0,11	*16007	
	62	14	16,8	10,2	0,44	24 000	15 000	0,16	*6007	
	72	17	27	15,3	0,66	20 000	13 000	0,29	*6207	
72	17	31,2	17,6	0,75	20 000	13 000	0,27	6207 ETN9		
80	21	35,1	19	0,82	19 000	12 000	0,46	*6307		
100	25	55,3	31	1,29	16 000	10 000	0,95	6407		

* Rodamiento SKF Explorer

ANEXO 3



ANEXO 4



ANEXO 5



ANEXO 6



ANEXO 7



ANEXO 8



ANEXO 9



ANEXO 10



ANEXO 11



ANEXO 12



ANEXO 13



ANEXO 14



ANEXO 15



ANEXO 16



ANEXO 17

