

CONSTRUCCIÓN DE UN TORNILLO HIDRODINÁMICO PARA LA  
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA PARA UNA CERCA EN LA VEREDA  
DE SABANETA DEL MUNICIPIO DE SABANA DE TORRES, SANTANDER.

WILLIAM MAURICIO ORDOÑEZ GARCIA (000285004)

JUAN LIZARDO PRADA MANTILLA (000297533)

SERGIO ANDRES GOMEZ SUAREZ

MSC INGENIERIA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA

PROPUESTA DE PROYECTO DE GRADO

BUCARAMANGA

2021

CONSTRUCCIÓN DE UN TORNILLO HIDRODINÁMICO PARA LA  
GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA PARA UNA CERCA EN LA VEREDA  
DE SABANETA DEL MUNICIPIO DE SABANA DE TORRES, SANTANDER.

WILLIAM MAURICIO ORDOÑEZ GARCIA (000285004)

JUAN LIZARDO PRADA MANTILLA (000297533)

Proyecto de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico.

SERGIO ANDRES GOMEZ SUAREZ

MSC INGENIERIA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA

PROPUESTA DE PROYECTO DE GRADO

BUCARAMANGA

2021

Nota de aceptación.

---

---

---

---

---

Firma del jurado.

---

Firma del jurado.

## DEDICATORIA

Yo, Juan Lizardo Prada Mantilla, les dedico este logro a mis padres, Juan Lizardo Prada Meza y Martha Cecilia Mantilla Elvira, los cuales siempre me apoyaron e impulsaron en todo este proceso, siempre estuvieron pendientes de mí sin importar las dificultades, me alentaron en los momentos más pesados y nunca perdieron la fe en mí, siempre me inspiraron a seguir y no desfallecer.

Yo, William Mauricio Ordoñez García en primera instancia dedico este logro a mi mamá Mónica García Pabón y a mi tía Elizabeth García Pabón, quienes han sido participes y el pilar más grande en todo mi proceso de formación tanto personal como académicamente, me han apoyado e impulsado toda la vida para lograr los objetivos y metas que me he propuesto, también dedico este logro a mis abuelas Myriam Pabón de García y María Antonia Álvarez quienes han hecho un aporte grande a mi crianza y a la construcción de mi carácter.

## **AGRADECIMIENTOS**

En primera medida le agradecemos a Dios por ayudarnos a obtener este logro y guiarnos en todo este proceso, le agradecemos a nuestros padre y familiares los cuales nos apoyaron y alentaron a seguir adelante, a nuestro director de proyecto el cual nos dio guía y nos enseñó todo este proceso, a todos los profesores de la facultad de ingeniería mecánica de la universidad ya que nos enseñaron todo lo que necesitamos para desarrollar este proyecto, a todos nuestros compañeros los cuales compartieron con nosotros y estuvieron en todo este proceso de aprendizaje y a la universidad pontificia bolivariana por estar al pendiente de nosotros en todo el proceso y por permitirnos aprender tanto.

## TABLA DE CONTENIDOS

1 RESUMEN .....	12
2 INTRODUCCIÓN .....	14
3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	15
4 ANTECEDENTES.....	16
5 JUSTIFICACIÓN .....	17
6 OBJETIVOS.....	18
6.1 OBJETIVO GENERAL.....	18
6.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	18
7 MARCO TEORICO .....	20
7.1 PRINCIPIO DE ARQUIMEDES.....	20
7.1.1 Principio de Arquímedes .....	20
7.1.2 Empuje.....	20
7.1.3 Peso específico de un fluido.....	21
7.1.4 Volumen de un fluido.....	21
7.1.5 Densidad de un fluido.....	22
7.1.6 Gravedad.....	22
7.2 TORNILLO DE ARQUIMEDES .....	23
7.2.1 Definición de tornillo de Arquímedes .....	23
7.2.2 Usos que tiene un tornillo de Arquímedes .....	23
7.2.3 Variantes del tornillo de Arquímedes .....	24
7.3 ENERGIA RENOVABLE .....	24
7.3.1 Definición de energías renovables .....	24
7.3.2 Energía hidráulica.....	24
7.4 TEORÍA DE LOS CÁLCULOS DEL TORNILLO.....	25
7.4.1. Avance del tornillo.....	25
7.4.2. Angulo exterior de la hélice .....	26
7.4.3. Angulo exterior de la hélice .....	26
7.4.4 Área de contacto con el agua.....	26
7.4.5. Salto del agua (Altura).....	27
7.4.6. Fuerza de empuje en dirección al plano Axial.....	27

7.4.7 Fuerza de empuje en dirección al plano tangencial .....	28
7.4.8 Centroide ( $Y_c$ ).....	28
7.4.9 Torque en el tornillo .....	29
7.4.10 Caudal en el tornillo .....	29
7.4.11 Velocidad angular del tornillo.....	30
7.4.12 Potencia Teórica .....	30
7.4.13 Eficiencia .....	30
7.4.14 Potencia en el eje de transmisión.....	31
8 ALCANCE .....	32
9 METODOLOGÍA .....	33
9.1. ESTADO DEL ARTE.....	33
9.2. DISEÑO DEL PROTIPO DE TORNILLO HIDRODINÁMICO.....	33
9.3. FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO DE TORNILLO HIDRODINÁMICO .....	34
9.4 INSTALACIÓN DEL PROTOTIPO DE TORNILLO HIDRODINÁMICO .....	34
9.5 VALIDACION DEL PROTOTIPO DE TORNILLO HIDRODINÁMICO.....	34
10 IDENTIFICAR LOS PARÁMETROS Y REQUERIMIENTOS DE DISEÑO QUE SE DEBEN TENER EN CUENTA PARA LA FABRICACIÓN DEL TORNILLO HIDRODINÁMICO.....	35
10.1 RESTRICCIONES Y LIMITACIONES.....	35
10.2 ARBOL DE OBJETIVOS.....	36
10.3 DIAGRAMA DE FUNCIONES .....	38
10.4 LISTA DE REQUERIMIENTOS .....	39
11. DISEÑO CONCEPTUAL DEL TORNILLO HIDRODINÁMICO .....	43
11.1 DIAGRAMA MORFOLÓGICO CON POSIBLES SOLUCIONES PARA DISEÑO DEL TORNILLO HIDRODINÁMICO.....	43
11.2 POSIBLES SOLUCIONES DE DISEÑO DEL PROTOTIPO DE TORNILLO HIDRODINAMICO.....	45
11.3 SELECCIÓN DEL DISEÑO .....	53
12 CÁLCULOS PARA LA ELABORACIÓN DEL TORNILLO HIDRODINÁMICO.....	56
12.1 AVANCE DEL TORNILLO .....	58
12.2 ÁNGULO EXTERIOR DE LA HÉLICE.....	58
12.3 ÁNGULO INTERIOR DE LA HÉLICE.....	59
12.4 ÁREA DE CONTACTO CON EL AGUA.....	59

12.5 SALTO DEL AGUA (ALTURA).....	60
12.6 FUERZA DE EMPUJE EN DIRECCIÓN AL PLANO AXIAL .....	60
12.7 FUERZA DE EMPUJE EN DIRECCIÓN AL PLANO TANGENCIAL .....	60
12.8 SUMATORIA DEL ÁREA POR EL YC.....	61
12.9 SUMATORIA DEL ÁREA .....	61
12.10 CENTROIDE .....	62
12.11 TORQUE EN EL TORNILLO.....	62
12.12 CAUDAL EN EL TORNILLO.....	62
12.13 VELOCIDAD ANGULAR DEL TORNILLO .....	62
12.14 POTENCIA TEÓRICA .....	63
12.15 EFICIENCIA.....	63
12.16 POTENCIA EN EL EJE DE TRANSMISIÓN .....	63
13 CÁLCULOS DE ESFUERZOS .....	64
13.1 CÁLCULO DE LAS REACCIONES .....	65
13.2 CÁLCULO DE LAS REACCIONES .....	65
13.3 REACCIONES EN EL EJE Y .....	66
14 SELECCIÓN DE LOS RODAMIENTOS ADECUADOS.....	73
15 SELECCIÓN DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA .....	74
16 LISTA DE MATERIALES.....	75
17 SELECCIÓN DEL GENERADOR .....	76
18 CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO.....	77
18.1 CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA .....	77
18.2 CONSTRUCCIÓN DE LA TOLVA .....	81
18.3 CONSTRUCCIÓN DEL TORNILLO SIN FIN.....	83
18.4 CONSTRUCCIÓN DE LA TRANSMISIÓN DE POTENCIA .....	86
18.5 ENSAMBLE FINAL DEL TORNILLO HIDRODINÁMICO.....	87
19 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS .....	91
20 CONCLUSIONES Y RECOMEDACIONES.....	96
20.1 CONCLUSIONES.....	96
20.2 RECOMENDACIONES .....	97
21 REFERENCIAS.....	98
22 ANEXOS .....	100

## LISTA DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Árbol de objetivos .....	37
Ilustración 2. Diagrama de funciones.....	38
Ilustración 3. Diagrama de funciones detallado .....	39
Ilustración 4. Vista isométrica del diseño conceptual 1.....	46
Ilustración 5. Vista superior del diseño conceptual 1 .....	46
Ilustración 6. Vista posterior del diseño conceptual 1 .....	47
Ilustración 7. Vista isométrica del diseño conceptual 2.....	49
Ilustración 8. Vista específica del sistema de transmisión de potencia del diseño conceptual 2.....	49
Ilustración 9. Vista posterior del diseño conceptual 2. ....	50
Ilustración 10. Vista isométrica del diseño conceptual 3.....	52
Ilustración 11. Vista específica del sistema de transmisión de potencia del diseño conceptual 3.....	52
Ilustración 12. Vista posterior del diseño conceptual 3. ....	53
Ilustración 13. Esquema de los valores predeterminados del tornillo hidrodinámico .....	57
Ilustración 14. Esquema de explicación de los ángulos $\alpha$ y $\beta$ .....	59
Ilustración 15. Esquema que explica el área de contacto del agua .....	60
Ilustración 16. DCL del tornillo hidrodinámico con respecto a $F_x$ , $F_y$ y $F_z$ .....	61
Ilustración 17. Esquema de obtención del cálculo del centroide.....	62
Ilustración 18. Propiedades físicas del tornillo ensamblado.....	64
Ilustración 19. Diagrama de fuerzas. ....	65
Ilustración 20. Diagrama de Reacciones y momentos .....	68
Ilustración 21. Limite elástico del Acero ASTM A36.....	71
Ilustración 22. Especificación de rodamientos. ....	73
Ilustración 23. Especificaciones del alternador. ....	76
Ilustración 24. construcción de la base. ....	77
Ilustración 25. Base y torres de la estructura.....	78
Ilustración 26. Base y torres de la estructura.....	78
Ilustración 27. Base y torres de la estructura.....	79
Ilustración 28. Estructura terminada. ....	80
Ilustración 29. Estructura terminada. ....	80
Ilustración 30. Tolva y estructura. ....	81
Ilustración 31. Tolva y estructura. ....	82
Ilustración 32. Estructura y tolva pintados. ....	82
Ilustración 33. Estructura y tolva pintados. ....	83
Ilustración 34. Construcción del eje del tornillo.....	84
Ilustración 35. Instalación de las aspas del tornillo.....	84

Ilustración 36. Instalación de las aspas del tornillo. ....	85
Ilustración 37. Instalación de las aspas del tornillo. ....	85
Ilustración 38. Tornillo finalizado.....	86
Ilustración 39. Sistema de transmisión de potencia. ....	87
Ilustración 40. Sistema tornillo hidrodinámico terminado. ....	88
Ilustración 41. Sistema tornillo hidrodinámico terminado. ....	88
Ilustración 42. Sistema tornillo hidrodinámico terminado. ....	89
Ilustración 43. Sistema tornillo hidrodinámico terminado. ....	89
Ilustración 44. Sistema tornillo hidrodinámico terminado. ....	90
Ilustración 45. Evidencia del funcionamiento del prototipo. ....	91
Ilustración 46. Evidencia de la admisión del agua al sistema. ....	92
Ilustración 47. Evidencia de la salida del agua del sistema ....	92
Ilustración 48. Validación del voltaje que produce el prototipo. ....	93
Ilustración 49. Evidencia de los amperios que produce el prototipo. ....	94
Ilustración 50. La batería utilizada para realizar las pruebas. ....	94

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Lista de requerimientos.....	41
Tabla 2. Tabla de posibles soluciones de diseño.....	44
Tabla 3. Solución del diseño conceptual 1.....	45
Tabla 4. Solución del diseño conceptual 2.....	48
Tabla 5. Solución del diseño conceptual 3.....	51
Tabla 6. Tabla de parámetros y porcentajes.....	54
Tabla 7. Tabla de resultados de la evaluación de los diseños conceptuales.....	55
Tabla 8. Lista de símbolos.....	56
Tabla 9. Parámetros iniciales para la elaboración de los cálculos.....	57
Tabla 10. Lista de materiales.....	75

# 1 RESUMEN

## RESUMEN GENERAL DE TRABAJO DE GRADO

**TITULO:** Construcción de un tornillo hidrodinámico para la generación de energía eléctrica para una cerca en la vereda de sabaneta del municipio de sabana de torres, Santander.

**AUTOR(ES):** William Mauricio Ordoñez Garcia  
Juan Lizardo Prada Mantilla

**PROGRAMA:** Facultad de Ingeniería Mecánica

**DIRECTOR(A):** Sergio Andrés Gómez Suarez

## RESUMEN

El tornillo de Arquímedes o hidrotornillo representa un sinfín de aplicaciones hoy en día, su método simple y su alta eficiencia para mover líquidos y partículas sólidas permite su uso como transportador y dosificador, elemento de transmisión, bomba de tornillo y, generación de energía eléctrica. La aplicación del tornillo de Arquímedes para este proyecto se presenta como la necesidad que tiene el país por explotar recursos hídricos a pequeña escala, pequeños ríos o canales de regadío con saltos de agua menores. Pretendiendo así, disminuir las consecuencias medioambientales negativas que representa el uso indiscriminado de las grandes centrales hidroeléctricas. Dentro de las pautas iniciales importantes para la elaboración de este proyecto, debe realizarse un estudio de la viabilidad técnica y económica, dentro de la viabilidad técnica, se abordarán análisis topográficos e hidrográficos, así como, condiciones iniciales de funcionamiento incluyendo parámetros básicos como caudal y altura de cabeza requeridos por el tornillo.

## PALABRAS CLAVE:

Hidrotornillo, Tornillo de Arquímedes, Centrales hidroeléctricas, Caudal, Cabeza de altura

V° B° DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO

## **ABSTRACT**

### **GENERAL SUMMARY OF WORK OF GRADE**

**TITLE:** Construction of a hydraulic screw to generate electricity for a fence in a community called Sabaneta in Sabana de Torres, Santander

**AUTHOR(S):** William Mauricio Ordoñez Garcia  
Juan Lizardo Prada Mantilla

**FACULTY:** Facultad de Ingeniería Mecánica

**DIRECTOR:** Sergio Andrés Gómez Suarez

### **ABSTRACT**

The Archimedean screw or hydraulic screw represents endless applications today, the simplicity and the high efficiency to move liquids and solid particles, gives the possibility to be used as a conveyor and dispenser, a power transfer device, a screw pump, and an electricity generator. This project uses the Archimedean screw as a solution to the problem that the country must exploit water resources on a small scale, such as: small rivers or irrigation canals with smaller waterfalls. Consequently, it is intended to reduce the negative environmental impact caused by using large hydroelectric plants. For the development of this project there are guidelines established, starting with a study of the technical and economic viability, within the technical viability, topographic and hydrographic studies will be addressed, as well as initial operating conditions including basic parameters such as flow and lift required by the screw.

### **KEYWORDS:**

Hydroscrew, Archimedean screw, Hydroelectric plants, flow, lift

**V° B° DIRECTOR OF GRADUATE WORK**

## 2 INTRODUCCIÓN

En la actualidad el desarrollo de energía eléctrica por medio de la hidráulica es la fuente de obtención de energía más grande Colombia.

Para el 2018 el 66% de la producción energética en el país depende de la energía hidráulica, esto corresponde a una capacidad efectiva neta del SIN (Sistema interconectado nacional) de aproximadamente 10 974 MW.

Esta producción de energía proviene de proyectos de gran envergadura, es decir proyectos del orden de cientos de megavatios, y si bien en los últimos años se ha invertido en el desarrollo de muchas pequeñas centrales eléctricas, las cuales producen entre 1 MW hasta 5 MW, que hasta el 2018 solo proveía un 4.96% de la capacidad efectiva neta del SIN, con una producción de 859,069 MW.

Y es aquí donde se genera una duda, ¿Qué tan desarrollada esta producción de micro generación hidráulica en Colombia?, la cual está en el orden de producción desde 1 Kw hasta 50 kW, investigando un poco se encontró que son muy pocos los proyectos de este tipo que funcionan actualmente en el país.

Debido al bajo uso de proyectos de micro generación de energía hidráulica y al alto potencial que tienen, se decidió tomar a este como tema para el desarrollo de este proyecto de grado.

Ahora bien, surge otra duda, ¿Qué tipo de turbina o tecnología se puede utilizar para desarrollar este proyecto?, para resolver esta duda se consultaron los diferentes tipos de tecnologías implementados para la micro generación de energía hidroeléctrica y se encontraron turbias como la turgo, turbinas tipo bulbo, turbinas de hélices las cuales son muy similares a las turbinas Kaplan, pero la que realmente llamó la atención fue el tornillo de Arquímedes debido que puede producir energía con bajo caudal y baja cabeza, es de un desarrollo y un diseño en teoría bastante simple, las cuales son características muy importantes para el proyecto debido a que al momento de ser comercializado las limitantes serán muy mínimas.

### 3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Colombia el 96.67% de la población cuenta con energía eléctrica y el 3.33% no cuenta con conexiones oficiales [1].

Sin embargo a pesar de que la mayoría del territorio Colombiano cuenta ya con conexiones eléctricas esto no asegura que llegue correctamente a los diferentes municipios, como es el caso de la vereda Sabaneta del municipio de Sabana de torres, Santander, en la cual uno de los problemas más frecuentes y que afectan la calidad de vida de los habitantes es la mala calidad del servicio energético, lo cortes ininterrumpidos de la energía y en algunos casos la ausencia del servicio en su totalidad, lo que conlleva a daños de electrodomésticos, déficit en otros servicios como el agua y que sus habitantes en búsqueda de soluciones compren implementos como generadores a combustible fósil, lámparas de queroseno, etc. los cuales son máquinas altamente contaminantes tanto para el medio ambiente como para el ecosistema de la región.

## 4 ANTECEDENTES.

En el año 2013 Manuel Esteban Madrid y Juan Manuel Toro, estudiantes de ingeniería civil de la Escuela de ingenieros de Antioquia, hicieron un proyecto basado en la viabilidad técnica y económica de los hidrotornillos para generar energía eléctrica cuyos resultados fueron bastante favorables, tanto en la parte del diseño como en el factor económico, dando un costo menor y una eficiencia mayor con respecto a sus competidores en el mercado [2].

En el año de 2018 la comunidad de Miravalle, Cauca. conformada en su mayoría por excombatientes de las Farc que se acogieron al proceso de desmovilización, debido a la falta de energía eléctrica decidieron construir un hidrotornillo del cual estaba a cargo de su diseño el huilense Raphael Armando Plazas quien es ingeniero electrónico especialista en sistemas fotovoltaicos, y en asociación con su amigo Iván Joya quien es el gerente de la empresa Ged sas, desarrollaron el primer hidrotornillo de fabricación 100% latinoamericano [3].

En el año 2019 estudiantes de la universidad de Bu-ali sina, en Hamedan Irán realizaron un proyecto en el cual se buscaba la optimización de una turbina de tornillo de Arquímedes, el modelo es sometido a pruebas con el sistema MATLAB para verificar su rendimiento teórico los resultados que obtuvieron con el mejoramiento del diseño fueron favorables ya que obtuvieron una eficiencia del 90.83%, para un tornillo el cual tiene una longitud de 6m, un ángulo de inclinación de 20°, y basado en esto se puede decir que el modelo que ellos utilizaron se puede implementar sin tener muchos cambios en la hidráulica del sistema [4].

En el año 2019 el departamento de ingeniería mecánica de la universidad de Syiah Kuala de Indonesia presento un proyecto en cual se estudió el rendimiento de las turbinas de tornillo de Arquímedes utilizando una transmisión de engranajes, las pruebas se realizaron con dos caudales diferentes uno de 0.05 m<sup>3</sup>/s y 0.0375 m<sup>3</sup>/s, los resultados fueron favorables ya que con la ayuda de la trasmisión se pudo elevar la velocidad de rotación pasando de 236 rpm que consigue el tornillo con el caudal, a 567.46 rpm en las mejores condiciones obtenidas, lo cual les permitió confirmar que si es óptima la utilización de la transmisión [5].

## 5 JUSTIFICACIÓN

Es de gran importancia para las comunidades rurales contar con nuevas alternativas de energías sostenibles que les permita un flujo constante de energía, a un costo menor que el actual y con menor impacto ambiental; logrando con ello, mejor calidad de vida mediante una solución viable al alcance de su presupuesto, para darle solución a esta problemática se decidió diseñar y construir un prototipo de tornillo hidrodinámico que satisfaga las necesidades de la población en cuanto a economía y la calidad de la energía.

Adicionalmente debido a la ubicación geográfica, las distancias entre las diferentes veredas y específicamente entre la vereda sabaneta y la cabecera municipal de Sabana de Torres, incide en que el costo del servicio de energía sea más alto comparativamente con otras zonas del País, acompañado de fallas en el servicio y la cobertura para fincas del área rural justificando la realización del presente proyecto.

## 6 OBJETIVOS

### 6.1 OBJETIVO GENERAL

- Construir un prototipo de tornillo hidrodinámico basados en el principio de Arquímedes para generar energía eléctrica a una cerca de una finca en zona rural de la vereda sabaneta en el municipio de Sabana de torres, Santander.

### 6.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

- ✓ Identificar los parámetros y requerimientos de diseño que se deben tener en cuenta para la fabricación del tornillo hidrodinámico según técnica árbol de objetivos y análisis de funciones.

**Indicador:** Mínimo cuatro características, funciones o requerimientos para el tornillo según árbol de objetivo y diagrama de funciones de la máquina.

**Resultado:** Características, funciones y requerimientos para el diseño del tornillo.

- ✓ Establecer el diseño conceptual del tornillo hidrodinámico teniendo en cuenta los parámetros y requerimientos.

**Indicador:** Elección del diseño conceptual según método de diagrama morfolico y evaluación de criterios de afectación.

**Resultado:** Esquema conceptual de solución en software CAD

- ✓ Seleccionar los componentes mecánicos, componentes eléctricos, materiales y las dimensiones para la fabricación del tornillo por medio de cálculos numéricos y el uso de software CAD.

**Indicador:** Planos de detalles, materiales, lista de componentes para tornillo con generación mínima de 4 kW.

**Resultado:** Planos de detalle, lista de componentes, materiales, fases de fabricación.

- ✓ Construir el tornillo hidrodinámico por medio de procesos metalmecánicos para la proveer energía eléctrica a un sistema de cercas ubicados en una finca en la vereda sabaneta del municipio de sabana de torres, Santander.

**Indicador:** Tornillo hidrodinámico que genere una potencia mínima de 4 kW.

**Resultado:** Tornillo fabricado, pruebas de generación.

## 7 MARCO TEORICO

### 7.1 PRINCIPIO DE ARQUIMEDES

#### 7.1.1 Principio de Arquímedes

El principio de Arquímedes es un principio físico que afirma que “todo cuerpo total o parcialmente sumergido en un fluido experimenta un empuje vertical y hacia arriba igual al peso de fluido desalojado”, esta fuerza recibe el nombre de empuje hidrostático y su unidad de medida son Newtons (N) [6].

$$E = Pe.V = pf.g.V$$

Ecuación 1. Empuje hidrostático.

Donde:

E = Empuje [N].

Pe = Peso específico del fluido [N/m<sup>3</sup>].

V = Volumen del fluido desplazado.

pf = Densidad del fluido.

g = Gravedad.

#### 7.1.2 Empuje.

El empuje es una fuerza de acción que pertenece a la tercera ley de Newton. Consiste en que cuando un cuerpo es acelerado en una dirección o en un sentido fijo, dicho cuerpo causara otra fuerza sobre el sistema de igual magnitud, en la misma dirección, pero en el sentido contrario [7].

### 7.1.3 Peso específico de un fluido.

El peso específico se puede definir como el peso por unidad de volumen y se obtiene al dividir del peso de un de un sistema sobre el volumen de que ocupa. Su símbolo es la letra griega Gamma ( $\gamma$ ) y su unidad de medida son los newtons por metro cubico [ $N/m^3$ ] [8].

$$\gamma = \frac{w}{V} = \frac{m \cdot g}{V}$$

Ecuación 2. Peso específico.

Donde:

$\gamma$  = Peso específico.

w = Peso de la sustancia

V= Volumen

m = Masa

g = Aceleración de la gravedad.

### 7.1.4 Volumen de un fluido.

Se conoce como volumen a la magnitud de espacio que ocupa un cuerpo. La unidad de medida que se utiliza para el volumen en el Sistema Internacional de Unidades es el metro cúbico [ $m^3$ ] y la unidad más común es el litro [L] [9].

$$V = \frac{m}{\rho}$$

Ecuación 3. Volumen.

Donde:

V= Volumen

m= Masa del cuerpo

$\rho$ = Densidad del cuerpo

### 7.1.5 Densidad de un fluido.

Se define como densidad a la masa de un cuerpo por unidad de volumen. Su unidad de medida son los kilogramos por metro cubico [Kg/m<sup>3</sup>].

La densidad para un fluido homogéneo no varía de un punto a otro [10]. Su ecuación es:

$$\rho = \frac{V}{m}$$

Ecuación 4. Densidad.

Donde:

$\rho$ = Densidad del fluido

V= Volumen del fluido

m= Masa

### 7.1.6 Gravedad.

La gravedad es la fuerza de atracción entre dos o más cuerpos. Uno de los efectos principales de la gravedad es hacer desacelerar cualquier cuerpo que sea lanzado hacia arriba, su unidad de medida al ser una aceleración es metros por segundo al cuadrado [m/s<sup>2</sup>] y el valor de la gravedad en la tierra es de 9,81 m/s<sup>2</sup> [11].

## **7.2 TORNILLO DE ARQUIMEDES**

### **7.2.1 Definición de tornillo de Arquímedes**

Un tornillo de Arquímedes es una máquina gravimétrica helicoidal creada en el siglo III a.C. por Arquímedes, la cual era utilizada en el antiguo Egipto para la elevación de agua, harina, cereales o material excavado. Su funcionamiento es simple, consta de un cilindro hueco, situado sobre un plano inclinado, que permite elevar el cuerpo o fluido situado por debajo del eje de giro. También es llamado tornillo sin fin por su circuito infinito [12].

### **7.2.2 Usos que tiene un tornillo de Arquímedes**

En la actualidad su uso principal es en la agricultura para los sistemas de regadío, además jugo un papel importante en la recuperación de tierra en los Países Bajos [13].

En el año 2001 el ingeniero de suelos Jhon Burland utilizo un tornillo de Arquímedes para estabilizar la torre de Pisa. Se retiraron pequeñas cantidades de subsuelo saturado de agua por debajo de la parte norte de la torre. De esta forma se corrigió su inclinación [13].

Otro uso muy importante del tornillo de Arquímedes es en plantas de tratamiento de aguas residuales, donde deben lidiar con diferentes tasas de flujo y con sólidos en suspensión. También se encuentra este principio aplicado en las piscifactorías, donde los usan para levantar los peces de forma segura y transportarlos a otro sitio. De este modo se evita la manipulación física de los peces [13].

### **7.2.3 Variantes del tornillo de Arquímedes**

Existe una variante del tornillo de Arquímedes, la cual consiste en un proceso inverso a los ya mencionados en los puntos anterior donde el agua se vierte por la parte superior del tornillo, haciéndolo girar y obteniendo energía haciendo que el tornillo accione un generador eléctrico. Existen muchas centrales que utilizan este método, los cuales son Sttle Hydro e Hydro Torrs, dos proyectos micro eléctricos que están operando en Inglaterra [13].

## **7.3 ENERGIA RENOVABLE**

### **7.3.1 Definición de energías renovables**

Las energías renovables son tipo de energías que se pueden obtener a partir de fuentes naturales y se caracterizan por ser no contaminantes o de bajo impacto negativo sobre el medio ambiente. Por ejemplo, la energía solar, la energía eólica o la energía mareomotriz son fuentes renovables de energía. También se puede considerar como energía renovable a todas aquellas que se obtienen de fuentes que se regeneran con el tiempo de manera natural, como la masa forestal.

Una de las principales ventajas de las energías renovables es que son inagotables, esto quiere decir que los recursos de los cuales se obtienen este tipo de energías no se acaban, siempre van a estar presentes en el entorno [14].

### **7.3.2 Energía hidráulica.**

La energía hidroeléctrica o hidráulica es el tipo de energía renovable más conocido y se caracteriza por utilizar la fuerza y el movimiento del agua para producir energía eléctrica y su aplicación más conocida es en las grandes centrales hidroeléctricas [15]

### **7.3.2.1 Generación de energía hidráulica a micro escala.**

El término “Micro hidro” o “Escala Micro” es el término utilizado para las instalaciones de energía hidroeléctrica que producen hasta 100 kW de potencia. Este tipo de instalaciones pueden proveer energía a una vivienda, a una población pequeña o empresas o plantas de menor tamaño. En la actualidad estas instalaciones se pueden encontrar presentes en todo el mundo, debido a que es una forma económica de producir energía sin necesidad de comprar combustible y contaminar el ambiente [16].

## **7.4 TEORÍA DE LOS CÁLCULOS DEL TORNILLO**

Para las fórmulas de los cálculos se basaron en el proyecto de grado de Julio Cesar Alberto Mejía llamado “Diseño de una turbina hidráulica basada en el tornillo de Arquímedes”, debido a que se trata del mismo concepto de generación de energía con este proyecto [17].

### **7.4.1. Avance del tornillo**

El avance de un tornillo hace referencia a la distancia que avanza un tornillo al dar una revolución completa y se denomina con la letra **P** y su fórmula está dada de la siguiente manera:

$$P = P_x * N_h$$

Donde:

P = es el valor del avance del tonillo

Px = Paso del tornillo

Nh = Numero de hilos

#### 7.4.2. Angulo exterior de la hélice

Es el ángulo formado entre el plano perpendicular al eje del tornillo y la parte externa de las aspas de la hélice y la fórmula para calcularlo es la siguiente:

$$\alpha = \text{Arctan} \left( \frac{\pi * \emptyset 2}{P} \right)$$

Donde:

$\alpha$  = Es el Angulo exterior de la hélice.

$\emptyset 2$  = Diámetro del eje de la hélice.

P = Avance del tornillo

#### 7.4.3. Angulo exterior de la hélice

Es el ángulo formado entre el plano perpendicular al eje del tornillo y la parte interna de las aspas de la hélice y la fórmula para calcularlo es la siguiente:

$$\beta = \text{Arctan} \left( \frac{\pi * \emptyset 3}{P} \right)$$

Donde:

$\beta$  = Angulo exterior de la hélice.

$\emptyset 3$  = Diámetro exterior de la hélice.

P = Avance del tornillo.

#### 7.4.4 Área de contacto con el agua

Es el área máxima que se encuentra en contacto el agua con las aspas del tornillo para que este pueda girar adecuadamente. Su fórmula es:

$$A = 1/2 (\pi / 4 * (\emptyset 3)^2 - \pi / 4 * (\emptyset 2)^2)$$

Donde:

A = es el área de contacto con el agua.

$\emptyset 2$  = Diámetro del eje de la hélice.

$\emptyset 3$  = Diámetro exterior de la hélice.

#### **7.4.5. Salto del agua (Altura)**

Es la distancia que hay entre los puntos donde ingresa el agua y donde desemboca el agua con respecto al seno del ángulo de caída del tornillo y está dado por la siguiente fórmula:

$$H = L_e * \text{Sen}(\Theta)$$

Donde:

H = es la altura de caída del agua.

$L_e$  = es la longitud del tornillo.

$\Theta$  = Angulo de caída del tornillo.

#### **7.4.6. Fuerza de empuje en dirección al plano Axial**

Es la fuerza de empuje que ejerce el agua al tornillo con respecto al plano axial. Su fórmula es:

$$F_x = \rho * g * A * P_x * \text{Sen}(\Theta)$$

Donde:

$F_x$  = Fuerza de empuje en dirección al plano Axial.

$\rho$  = La densidad del agua.

$g$  = El valor de la gravedad

A = es el área de contacto con el agua.

$P_x$  = Paso del tornillo.

$\Theta$  = Angulo de caída del tornillo.

#### 7.4.7 Fuerza de empuje en dirección al plano tangencial

Es la fuerza de empuje que ejerce el agua al tornillo con respecto al plano tangencial. Su fórmula es:

$$F_z = \rho * g * A * P_x * \text{Sen}(\Theta) * \text{Tan}(\alpha)$$

Donde:

$F_z$  = Fuerza de empuje en dirección al plano tangencial.

$\rho$  = La densidad del agua.

$g$  = El valor de la gravedad

$A$  = es el área de contacto con el agua.

$P_x$  = Paso del tornillo.

$\Theta$  = Angulo de caída del tornillo.

$\alpha$  = Es el Angulo exterior de la hélice.

#### 7.4.8 Centroide ( $Y_c$ )

El centroide es el punto donde coinciden los hiperplanos que dividen una figura en puntos iguales, y en el caso para el caso específico del tornillo hidrodinámico es el punto donde se ejerce el torque, y la fórmula para calcularlo es la siguiente:

$$Y_c = \frac{\sum Area * Y_c}{\sum Area}$$

Donde:

$Y_c$  = Es el valor del centroide.

$\sum Area$  = El valor de la sumatoria del área total del tornillo.

### 7.4.9 Torque en el tornillo

Es el esfuerzo de torción al cual se encuentra sometido el tornillo y se expresa con la siguiente formula:

$$T = \rho * g * Le * A * \text{Sen} (\Theta) * \text{Tan} (\alpha) * Yc$$

Donde:

T = El torque en el tornillo.

$\rho$  = La densidad del agua.

g = El valor de la gravedad.

Le = es la longitud del tornillo.

A = es el área de contacto con el agua.

$\Theta$  = Angulo de caída del tornillo.

$\alpha$  = Es el Angulo exterior de la hélice.

Yc = Es el valor del centroide.

### 7.4.10 Caudal en el tornillo

Es el volumen de agua que pasa por el tornillo y está definido con la siguiente formula:

$$Q = 1.8 (D * 0.2R) * R^{1.5}$$

Donde:

Q = El caudal.

D = Diámetro del canal

R = Radio del canal

#### 7.4.11 Velocidad angular del tornillo.

Es la velocidad de rotación a la cual gira el tornillo y su fórmula es:

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

Donde:

$\dot{\omega}$  = Velocidad angular.

Q = El caudal en el tornillo.

$\alpha$  = Es el Angulo exterior de la hélice.

A = es el área de contacto con el agua.

Yc = Es el valor del centroide.

#### 7.4.12 Potencia Teórica

Es la potencia que ideal que se debería obtener del tornillo hidrodinámico sin tener en cuenta las pérdidas y está dada por la siguiente formula:

$$\text{Pot} = T * \dot{\omega}$$

Donde:

Pot = Es la potencia teórica.

T = Es el torque.

$\dot{\omega}$  = Velocidad angular.

#### 7.4.13 Eficiencia

Es la energía que se invierte realmente en el proceso en comparación con la energía que se obtiene de la potencia teórica y su fórmula es:

$$\dot{\eta} = \left( \frac{2Nh+1}{2Nh+2} \right) * \left( \frac{1-0.01125*D^2}{Q} \right)$$

Donde:

$\dot{\eta}$  = Eficiencia.

Nh = Numero de hilos.

D = Diámetro del canal.

Q = El caudal en el tornillo.

#### **7.4.14 Potencia en el eje de transmisión**

Es la potencia real que se transmite al eje que se conecta con el sistema de transmisión y su fórmula es:

$$Peje = \eta * Pot$$

Donde:

Peje = Potencia en el eje de transmisión.

$\eta$  = Eficiencia.

Pot = Es la potencia teórica en el tornillo.

## **8 ALCANCE**

El proyecto entrega un prototipo funcional de un tornillo hidrodinámico, al cual se le validó su funcionamiento por medio de una prueba que verificó la capacidad del prototipo para generar energía eléctrica, el cual se deja disponible para conectarse a un sistema de cercas en una finca ubicada en la vereda de Sabaneta de municipio de Sabana de Torres, Santander.

No se realizó instalación al sistema de cercas eléctricas por parte de los estudiantes, dicha instalación queda a cargo de los dueños de la finca.

Debido a la situación actual de pandemia y el cierre parcial de la universidad, la fabricación del prototipo de tornillo hidrodinámico se realizó en los talleres de la empresa Sociedad de Yesos Prada Ltda. ubicados en el barrio nuevo Sotomayor en la ciudad de Bucaramanga y adicionalmente en los talleres de la empresa Palmares el Portico S.A.S, ubicados en la vereda de Sabaneta de municipio de Sabana de Torres, Santander.

## **9 METODOLOGÍA**

Para cumplir los objetivos del proyecto se realizó una serie de actividades, las cuales se presentarán de forma general a continuación:

### **9.1. ESTADO DEL ARTE**

**9.1.1.** Se realizaron investigaciones sobre tornillos de Arquímedes para la generación de energía eléctrica.

**9.1.2** Investigación de materiales y procesos de fabricación para la elaboración del tornillo hidrodinámico.

**9.1.3** Búsqueda de tornillos hidrodinámicos que se encuentran en el mercado.

**9.1.4** Búsqueda de las características de las fuentes hídricas donde se instalará

**9.1.5** Identificación de los parámetros de diseño

### **9.2. DISEÑO DEL PROTIPO DE TORNILLO HIDRODINÁMICO**

**9.2.1** Establecimiento del diseño conceptual con la evaluación de los parámetros de diseño.

**9.2.2** Se realizó el diseño y modelamiento virtual del prototipo de tornillo hidrodinámico en el software CAD SolidWorks.

**9.2.2** Análisis de materiales que se requirieron para la elaboración del tornillo hidrodinámico y su estructura.

**9.2.3** Cálculos de las dimensiones del tornillo hidrodinámico y sus componentes para obtener la potencia y viabilidad técnica del proyecto.

### **9.3. FABRICACIÓN DEL PROTOTIPO DE TORNILLO HIDRODINÁMICO**

**9.3.1** Se procedió a realizar la fabricación del prototipo funcional del tornillo hidrodinámico.

### **9.4 INSTALACIÓN DEL PROTOTIPO DE TORNILLO HIDRODINÁMICO**

**9.4.1** Se procedió a realizar la instalación del prototipo de tornillo hidrodinámico en la quebrada Peralonso ubicada en zona rural de la vereda de sabaneta en el municipio de sabana de torres, Santander para hacer pruebas.

### **9.5 VALIDACION DEL PROTOTIPO DE TORNILLO HIDRODINÁMICO**

**9.5.1** Se realizaron pruebas que validaron el funcionamiento del prototipo adecuado del tornillo hidrodinámico.

## **10 IDENTIFICAR LOS PARÁMETROS Y REQUERIMIENTOS DE DISEÑO QUE SE DEBEN TENER EN CUENTA PARA LA FABRICACIÓN DEL TORNILLO HIDRODINÁMICO**

Para lograr identificar las principales características para el diseño y la elaboración del prototipo de tornillo hidrodinámico se utilizaron los siguientes métodos de diseño de productos:

- Método de árbol de objetivos (Clarificación de objetivos)
- Método de diagrama de funciones (Establecimiento de funciones)
- Lista de requerimientos (Fijación de requerimientos)

### **10.1 RESTRICCIONES Y LIMITACIONES**

- Ambientales: Al ser un proyecto con enfoque en energías renovables, el diseño deberá ser lo más amigable con el medio ambiente y su huella de carbono será lo más mínima posible.
- Tamaño: Las dimensiones del diseño no debería exceder los 3 metros de largo y 1.70 metros de ancho debido al que el espacio donde se ubicara el prototipo no permite exceder dichas medidas.
- Económica: El proyecto al ser de uso académico y no industrial, se debe evitar el exceso en los costos para no tener inconvenientes al momento de la fabricación del prototipo.
- Materiales: En el diseño se debe contemplar el uso de materiales económicos y de fácil adquisición, principalmente por si a futuro alguna pieza llega a fallar no sea costosa y no dure mucho tiempo en ser reemplazada.

- Diseño: El diseño se basará en la sencillez mecánica con el fin de que los tiempos de mantenimiento sean lo más cortos posibles y labor pueda ser realizada por una persona con conocimientos básicos en mecánica

## **10.2 ARBOL DE OBJETIVOS**

El árbol de objetivos es una herramienta que permite desglosar de un objetivo principal en una serie de objetivos más concretos los cuales ayudan a fijar unos criterios evaluativos con el fin de poder cumplir de manera acertada dicho objetivo principal.

Ya teniendo este concepto claro, se procede a utilizar la técnica de lluvia de ideas para plantear las posibles exigencias que deba cumplir el prototipo para que funcione de manera óptima.

Las exigencias para el prototipo obtenidas en la lluvia de ideas son:

- Tamaño compacto
- Fácil de usar
- Brindarle energía a un impulsor de cerca eléctrica
- Fácil mantenimiento
- Amigable con el medio ambiente
- Fácil instalación
- Resistente a la corrosión
- Arme y desarme sencillo
- Operaciones de larga duración
- Seguro con la fauna
- Huella de carbono mínima

- Convertir energía hidráulica en energía eléctrica

Basados en la lluvia de idea se obtienen 4 puntos principales que ayudan a definir el enfoque a cumplir con el objetivo del prototipo.

Estos cuatro puntos son:

- Medio ambiental
- Practicidad
- Utilidad
- Durabilidad

En la ilustración # 2 se adjunta el árbol de objetivos realizado por los autores.

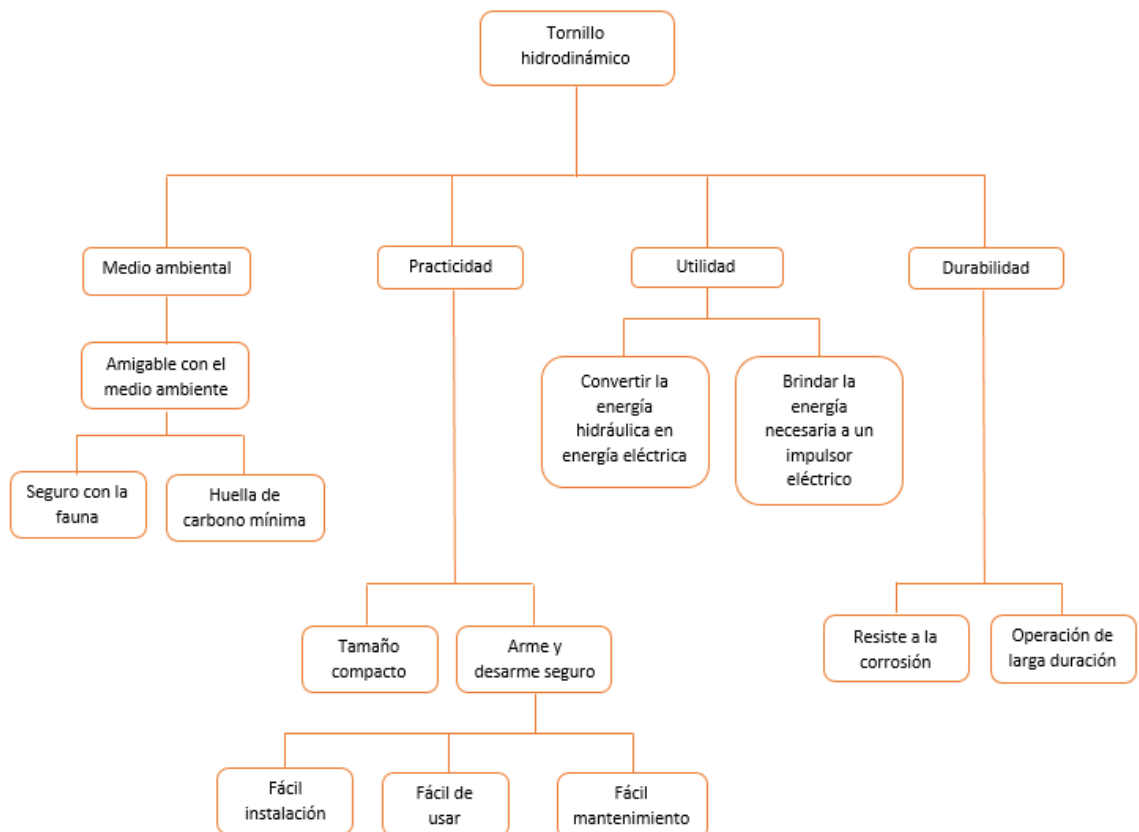


Ilustración 1. Árbol de objetivos

El prototipo de tornillo hidrodinámico cuenta con el factor de ser amigable con el medio ambiental siendo seguro con la fauna y generando una huella de carbono mínima, otro punto a favor con los que cuenta el tamaño compacto, un arme y desarme seguro, siendo fácil de instalar y utilizar lo que conlleva a un fácil mantenimiento y lo hace un prototipo bastante practico. En términos de utilidad el prototipo convierte la energía hidráulica que produce el rio en energía eléctrica necesaria para hacer funcionar un impulsor eléctrico, y, por último, pero no menos importante es el factor de la durabilidad que al juntar los otros puntos a favor con que el prototipo es resistente a la corrosión, puede tener largos periodos de operación sin que presente falla alguna, siempre y cuando se le dé un uso adecuado.

### 10.3 DIAGRAMA DE FUNCIONES

Se plantea un diagrama de funciones para definir las labores que debe cumplir el prototipo de tornillo hidrodinámico para satisfacer su objetivo, el diagrama indica como el prototipo realiza el paso a paso la transformación de energía hidráulica a energía eléctrica.

En la ilustración #3 se puede observar el diagrama con las diferentes entradas y las salidas.



Ilustración 2. Diagrama de funciones

En este punto el agua entra en forma de energía hidráulica la cual hace que el tornillo hidrodinámico se mueva y se pueda transformar ese movimiento en energía eléctrica.

A continuación, la ilustración #4 donde se observa el diagrama de funciones más a detalle donde especifican las funciones paso a paso derivadas de las entradas y que conllevan a las diferentes salidas.

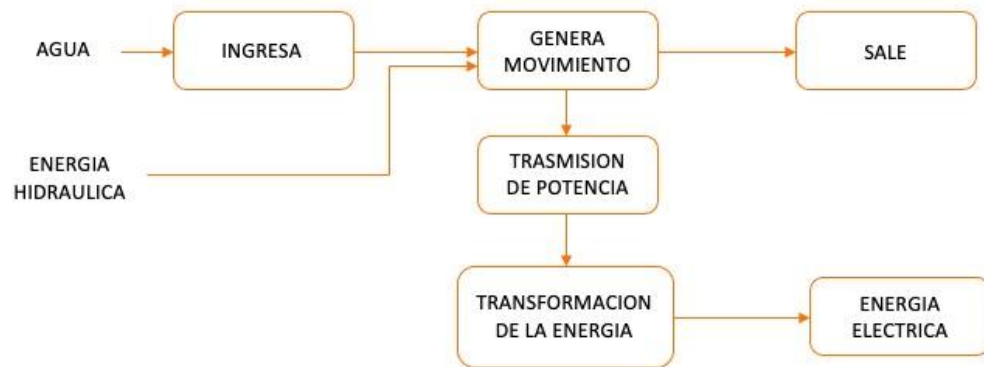


Ilustración 3. Diagrama de funciones detallado

El agua ingresa como energía hidráulica generando movimiento en el tornillo hidrodinámico, mientras el agua sale del canal y retorna al río, el movimiento que produce el tornillo el cual hace girar un sistema de transmisión que van conectadas a un generador que es el encargado de convertir ese momento en energía eléctrica.

#### 10.4 LISTA DE REQUERIMIENTOS

Según los parámetros y/o requerimientos de diseño encontrados en el árbol de objetivos y en el diagrama de funciones, se realiza una lista de requerimientos para compilarlos y enumerarlos en una tabla para hacer más eficiente la búsqueda de dichos parámetros a la hora de realizar el diseño del prototipo de tornillo hidrodinámico. Los requerimientos se definen por restricciones técnicas y a decisión de los autores del presente proyecto junto a su director.

ITEM	REQUERIMIENTO	OBSERVACIONES
1	Tamaño compacto.	Debido a que el prototipo será instalado en un área pequeña, su tamaño no deberá exceder los 3 metros de largo, 1.80 metros de alto y 1.50 metros de ancho según las condiciones del lugar.
2	Fácil de usar.	Su funcionamiento es sencillo debido a que el movimiento del agua realiza todo el trabajo, por lo tanto, no se necesitara un operario para su funcionamiento.
3	Brinda la energía necesaria para un impulsor de cerca eléctrica.	El prototipo debería producir entre 1 y 4 KW de potencia, la cual es la energía necesaria para hacer funcionar un impulsor de cerca eléctrica.
4	Fácil mantenimiento.	Debido a que las piezas han de ser de baja complejidad mecánica, son fáciles de elaborar y de reemplazar en caso de que sea necesario.
5	Amigable con el medio ambiente.	El prototipo será seguro con la fauna, la flora y gracias a lo forma en que producirá la energía, la huella de carbono será mínima.
6	Fácil instalación.	Debido a su tamaño compacto y la sencillez de sus piezas, la instalación del prototipo será sencilla.

7	Resistente a la corrosión.	El prototipo será resistente a la corrosión debido a su constante contacto con el agua.
8	Arme y desarme sencillo.	El prototipo tendrá una forma sencilla la cual hará que su arme y desarme sea fácil.
9	Operaciones de larga duración.	El prototipo estará fabricado con el fin de aguantar largos periodos de trabajo, para poder producir energía constante.
11	Convertir la energía hidráulica en energía eléctrica.	Su función principal será convertir la energía hidráulica producida por el río en energía eléctrica para alimentar un impulsor de cerca eléctrica.

Tabla 1. Lista de requerimientos

Basados en el árbol de problemas y la lista de requerimientos se puede dar solución al primer objetivo específico de este proyecto, encontrando como solución cuatro parámetros principales definidos por la potencia necesaria, por las limitantes del espacio donde será colocado el prototipo y la responsabilidad medio ambiental de este proyecto.

El primer parámetro está basado en la responsabilidad ambiental, el cual debe ser un prototipo seguro con la fauna y la flora, para esto se ubicará en un espacio a la orilla del río donde no estará en contacto con ningún animal y no será necesario modificar el ecosistema para su ubicación e instalación.

El segundo parámetro principal tiene que ver con la practicidad del prototipo el cual para satisfacer dicha condición deberá tener un tamaño compacto para ser ubicado en un espacio pequeño sin ningún problema, su arme y desarme será fácil para que en el momento que los propietarios de la finca deseen reubicarlo no sea un

inconveniente re instalarlo y por último, debido a su tamaño y simplicidad, el mantenimiento será sencillo para evitar altos costos y largos periodos de inhabilidad en este proceso.

El tercer parámetro principal se desarrolla en torno de la utilidad del prototipo, que sea capaz de generar la energía necesaria para hacer funcionar un alternador el cual ira conectado a un sistema de cercas eléctricas que delimitan la finca y evitar que intrusos entre y el ganado se salga.

Y por último el cuarto parámetro que se refiere durabilidad del prototipo el cual deberá trabajar por largos periodos de tiempo y al saber que esta todo el tiempo en contactó con el agua, este deberá ser resistente a la corrosión y tendrá materiales que resistan largos periodos operación para poder satisfacer este parámetro.

## **11. DISEÑO CONCEPTUAL DEL TORNILLO HIDRODINÁMICO**

Para encontrar el diseño óptimo del prototipo de tornillo hidrodinámico que satisfaga las necesidades de tamaño, funcionabilidad y parámetros geográficos como el lugar de ubicación y la quebrada en la cual se va a instalar, se utilizó el método de Cross, el cual se basa en plantear varios diseños los cuales se van descartando a medida que se van incumpliendo los criterios necesarios hasta llegar a la solución óptima.

Basado en los objetivos a cumplir se planteó varios prototipos de cada uno de los mecanismos, los cuales se evaluarán a criterio propio y seleccionándose el diseño más óptimo para el proyecto.

### **11.1 DIAGRAMA MORFOLÓGICO CON POSIBLES SOLUCIONES PARA DISEÑO DEL TORNILLO HIDRODINÁMICO**

El diagrama morfológico es un método de diseño basado en la generación de alternativas con el fin de identificar las combinaciones factibles de soluciones secundarias.

Los mecanismos por evaluar son:

- Admisión de agua
- Mecanismo de generación de movimiento
- Mecanismo de transmisión de potencia
- Mecanismo de transformación de energía

A continuación, en la tabla #2. Se muestran las posibles soluciones de diseño del prototipo de tornillo hidrodinámico.

Funciones		Soluciones	1	2	3
		1	Mecanismo de admisión de agua	Admisión directa desde el río	tubo de PVC
2	Mecanismo de generación de movimiento	Tornillo de Arquímedes de acero inoxidable de 2 hilos	Tornillo de Arquímedes de acero estructural de 1 hilos	Tornillo de Arquímedes de fibra de vidrio de 1 hilo	
3	Mecanismo de transmisión de potencia	Por poleas	Por cadenas	Conectado directamente al tornillo	
4	Mecanismo de transformación de energía	Alternador altas revoluciones	Alternador de bajas revoluciones	Alternador de bajas revoluciones	

Tabla 2. Tabla de posibles soluciones de diseño.

## 11.2 POSIBLES SOLUCIONES DE DISEÑO DEL PROTOTIPO DE TORNILLO HIDRODINAMICO

En este punto se presentan las posibles soluciones de diseño escogidas por los autores, basados en parámetros obtenidos en el árbol de objetivos y en la lista de requerimientos. Las características resaltadas en amarillo en cada tabla son las seleccionadas para dicho diseño.

- Diseño conceptual 1

Soluciones		Funciones		
		1	2	3
1	Mecanismo de admisión de agua	Admisión directa desde el río	tubo de PVC	Manguera agrícola
2	Mecanismo de generación de movimiento	Tornillo de Arquímedes de acero inoxidable de 2 hilos	Tornillo de Arquímedes de acero estructural de 1 hilos	Tornillo de Arquímedes de fibra de vidrio de 1 hilo
3	Mecanismo de transmisión de potencia	Por poleas	Por cadenas	Conectado directamente al tornillo
4	Mecanismo de transformación de energía	Alternador altas revoluciones	Alternador de bajas revoluciones	Alternador de bajas revoluciones

Tabla 3. Solución del diseño conceptual 1

A continuación, en las siguientes ilustraciones se presenta la solución dada al diseño 1.

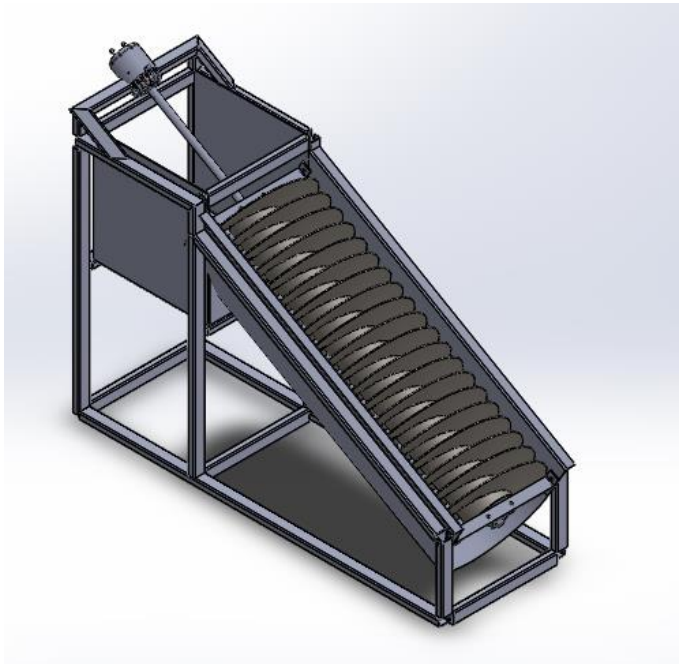


Ilustración 4. Vista isométrica del diseño conceptual 1.

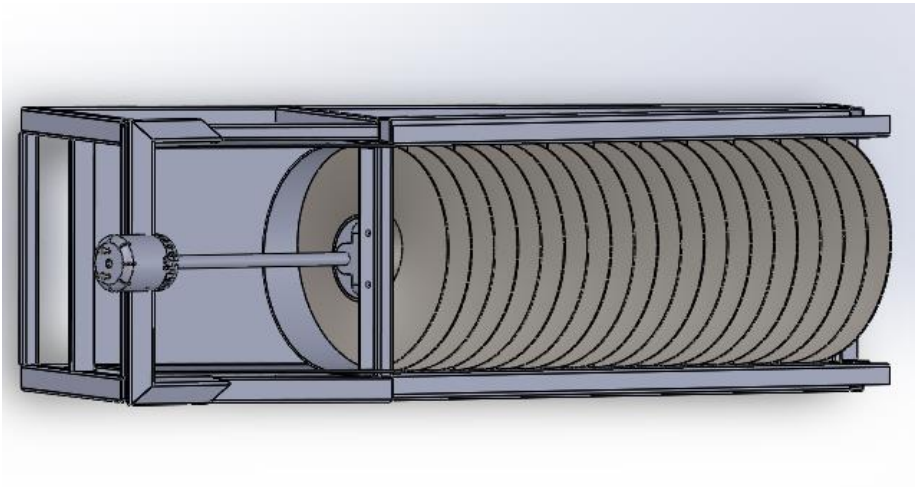


Ilustración 5. Vista superior del diseño conceptual 1

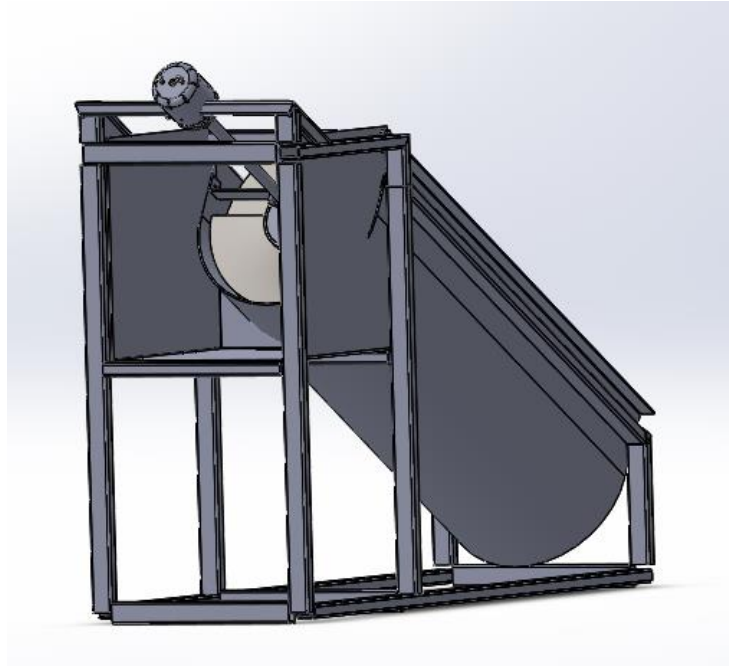


Ilustración 6. Vista posterior del diseño conceptual 1

Como se puede observar en la ilustración #5 el tipo de tornillo que se seleccionó para este diseño fue un tornillo de dos hilos, es decir que cuenta con dos sistemas de hélices para disminuir el paso. En la ilustración #6 la cual muestra la vista superior y el sistema de transmisión de potencia directo desde el eje del tornillo al alternado de bajas revoluciones. Y por último en la ilustración #7 se puede observar que al no tener una tapa posterior el agua entra directamente al tornillo, esto quiere decir que la ubicación del prototipo debe ser directamente en el río, para que el agua fluya a través de él.

- Diseño conceptual 2

Soluciones		Funciones		
		1	2	3
1	Mecanismo de admisión de agua	Admisión directa desde el río	tubo de PVC	Manguera agrícola
2	Mecanismo de generación de movimiento	Tornillo de Arquímedes de acero inoxidable de 2 hilos	Tornillo de Arquímedes de acero estructural de 1 hilos	Tornillo de Arquímedes de fibra de vidrio de 1 hilo
3	Mecanismo de transmisión de potencia	Por poleas	Por cadenas	Conectado directamente al tornillo
4	Mecanismo de transformación de energía	Alternador de altas revoluciones	Alternador bajas revoluciones	Alternador de bajas revoluciones

Tabla 4. Solución del diseño conceptual 2

A continuación, se presentan las ilustraciones que le dan solución al diseño conceptual 2.

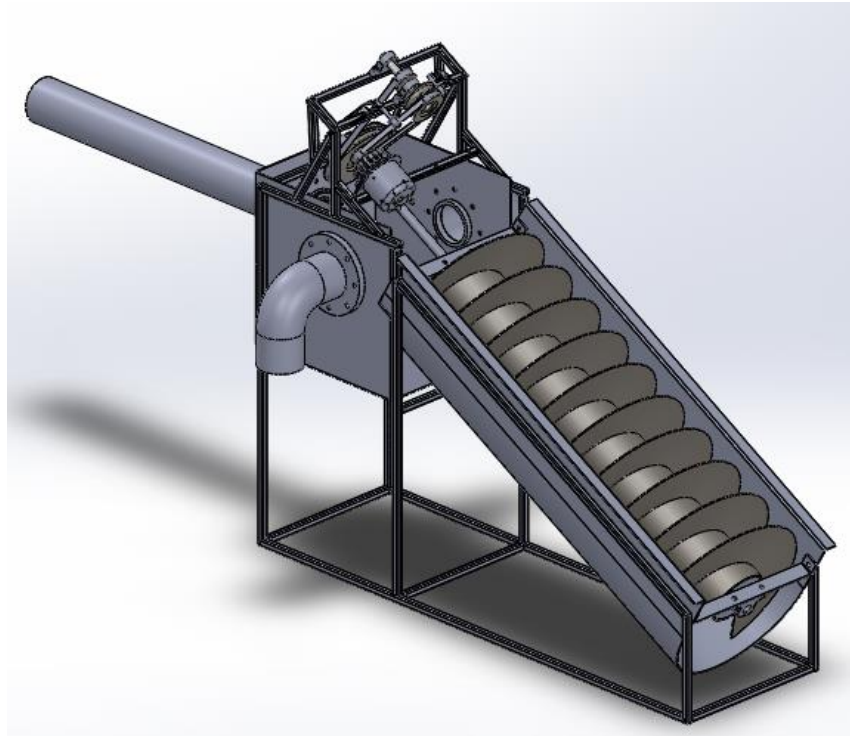


Ilustración 7. Vista isométrica del diseño conceptual 2

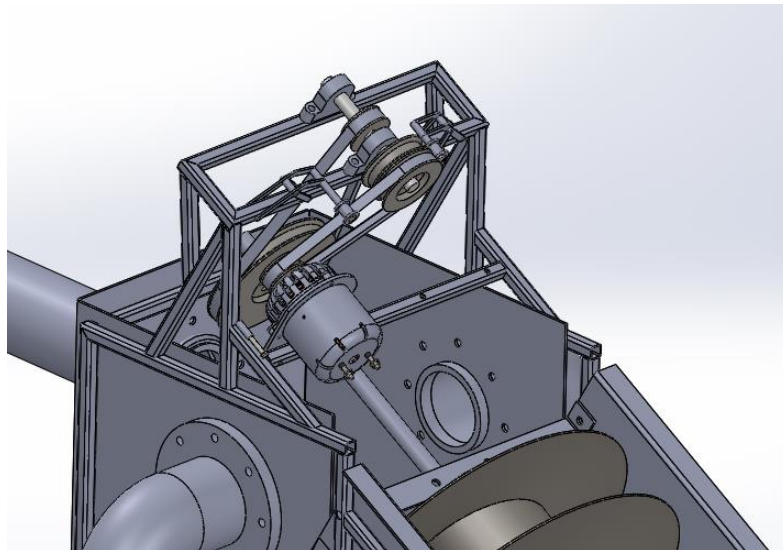


Ilustración 8. Vista específica del sistema de transmisión de potencia del diseño conceptual 2..

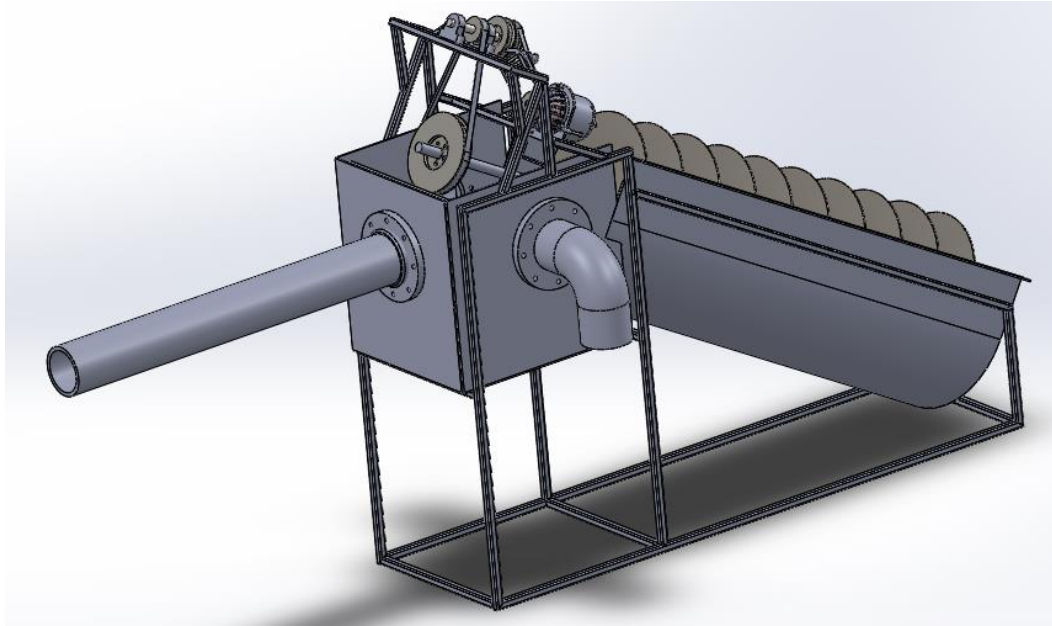


Ilustración 9. Vista posterior del diseño conceptual 2.

En la ilustración #8 se tiene una vista general del prototipo donde se puede observar bien el tipo de tornillo seleccionado para este diseño el cual es un tornillo de un solo hilo que lo cual hace que sea más ligero y practico de construir y de ensamblar. La ilustración #9 es una vista más específica del sistema de transmisión de potencia para poder observar bien el sistema seleccionado que fue por poleas, debido a que variando el tamaño de las poleas se logra aumentar la velocidad de giro que llega al alternador de bajas revoluciones seleccionado para este diseño. Y por último la ilustración #10 que es una vista posterior y hace énfasis en el sistema de admisión del agua el cual seleccionamos que es por medio de un tubo de PVC que permite tener un caudal constante de entrada de agua al prototipo, además en esta ilustración también se observa un sistema de escape de agua lateral el cual funciona en caso de que el tanque se llene hasta cierta altura, evitando que el nivel del agua suba demasiado dentro del prototipo y pueda llegar a causar daños a las poleas, al alternador, incluso llegar a frenar el tornillo.

- Diseño conceptual 3

Soluciones		Funciones		
		1	2	3
1	Mecanismo de admisión de agua	Admisión directa desde el río	tubo de PVC	Manguera agrícola
2	Mecanismo de generación de movimiento	Tornillo de Arquímedes de acero inoxidable de 2 hilos	Tornillo de Arquímedes de acero estructural de 1 hilos	Tornillo de Arquímedes de fibra de vidrio de 1 hilo
3	Mecanismo de transmisión de potencia	Por poleas	Por cadenas	Conectado directamente al tornillo
4	Mecanismo de transformación de energía	Alternador altas revoluciones	Alternador bajas revoluciones	Alternador de bajas revoluciones

Tabla 5. Solución del diseño conceptual 3.

En las siguientes ilustraciones se observa la solución dada al último diseño conceptual, el diseño 3

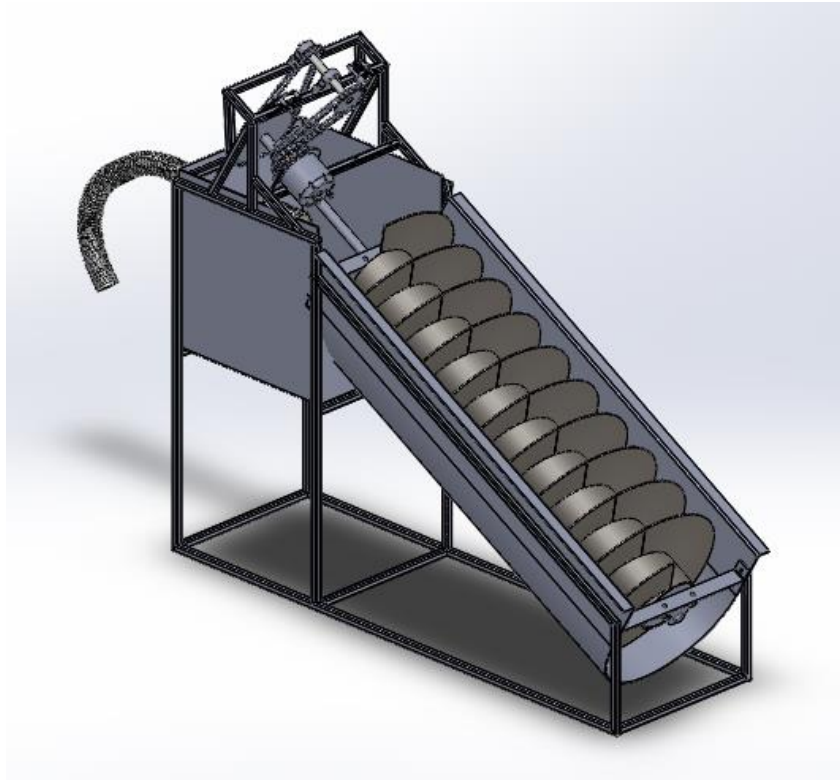


Ilustración 10. Vista isométrica del diseño conceptual 3.

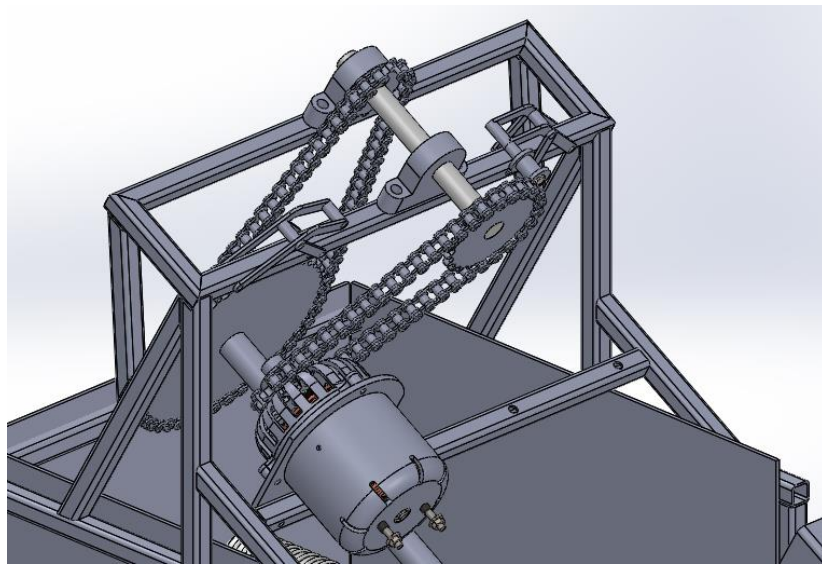


Ilustración 11. Vista específica del sistema de transmisión de potencia del diseño conceptual 3.

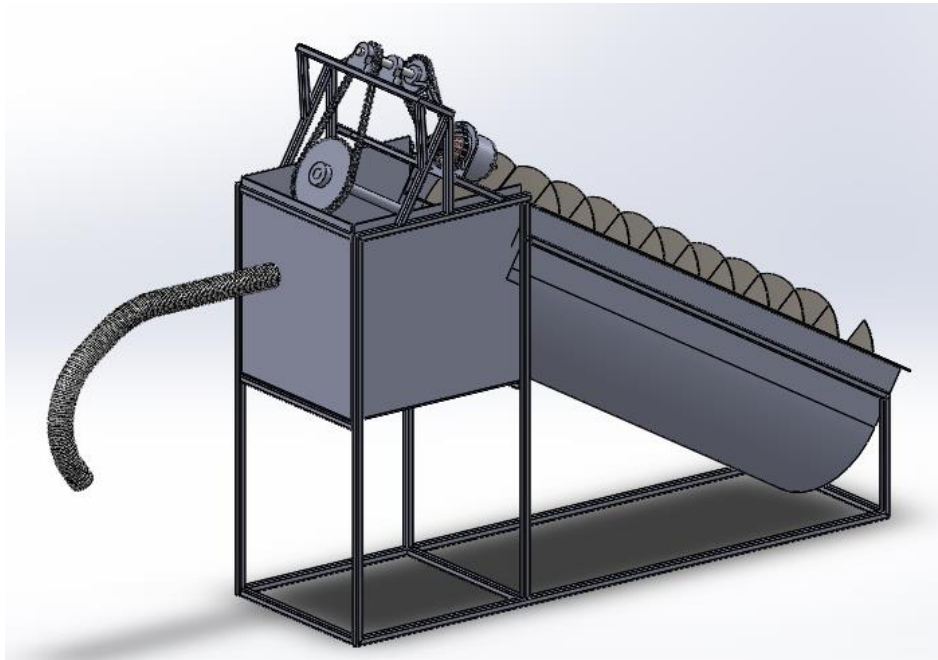


Ilustración 12. Vista posterior del diseño conceptual 3.

En la ilustración #11 se puede observar una vista completa del diseño conceptual 3 en la cual se puede observar el tornillo seccionado el cual es un tornillo de un solo hilo y de acero estructural. En Ilustración #12 se tiene una vista detallada del sistema de transmisión de potencia la cual para este diseño fue por medio de cadenas y que va acoplada a un alternados de altas revoluciones y por último en la Ilustración #13 se tiene una vista posterior en donde se aprecia desde otro ángulo el sistema de transmisión de potencia y observamos también el sistema de admisión por medio de una manguera agrícola.

### 11.3 SELECCIÓN DEL DISEÑO

Para realizar la selección del diseño óptimo que se va a utilizar en el proyecto se evaluaron los distintos diseños conceptuales presentados anteriormente bajo unas condiciones dadas tanto por la tipografía del lugar en el cual será ubicado, el presupuesto que se tiene para el proyecto y eficiencia del prototipo basado en la hidrología del lugar.

Dichos parámetros fueron:

- Costos: se refiere a que tan costoso pueden llegar a ser la fabricación basado en los materiales utilizados y la cantidad de ellos.
- Utilidad: Se refiere a que tan eficaz es el prototipo de producir la energía necesaria para hacer funcionar el generador
- Construcción: Con esto se hace referencia a que tan fácil puede llegar a ser la construcción del prototipo.
- Mantenimiento: Hace referencia a que tan fácil y económico puede llegar a ser hacerle mantenimiento al prototipo.
- Durabilidad: Se refiere a cuánto tiempo pueden a llegar a durar los componentes que conforman del prototipo antes de dañarse.

A continuación, se presenta una tabla con los con los parámetros mencionados anteriormente y con la puntuación que corresponde a cada uno.

PARAMETROS	PORCENTAJE	VARIABLE	PUNTOS
COSTO	20%	Bajo costo	6
		Medianamente costoso	4
		Altamente costoso	2
UTILIDAD	40%	Alta eficacia	6
		mediana eficacia	4
		baja eficacia	2
CONSTRUCCIÓN	10%	Fácil de construir	6
		Medianamente fácil de construir	4
		Difícil de construir	2
MANTENIMIENTO	10%	Fácil de realizar el mantenimiento	6
		Medianamente fácil de realizar el mantenimiento	4
		Difícil de realizar el mantenimiento	2
DURABILIDAD	20%	Larga vida útil	6
		Mediana vida útil	4
		Baja vida útil	2

Tabla 6. Tabla de parámetros y porcentajes.

En la siguiente tabla se presentarán los diferentes diseños conceptuales ya evaluados bajo los parámetros presentados en la tabla anterior.

PARAMETROS	VALOR	DISEÑO 1		DISEÑO 2		DISEÑO 3	
		PUNTUACIÓN	VALOR	PUNTUACIÓN	VALOR	PUNTUACIÓN	VALOR
Costo	20	4	80	6	120	2	80
Utilidad	40	4	160	6	240	6	240
Construcción	10	6	60	4	40	4	40
Mantenimiento	10	6	60	6	60	4	40
Durabilidad	20	4	40	6	120	4	80
Total	100		440		580		440

Tabla 7. Tabla de resultados de la evaluación de los diseños conceptuales.

Basándose en los resultados obtenidos en la tabla anterior se puede decir que el diseño más óptimo para el proyecto es el diseño conceptual 2 que fue el que obtuvo una mayor puntuación debido a que su costo de fabricación es el más bajo, su utilidad a la hora de producir la energía necesaria para hacer funcionar el generador es alta, su mantenimiento es fácil de realizar, y sus componentes tienen una larga vida útil.

## 12 CÁLCULOS PARA LA ELABORACIÓN DEL TORNILLO HIDRODINÁMICO

Para poder comprender los símbolos utilizados para el desarrollo de los cálculos es necesario la siguiente lista de símbolos que explica el significado de cada uno de ellos.

Símbolo	Nombre	Unidad
A	Área de contacto con el agua	$m^2$
F <sub>x</sub>	Fuerza de empuje en dirección al plano radial	N
F <sub>y</sub>	Fuerza de empuje en dirección al plano radial	N
F <sub>z</sub>	Fuerza de empuje en dirección al plano tangencial	N
g	Aceleración de la gravedad	$m/s^2$
H	Salto del agua (Altura)	m
$\dot{\omega}$	Velocidad angular	Rad/s
N <sub>h</sub>	Numero de hilos	-
Ø2	Diámetro del eje de la hélice	m
Ø3	Diámetro exterior de la hélice	m
P	Avance del tornillo	m
P <sub>x</sub>	Paso del tornillo	m
Pot <sub>teo</sub>	Potencia teórica del sistema	W
Poteje	Potencia en el eje	W
Q	Caudal que pasa por el tornillo	$m^3/seg$
T	Torque en el tornillo	N.m
Y <sub>c</sub>	Centroide	-
$\alpha$	Angulo exterior de la hélice	°
B	Angulo interior de la hélice	°
$\dot{\eta}$	Eficiencia del sistema	°
$\Theta$	Ángulo de inclinación del tornillo	°
$\rho$	Densidad del agua	$Kg/m^3$
N	Revoluciones por minuto	RPM
L <sub>c</sub>	Longitud complementaria	m
L <sub>h</sub>	Longitud total del eje	m

Tabla 8. Lista de símbolos

A continuación, se presenta la tabla 6. con los parámetros iniciales para el desarrollo de los cálculos para proceder con la elaboración del tornillo hidrodinámico.

Símbolo	Nombre	Valor	Unidades
Px	Paso del tornillo	0,116	m
Nh	Numero de Hilos	1	-
Le	Longitud de la hélice	1,16	m
$\Theta$	Angulo del tornillo	30	Grados
$\rho$	Densidad del agua	997	$\text{Kg}/\text{m}^3$
g	Gravedad	9,81	$\text{m}/\text{s}^2$
$\varnothing 2$	Diámetro del eje de la hélice	0,1397	m
$\varnothing 3$	Diámetro exterior de la hélice	0,435	m

Tabla 9. Parámetros iniciales para la elaboración de los cálculos.

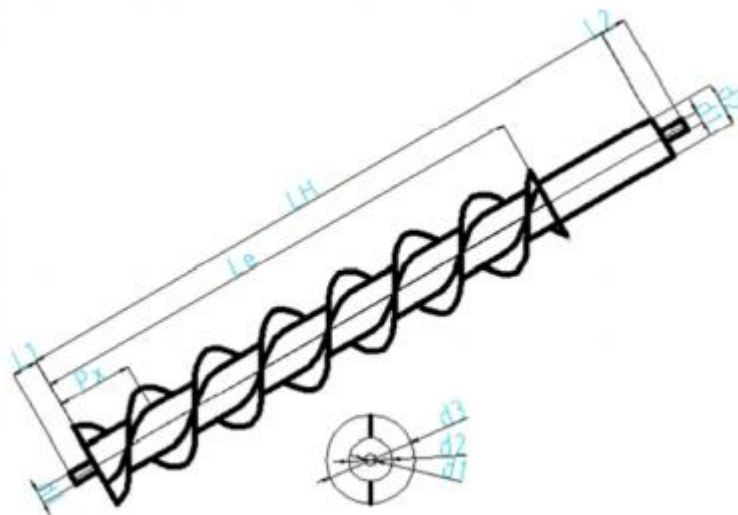


Ilustración 13. Esquema de los valores predeterminados del tornillo hidrodinámico. Para calcular los parámetros iniciales de longitud del tornillo y del ángulo externo de la hélice de este proyecto se tienen limitaciones de espacio expuesta por los propietarios de la finca donde se va a colocar el prototipo, basados en estas limitación se tiene que la longitud del tornillo no debe superar los 1.2 metros largo y los 0.5 metros de ancho, por lo tanto los parámetros iniciales de Longitud del tornillo

y diámetro de las aspas son 1.16 m y 0.435 respectivamente, dejando un margen de espacio para que la tolva y la estructura quepan en el espacio.

El ángulo de inclinación que se utilizara en el tornillo es de 30° basados en la investigación realizada por Camilo Villegas Arango en su proyecto de grado llamado “Generación de energía mediante tornillos de Arquímedes en PCH como aprovechamiento a los caudales turbinados” donde dice que el ángulo de 30° es el ángulo óptimo para captar la mayor cantidad de caudal aumentando la eficiencia del sistema la cual permite utilizar un eje de un diámetro no tan grande para obtener una potencia alta [18].

Y para los valores de Numero de hilos (Nh) y el paso del tornillo (Px) se guio del proyecto de grado de Julio Cesar Alberto Mejía llamado “Diseño de una turbina hidráulica basada en el tornillo de Arquímedes” donde recomienda que el número de hilos sea 1 y el valor del paso sea correspondiente a la longitud del tornillo para que sea uniforme la cantidad aspas y no queden espacios vacíos que hagan que el tornillo pierda eficiencia [17].

Ya teniendo los valores de los parámetros iniciales se procede a desarrollar los cálculos.

### **12.1 AVANCE DEL TORNILLO**

$$P = P_x * N_h$$

$$P = (0.116) * (1)$$

$$P = 0.116 \text{ m}$$

El tornillo tiene un avance (P) de 0.116 m.

### **12.2 ÁNGULO EXTERIOR DE LA HÉLICE.**

$$\alpha = \text{Arctan} \left( \frac{\pi * \phi^2}{P} \right)$$

$$\alpha = \text{Arctan} \left( \frac{\pi * 0.1397}{0.116} \right)$$

$$\alpha = 75.19^\circ$$

El valor del ángulo Exterior de la hélice ( $\alpha$ ) es de  $75.19^\circ$

### 12.3 ÁNGULO INTERIOR DE LA HÉLICE.

$$\beta = \text{Arctan} \left( \frac{\pi * \emptyset 3}{P} \right)$$

$$\beta = \text{Arctan} \left( \frac{\pi * 0.435}{0.116} \right)$$

$$\beta = 85.14^\circ$$

El valor del ángulo interior de la hélice es de  $85.14^\circ$

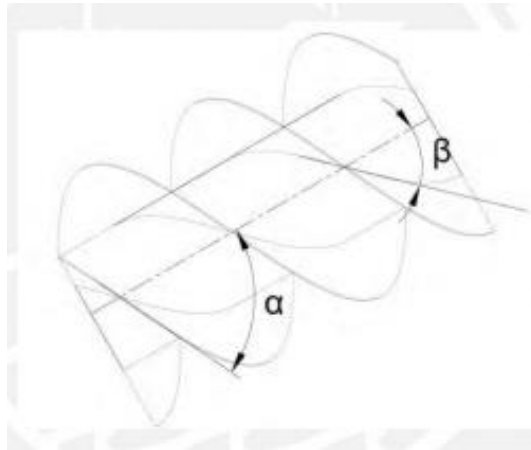


Ilustración 14. Esquema de explicación de los ángulos  $\alpha$  y  $\beta$ .

### 12.4 ÁREA DE CONTACTO CON EL AGUA

$$A = 1/2 (\pi / 4 * (\emptyset 3)^2 - \pi / 4 * (\emptyset 2)^2)$$

$$A = 1/2 (\pi / 4 * 0.435^2 - \pi / 4 * (0.1397)^2)$$

$$A = 0.0666 \text{ m}^2$$

El área de contacto del agua con las aspas de es  $0.0666 \text{ m}^2$

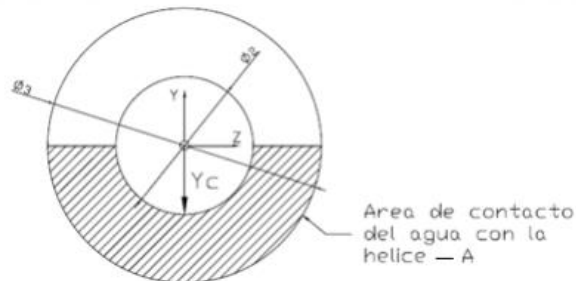


Ilustración 15. Esquema que explica el área de contacto del agua

### 12.5 SALTO DEL AGUA (ALTURA).

$$H = L_e * \text{Sen}(\Theta)$$

$$H = (1.16) * \text{Sen}(30^\circ)$$

$$H = 0.58 \text{ m}$$

El salto del agua o también llamada altura de la caída del agua es de 0.58 metros.

### 12.6 FUERZA DE EMPUJE EN DIRECCIÓN AL PLANO AXIAL.

$$F_x = \rho * g * A * P_x * \text{Sen}(\Theta)$$

$$F_x = (997) * (9.81) * (0.0666) * (0.116) * \text{Sen}(30^\circ)$$

$$F_x = 37.78 \text{ N}$$

El valor de la fuerza de empuje en dirección al plano axial es de 37.78 N.

### 12.7 FUERZA DE EMPUJE EN DIRECCIÓN AL PLANO TANGENCIAL.

$$F_z = \rho * g * A * P_x * \text{Sen}(\Theta) * \text{Tan}(\alpha)$$

$$F_z = F_x * \text{Tan}(\alpha)$$

$$F_z = (37.78) * \tan (75.19)$$

$$F_z = 142.89 \text{ N}$$

El valor de la fuerza de empuje en dirección al plano tangencial es de 142.89 N.

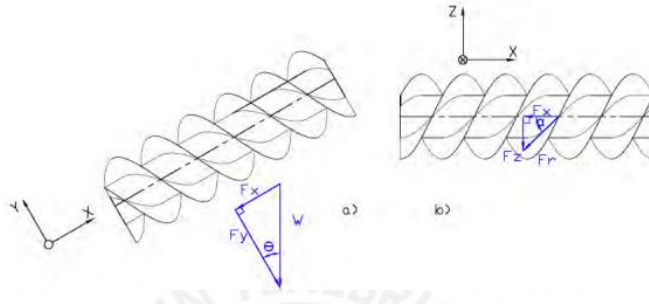


Ilustración 16. DCL del tornillo hidrodinámico con respecto a  $F_x$ ,  $F_y$  y  $F_z$ .

## 12.8 SUMATORIA DEL ÁREA POR EL YC

$$\sum Area * Y_c = \left( \frac{4\theta^3}{6\pi} * \frac{\pi\theta^3^2}{8} \right) - \left( \frac{4\theta^2}{6\pi} * \frac{\pi\theta^2^2}{8} \right)$$

$$\sum Area * Y_c = \left( \frac{4(0.435)}{6\pi} * \frac{\pi(0.435)^2}{8} \right) - \left( \frac{4(0.1397)}{6\pi} * \frac{\pi(0.1397)^2}{8} \right)$$

$$\sum Area * Y_c = 6.63 \times 10^{-3}$$

El valor de la Sumatoria del área multiplicada por el  $Y_c$  es de  $6.63 \times 10^{-3}$ .

## 12.9 SUMATORIA DEL ÁREA

$$\sum Area = \frac{3\pi\theta^3^2}{32}$$

$$\sum Area = \frac{3\pi(0.435)^2}{32}$$

$$\sum Area = 0.0557$$

El valor de la sumatoria del área es de 0.0557.

## 12.10 CENTROIDE

$$Y_c = \frac{\sum Area * Y_c}{\sum Area}$$

$$Y_c = \frac{(6.63 \times 10^{-3})}{0.0557}$$

$$Y_c = 0.119$$

El valor del centroide ( $Y_c$ ) es de 0.119.

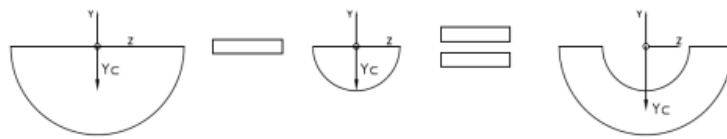


Ilustración 17. Esquema de obtención del cálculo del centroide

## 12.11 TORQUE EN EL TORNILLO

$$T = \rho * g * L_e * A * \text{Sen}(\Theta) * \text{Tan}(\alpha) * Y_c$$

$$T = (997) * (9.81) * (1.16) * (0.0666) * \text{Sen}(30^\circ) * \text{Tan}(75.19^\circ) * (0.119)$$

$$T = 170.04 \text{ N.m}$$

El valor del toque equivalente en el tornillo es de 170.04 N.m.

## 12.12 CAUDAL EN EL TORNILLO

$$Q = 1.8 (D * 0.2R) * R^{1.5}$$

$$Q = 1.8 ((0.437) * (0.2 * 0.2175)) * 0.2175^{1.5}$$

$$Q = 0.0718 \text{ m}^3/\text{seg}$$

El valor del caudal de agua que pasa por el tornillo es de  $0.0718 \text{ m}^3/\text{seg}$

## 12.13 VELOCIDAD ANGULAR DEL TORNILLO

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

$$\dot{\omega} = \frac{(0.0718) * \tan(75.19^\circ)}{(0.0666) * (0.119)}$$

$$\dot{\omega} = 34.26 \text{ Rad/seg}$$

El valor de la velocidad angular a la que gira el tornillo es de 34.26 Rad/seg.

#### 12.14 POTENCIA TEÓRICA

$$\text{Pot} = T * \dot{\omega}$$

$$\text{Pot} = (170.04) * (34.26)$$

$$\text{Pot} = 5825.57 \text{ W}$$

El valor de la potencia teórica es de 5825.57 Watts.

#### 12.15 EFICIENCIA

$$\dot{\eta} = \left( \frac{2Nh+1}{2Nh+2} \right) * \left( \frac{1-0.01125*D^2}{Q} \right)$$

$$\dot{\eta} = \left( \frac{2(1)+1}{2(1)+2} \right) * \left( \frac{1-0.01125*(0.437)^2}{(0.0718)} \right)$$

$$\dot{\eta} = 0.7275 = 72.75\%$$

El valor de la eficiencia es del 72.75% y lo aproximamos al 73%

#### 12.16 POTENCIA EN EL EJE DE TRANSMISIÓN

$$\text{Peje} = \dot{\eta} * \text{Pot}$$

$$\text{Peje} = (73\%) * (5825.57)$$

$$\text{Peje} = 4252.66 \text{ W}$$

El valor de la potencia en el eje de transmisión es de 4252.66 Watts.

## 13 CÁLCULOS DE ESFUERZOS

Para seleccionar los rodamientos fue necesario realizar los cálculos de las reacciones en el eje, el diagrama de momentos y los esfuerzos normales y cortantes en el eje para saber a qué fuerzas se iban a encontrar los rodamientos y así poder seleccionar los adecuados, para esto se basó en el proyecto de grado de Daniel Mesías Lucio Yugsi llamado “Diseño y construcción de una mini turbina tipo tornillo de Arquímedes para ser instalada en canales primarios abiertos y generar energía mecánica” donde le realiza estos mismos cálculos a un tornillo hidrodinámico [19].

Para el cálculo de la masa del tornillo se basó en los resultados obtenidos del diseño virtual realizado en el software SolidWorks

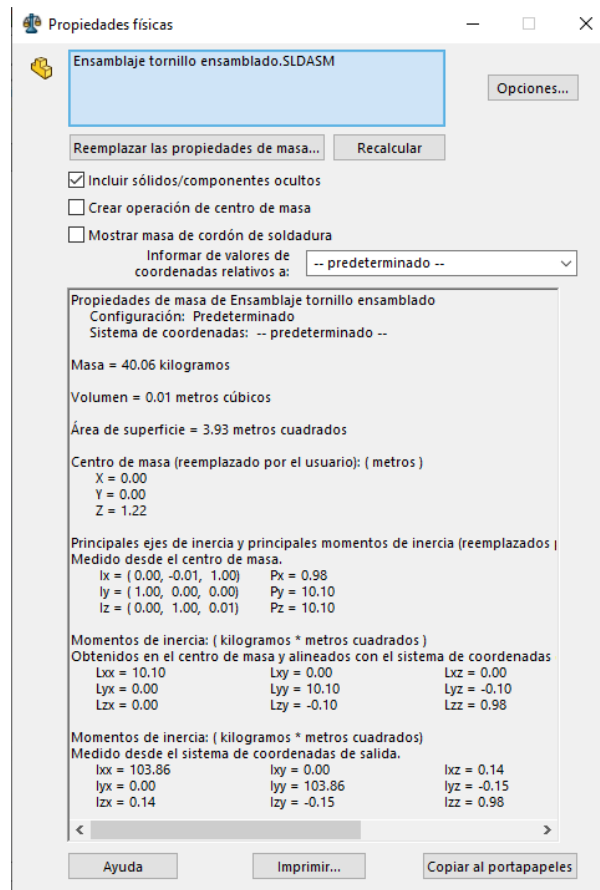


Ilustración 18. Propiedades físicas del tornillo ensamblado.

### 13.1 CÁLCULO DE LAS REACCIONES

$$W = M * g$$

Donde:

W= Peso del tornillo [N]

M = Masa del tornillo [Kg]

g = Valor de la gravedad [ $m/s^2$ ]

$$W = (40) * (9.81)$$

$$W = 392.4 \text{ N}$$

El peso del tornillo es de 392.4 N

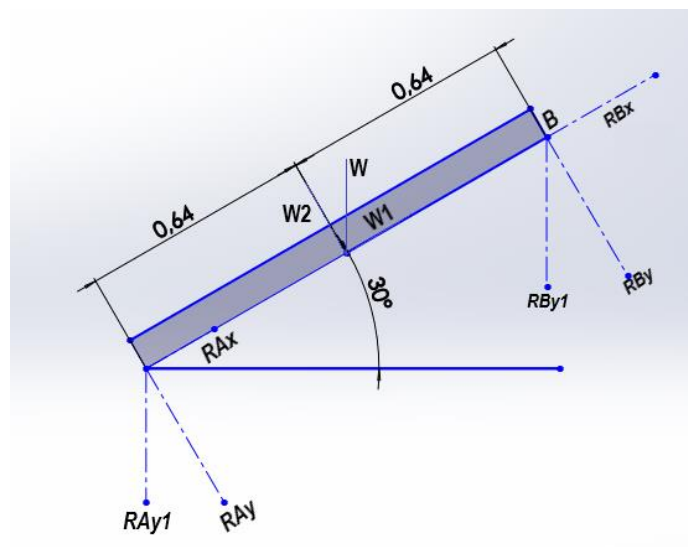


Ilustración 19. Diagrama de fuerzas.

### 13.2 CÁLCULO DE LAS REACCIONES

$$W1 = \text{Sen } (30^\circ) * W$$

$$W2 = \text{Cos } (30^\circ) * W$$

$$RAx = RAy1 * \text{Sen } (30^\circ)$$

$$R_{Ay} = R_{Ay1} * \cos(30^\circ)$$

$$R_{Bx} = R_{By1} * \sin(30^\circ)$$

$$R_{By} = R_{By1} * \cos(30^\circ)$$

Donde:

W1 = Reacción del peso en el eje x

W2 = Reacción del peso en el eje Y

RAy = Reacción en el punto A respecto al eje Y

RAx = Reacción en el punto A respecto al eje X

RAy1 = Reacción en el punto A respecto a la diagonal del eje Y

RBy = Reacción en el punto B respecto al eje Y

RBx = Reacción en el punto B respecto al eje X

RBy1 = Reacción en el punto B respecto a la diagonal del eje Y

### 13.3 REACCIONES EN EL EJE Y

$$+\uparrow \Sigma F_y = 0$$

$$R_{Ay1} + R_{By1} = W_y$$

$$R_{Ay1} * \cos(30^\circ) + R_{By1} * \cos(30^\circ) = W * \cos(30^\circ)$$

$$R_{Ay1} + R_{By1} = W$$

Teniendo ya despejada la ecuación subrayada en amarillo la cual será la Ecuación 1, procedemos a realizar la sumatoria de momentos para despejar el valor de RBy1.

$$\circlearrowleft \Sigma M_A = 0$$

$$R_{By} * (1.28 \text{ m}) - W_2 * (0.64 \text{ m}) = 0$$

$$(R_{By1} * \cos(30^\circ)) * (1.28 \text{ m}) - (W * \cos(30^\circ)) * (0.64 \text{ m}) = 0$$

$$1.1085R_{By1} - 217.48 = 0$$

$$1.1085 R_{By1} = 217.48$$

$$R_{By1} = \frac{217.48}{1.1085}$$

$$R_{By1} = 196.19 \text{ N}$$

El valor de la reacción en el punto B respecto a la diagonal del eje Y es de 196.19 N.

Luego de calcular el valor de  $R_{By1}$  vamos a la llamada Ecuación 1 donde colocamos el valor de  $R_{By1}$  y  $W$  que ya los conocemos, para poder despejar el valor  $R_{Ay1}$ .

$$R_{Ay1} + R_{By1} = W$$

$$R_{Ay1} = W + R_{By1}$$

$$R_{Ay1} = (392.4 \text{ N}) - (196.19 \text{ N})$$

$$R_{Ay1} = 196.21 \text{ N}$$

Ya sabiendo el valor de  $R_{Ay1}$  que es 196.21 N, procedemos a despejar el valor de  $R_{Ay}$  y  $R_{Ax}$  resolviendo su respectiva ecuación

$$R_{Ay} = R_{Ay1} * \text{Cos} (30^\circ)$$

$$R_{Ay} = (196.21 \text{ N}) * \text{Cos} (30^\circ)$$

$$R_{Ay} = 169.92 \text{ N}$$

$$R_{Ax} = R_{Ay1} * \text{Sen} (30^\circ)$$

$$R_{Ax} = (196.21 \text{ N}) * \text{Sen} (30^\circ)$$

$$R_{Ax} = 98.105 \text{ N}$$

Después de haber despejado los valores de  $R_{Ay}$  y  $R_{Ax}$  se van a despejar los valores de  $R_{By}$  y  $R_{Bx}$

$$R_{By} = R_{By1} * \text{Cos} (30^\circ)$$

$$R_{By} = (196.19 \text{ N}) * \text{Cos} (30^\circ)$$

$$R_{By} = 169.90$$

$$R_{Bx} = R_{By1} * \text{Sen} (30^\circ)$$

$$R_{Bx} = (196.19 \text{ N}) * \text{Sen} (30^\circ)$$

$$R_{Bx} = 98.095 \text{ N}$$

Luego de ya conocer los valores de las Reacciones que actúan sobre el sistema, se procede a meter los datos en una aplicación para calcular los diagramas de fuerzas y momentos llamado MDSolids versión 4.0 para realizar el diagrama de reacciones y momentos y el resultado fue el siguiente:

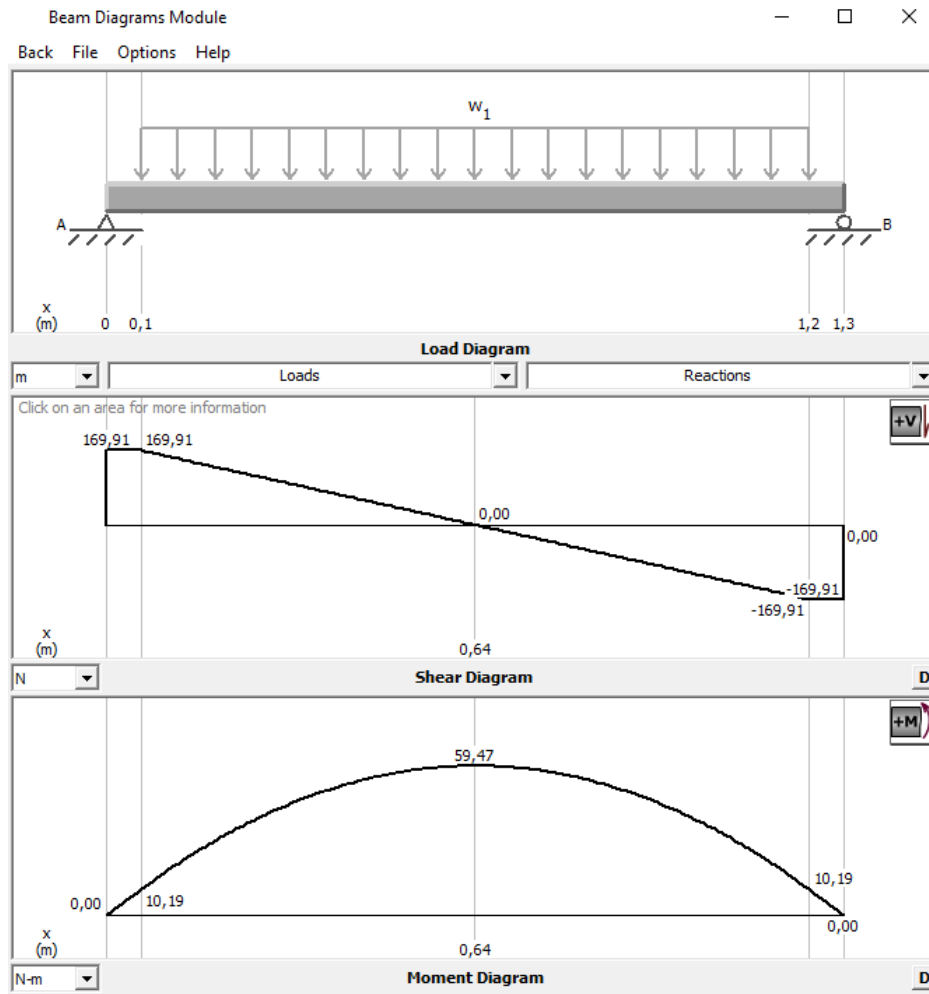


Ilustración 20. Diagrama de Reacciones y momentos

De la gráfica se puede deducir que el momento máximo obtenido es de 59.47 Nm, y con este valor se puede proceder a realizar los cálculos de esfuerzo normal y esfuerzo cortante.

### 13.3 Calculo del esfuerzo normal y esfuerzo cortante.

La ecuación para calcular el esfuerzo normal representado por el símbolo sigma ( $\sigma x$ ) es la siguiente:

$$\sigma x = \frac{M}{A}$$

Donde:

$\sigma x$  = El esfuerzo normal

M = Momento máximo

A = Área de la sección donde se aplica esfuerzo.

$$A = \frac{\pi(d)^3}{32}$$

$$A = \frac{\pi(0.0254)^3}{32}$$

$$A = 1.6087 \times 10^{-6} \text{ m}^3$$

Ya obtenido el valor de A y de M el cual fue obtenido en la gráfica de momentos, se puede dar paso a desarrollar la ecuación de  $\sigma x$ .

$$\sigma x = \frac{M}{A}$$

$$\sigma x = \frac{(59.47 \text{ N})}{(1.6087 \times 10^{-6})}$$

$$\sigma x = 36.967 \text{ MPA}$$

Ya sabiendo el valor del esfuerzo normal se procede a obtener el valor del esfuerzo cortante ( $\tau x$ )

$$\tau x = \frac{T * r}{j}$$

Donde:

$\tau_x$  = Es el esfuerzo cortante

T = Es el toque del eje.

r = Radio del eje

j = es el momento polar

$$j = \frac{\pi(d)^4}{32}$$

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

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

Ya obteniendo el valor de j ( $4.0863 \times 10^{-8} \text{ m}^4$ ) y sabiendo los valores del toque y del radio del eje se puede dar resultado al valor del esfuerzo cortante.

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

$$\tau_x = \frac{(170.04 \text{ Nm}) * (0.0127 \text{ m})}{(4.0863 \times 10^{-8})}$$

$$\tau_x = 52.846 \text{ MPA}$$

Después de haber obtenido los valores del esfuerzo normal y el esfuerzo cortante se procede a realizar la ecuación de fallas de Von Mises presentada a continuación, con el fin de ser utilizada más adelante para hallar el factor de seguridad que deberán llevar los rodamientos.

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

$$\sigma_{min} - \sigma_{max} = \frac{(36.967 \text{ MPA})}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{36.967 \text{ MPA}}{2}\right)^2 + (52.846 \text{ MPA})^2}$$

$$\sigma_{min} - \sigma_{max} = 18.4835 \pm \sqrt{341.639 + 2792.69}$$

$$\sigma_{max} = 18.4835 + \sqrt{341.639 + 2792.69}$$

$$\sigma_{max} = 74.468 \text{ MPA}$$

$$\sigma_{min} = 18.4835 - \sqrt{341.639 + 2792.69}$$

$$\sigma_{min} = - 37.50 \text{ MPA}$$

Una vez resuelta la ecuación de Von Mises, sabiendo el valor de  $\sigma_{max}$  y  $\sigma_{min}$  se procede a realizar la formula del factor de seguridad.

### 13.4 FACTOR DE SEGURIDAD.

Para poder realizar el factor de seguridad se debe conocer el Módulo de elasticidad o limite elástico del material sobre el que se está trabajando. En este caso el eje es de acero ASTM A36 que es un acero al carbono estructural y su Limite elástico es de 250 MPA como se puede observar en la ilustración 21.

Nomenclatura		F <sub>y</sub> (3)		F <sub>u</sub> (4)	
NMX (1)	ASTM (2)	MPa	kg/cm <sup>2</sup>	MPa	kg/cm <sup>2</sup>
B-254	A36	250	2 530	400 a 550	4 080 a 5 620
B-99	A529	290	2 950	414 a 585	4 220 a 5 975
B-282	A242	290	2 950	435	4 430
		320	3 235	460	4 710
		345	3 515	485	4 920
B-284	A572	290	2 950	414	4 220
		345	3 515	450	4 570
		414	4 220	515	5 270
		450	4 570	550	5 620
	A992	345	3 515	450 a 620	4 570 a 6 330
B-177	A53	240	2 460	414	4 220
B-199	A500 (5)	320	3 235	430	4 360
B-200	A501	250	2 530	400	4 080
	A588	345 (6)	3 515 (6)	483 (6)	4 920 (6)
	A913	345 a 483 (7)	3 515 a 4 920 (7)	448 a 620 (7)	4 570 a 6 330 (7)

Ilustración 21. Limite elástico del Acero ASTM A36.

Ya conociendo esto se puede proceder a solucionar la ecuación del factor de seguridad.

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

Donde:

$\eta$  = Factor de seguridad.

$S_y$  = Limite elástico del acero ASTM A36.

$\sigma_{max}$  = Esfuerzo cortante máximo.

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

$$\eta = \frac{(250 \text{ MPA})}{(74.468 \text{ MPA})}$$

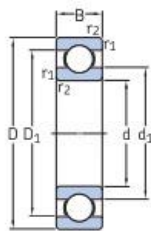
$$\eta = 3.35$$

El factor de seguridad que deben tener los rodamientos para poder soportar la carga y los esfuerzos ejerce tornillo es de 3.35 veces el valor del  $\sigma_{max}$ .

## 14 SELECCIÓN DE LOS RODAMIENTOS ADECUADOS.

Basándose en los resultados obtenidos en los cálculos del factor de seguridad, esfuerzo cortante máximo, esfuerzo normal y los diagramas de momentos y fuerza y en parámetros como diámetro del eje, los rodamientos seleccionados para este proyecto fue el 61805-2RZ, el cual cumple con todos los requerimientos mencionados anteriormente.

### 1.1 Rodamientos rígidos de una hilera de bolas d 25 – 30 mm



2Z



2RSL



2RZ



2RS1



2RS1



2RSH

Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga	Velocidades nominales		Masa	Designaciones	
d	D	B	dinámica C	estática C <sub>0</sub>	P <sub>u</sub>	Velocidad de referencia	Velocidad límite <sup>1)</sup>		Rodamiento abierto o tapado en ambos lados	tapado en un lado <sup>1)</sup>
mm			kN		kN	r. p. m.		kg	–	
25	37	7	4,36	2,6	0,125	–	11 000	0,022	▶ 61805-2RS1	–
	37	7	4,36	2,6	0,125	38 000	19 000	0,022	▶ 61805-2RZ	–
	37	7	4,36	2,6	0,125	38 000	24 000	0,022	▶ 61805	–
	42	9	7,02	4,3	0,193	–	10 000	0,045	▶ 61905-2RS1	–
	42	9	7,02	4,3	0,193	36 000	18 000	0,045	▶ 61905-2RZ	–
	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	0,055	▶ 16005	–
	47	12	11,9	6,55	0,275	32 000	20 000	0,078	▶ 6005	–
	47	12	11,9	6,55	0,275	–	9 500	0,081	▶ 6005-2RSH	6005-RSH
	47	12	11,9	6,55	0,275	32 000	16 000	0,08	▶ 6005-2RSL	6005-RSL
	47	12	11,9	6,55	0,275	32 000	16 000	0,083	▶ 6005-2Z	6005-Z
	47	16	11,2	6,55	0,275	–	9 500	0,11	▶ 63005-2RS1	–
52	15	14,8	7,8	0,335	28 000	18 000	0,13	▶ 6205	–	
52	15	14,8	7,8	0,335	–	8 500	0,13	▶ 6205-2RSH	6205-RSH	

Ilustración 22. Especificación de rodamientos.

## 15 SELECCIÓN DE TRANSMISIÓN DE POTENCIA

En la parte de la transmisión de potencia del sistema se implementamos poleas y correas ya que necesitábamos un aumento en la velocidad de giro para que el generador lograra funcionar correctamente.

Se utilizó la siguiente fórmula para seleccionar las poleas adecuadas con el fin de obtener por lo menos 1200 rpm que es la velocidad a la cual empieza a generar energía el alternador:

$$D \times n1 = d \times n2$$

Donde:

D= Diámetro de la polea mayor (m)

d = Diámetro de la polea menor (m)

n1 = Número de rpm de la polea mayor

n2 = Número de rpm de la polea menor

Los resultados obtenidos después de realizar estos cálculos fueron los siguientes:

- Eje del tornillo al eje superior de transmisión

$$D \times n1 = d \times n2$$

$$n2 = \frac{D \times n1}{d}$$

$$n2 = \frac{(0.2032) \times 254.36}{(0.0635)}$$

$$n2 = 813.952 \text{ rpm}$$

- Eje superior de transmisión el generador

$$D \times n1 = d \times n2$$

$$n2 = \frac{D \times n1}{d}$$

$$n2 = \frac{(0.1524) \times 813.952}{(0.0762)}$$

$$n2 = 1627.904 \text{ rpm}$$

## 16 LISTA DE MATERIALES

A continuación, presentamos la lista de los materiales utilizados para la elaboración del y puesta en marcha del tornillo hidrodinámico.

LÁMINA DE 4mm (1 m x 4.5 m)
LÁMINA DE 2mm (1.20 m x 1.30m)
BARILLAS DE SOLDADURA
4 LATAS DE PINTURA ANTICORROCIBA
1 POLEA GRANDE DE 8" TIPO A / 1 CANAL
1 POLEA DE 6" TIPO B/ 1 CANALES
1 POLEAS PEQUEÑAS DE 2.5" TIPO A/ 1 CANAL
1 POLEA TIPO B DE 3"/ 1 CANAL
ALTERNADOR 24V
CANASTA PLASTICA
TUBO DE 4" ACERO 1.2M
4 RODAMIENTOS UCP205D1
TUBO DE 1" EN ACERO 2M
ANGULO DE 2X2 CM 2M LARGO
TUBO CUADRADO 1-1/2 x 1-1/2 x 1.1 mm C18

Tabla 10. Lista de materiales.

## 17 SELECCIÓN DEL GENERADOR

El alternador seleccionado para este proyecto es un alternador sin escobillas para equipo pesado de la marca Delco Remy debido a sus características y beneficios como la potencia de trabajo que va de entre 12V a 430 amps y 24V a 250 o 270 amps que está en el rango de potencia que produce el tornillo, además es un alternador que trabaja a bajas revoluciones debido a que proviene de un cargador de motor Diesel y empieza a generar energía desde las 1200 rpm el cual cumple a cabalidad con condiciones de diseño mencionadas en el punto 11 de este proyecto. A continuación, se presenta una tabla con las especificaciones del fabricante del alterador.



### ESPECIFICACIONES

<b>Rendimiento de salida</b>	12 Volt: 430 Amps, 24 Volt: 250 & 275 Amps
<b>Velocidad máxima</b>	8.000 RPM Continuo, 9.000 RPM Intermitente
<b>Rotación</b>	A favor de las manecillas del reloj (Clockwise)
<b>Rango de temperatura</b>	250 Amp - 125°C/257°F 275 Amp - 110°C/230°F 430 Amp - 93°C/200°F
<b>Montaje</b>	Pad
<b>Eficiencia</b>	12 Voltios: 73%, 24 Voltios: 80%
<b>Peso</b>	43.2 lbs/19.6 kg
<b>Longitud</b>	11.25 in/285.9 mm
<b>Diámetro del Estator</b>	6.9 in/175 mm
<b>Remote Sense</b>	Estándar

Ilustración 23. Especificaciones del alternador.

## 18 CONSTRUCCION DEL PROTOTIPO

### 18.1 CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA

Se inicio la construcción del prototipo por la estructura que soporta todos los componentes de este, se compraron 12 metros de tubo cuadrado, el cual se cortó con las medidas hechas en el diseño de SolidWorks.

Se empezó a soldar y construir esta estructura como se muestras en las siguientes ilustraciones.

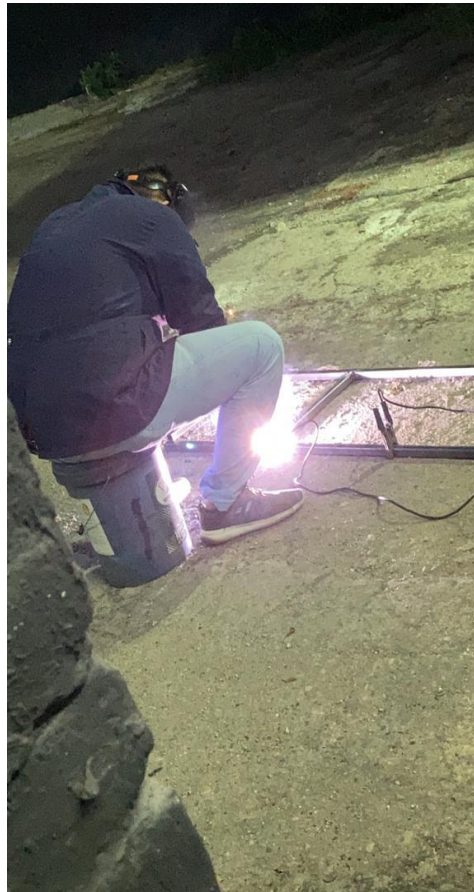


Ilustración 24. construcción de la base.



Ilustración 25. Base y torres de la estructura.



Ilustración 26. Base y torres de la estructura.



Ilustración 27. Base y torres de la estructura.

En las ilustraciones 24, 25, 26 y 27 se observa el proceso detallado de la elaboración de la estructura donde estará soportado el tornillo y todos sus elementos, este proceso se realizó por medio de soldadura por electrodo revestido a 70 Amps de corriente con electrodos 6013 x 3/32 de la marca Bauker que funcionan en un rango de corriente de entre 60 a 90 amps en AC o DC utilizada normalmente para trabajos de uso doméstico o industrial en materiales de bajo calibre como los tubos de 1.1 mm de espesor que se utilizaron para realizar la estructura.

Al terminar la estructura se obtuvo el resultado mostrado en las ilustraciones 28 y 29 presentadas a continuación.



Ilustración 28. Estructura terminada.



Ilustración 29. Estructura terminada.

## 18.2 CONSTRUCCIÓN DE LA TOLVA

El siguiente paso fue la creación de la tolva por donde va a descender el agua en el sistema, en este caso se tomó una lámina calibre 14 y se dobló y rolo con las medidas necesarias para que el tornillo ingresara correctamente dentro de ella, en las ilustraciones 30 y 31 se muestran los resultados obtenidos después de realizar dichos procesos.



Ilustración 30. Tolva y estructura.



Ilustración 31. Tolva y estructura.

Se procedió a pintar la estructura y la tolva debido a que se observa que estaba empezando a salir una capa de óxido, se decidió utilizar una laca anticorrosiva de la marca Pintuco llamada Aero Color de secado rápido en aerosol de colores gris y negro, y el resultado final se puede observar en las ilustraciones 32 y 33 presentadas a continuación.



Ilustración 32. Estructura y tolva pintados.



Ilustración 33. Estructura y tolva pintados.

### **18.3 CONSTRUCCIÓN DEL TORNILLO SIN FIN**

En este punto se puede apreciar el paso a paso de su construcción del tornillo sin fin.

Se tomo un tubo de acero de 1.16 metros de longitud como eje principal y un tubo de menor diámetro con una longitud 1.71 metros como eje de soporte, adicionalmente se mandaron a cortar discos con los diámetros requeridos para hacer las aspas del tornillo y se soldaron para poderlos estirar y acoplar al eje principal. En las ilustraciones 34, 35, 36, 37 y 38 se presenta el proceso detallado de la elaboración del tornillo sin fin.



Ilustración 34. Construcción del eje del tornillo.



Ilustración 35. Instalación de las aspas del tornillo.



Ilustración 36. Instalación de las aspas del tornillo.



Ilustración 37. Instalación de las aspas del tornillo.



Ilustración 38. Tornillo finalizado.

#### **18.4 CONSTRUCCIÓN DE LA TRANSMISIÓN DE POTENCIA**

En esta parte de la construcción del sistema de transmisión de potencia del eje del tornillo al alternador se acomodaron 2 rodamientos de 1" de diámetro interior, una polea de 2.5" de diámetro exterior y 1" de diámetro interior que se acopla a una correa de 116 cm tipo B que transfiere la potencia del eje del tornillo al eje de transmisión, una polea de 6" de diámetro exterior y 1" de diámetro interior que se acopla a una correa de 70 cm tipo B para transferir la potencia del eje de transmisión alternador el cual se encarga de convertir la energía mecánica generada por el tornillo en energía eléctrica.



Ilustración 39. Sistema de transmisión de potencia.

### **18.5 ENSAMBLE FINAL DEL TORNILLO HIDRODINÁMICO**

En estas ilustraciones 40, 41, 42, 43 y 44 presentadas a continuación se puede observar ver el sistema ya está terminado.

En la ilustración 41 se puede observar el tanque recolector de agua instalado, para el cual se utilizó una canasta plástica que fue cortada para encajar con la tolva perfectamente y para evitar fugas en el sistema de le coloco un aislante para tanques.

En la ilustración 44 el sistema ya está preparado para proceder a realizar las respectivas pruebas de campo



Ilustración 40. Sistema tornillo hidrodinámico terminado.



Ilustración 41. Sistema tornillo hidrodinámico terminado.



Ilustración 42. Sistema tornillo hidrodinámico terminado.



Ilustración 43. Sistema tornillo hidrodinámico terminado.



Ilustración 44. Sistema tornillo hidrodinámico terminado.

## 19 RESULTADOS DE LAS PRUEBAS

Para la validación de funcionamiento del prototipo se llevó a la quebrada Peralonso ubicada en zona rural del municipio de Sabana de torres, Santander.

Por las condiciones climáticas que se presentaron la noche anterior al día que se realizaron las pruebas, no fue posible ubicar el prototipo en el espacio designado para su instalación debido a que toca cruzar la quebrada la cual presentaba una creciente y se corría el riesgo de que inundara el vehículo en que se transportaba el prototipo.

Debido a esto se tomó la decisión de sacar 3 mangueras de 2" desde el rio para hacer subir el agua por gravedad al taque recolector de agua del prototipo para así empezar a realizar las pruebas y validar su funcionamiento.

A continuación, se presentarán las ilustraciones que evidencian del funcionamiento del prototipo.



Ilustración 45. Evidencia del funcionamiento del prototipo.



Ilustración 46. Evidencia de la admisión del agua al sistema.



Ilustración 47. Evidencia de la salida del agua del sistema

En este punto despues que se valido el funcinamiento del prototipo se procede a validar la cantidad de energia que este puede producir, para esto se conecto un multimetro al alternador obteniendo como resultado un maximo de 25.5 Voltios como se puede evidenciar la siguiente ilustración 48.



Ilustración 48. Validación del voltaje que produce el prototipo.

Despues de conocer la cantidad de voltios que es capaz de producir el prototipo, se adapto al alternador una bateria de 24 Voltios a a cual se le conecto un taladro que utilizan en las finca para trabajos domesticos con el fin de calcular la cantidad de amperios que el protitipo podia producir, esta medicion se realizo tambien por medio de un multimetro de Ac y Dc y el resultado obtenido fue de 7.58 Amps como se evidencia en la siguiente ilustracion.



Ilustración 49. Evidencia de los amperios que produce el prototipo.



Ilustración 50. La batería utilizada para realizar las pruebas.

Ya después de tener los valores del voltaje y el amperaje producidos por el hidrotornillo, se procede a realizar el cálculo de la potencia producida

$$P = I * V$$

Donde:

P = Potencia producida en Watts

I = Amperaje

V = Voltaje

$$P = (7.58 \text{ Amps}) * (25.5 \text{ V})$$

$$P = 193.29 \text{ Watts}$$

Como resultado final se obtuvo una potencia de 193.29 Vatios, esto debido a que era la potencia que necesitaba el taladro para funcionar, en caso de que se hubiera conectado un equipo que consumiera mas vatios para funcionar, el alterador produciria la cantidad de potencia que fuese necesaria.

La idea para poder validar que el protoripo producía 4Kw de potencia era probarlo con el banco de resistencia de la UPB, pero debido a la situación por la que está pasando el país en estos momentos con respecto a los paros y al covid-19 fue imposible que esta fuera prestada por que las instalaciones de la Universidad se encontraban cerradas al público y no habían empleados con la potestad de prestar dichos equipos.

## 20 CONCLUSIONES Y RECOMEDACIONES

### 20.1 CONCLUSIONES

- En el proceso de la investigación del proyecto se lograron identificar las características claves que debe tener un tornillo hidrodinámico, las cuales son, que sea de fácil construcción, que sus materiales sean escogidos de manera correcta para que su vida útil sea extensa, que los criterios de construcción obtenidos al momento de hacer los cálculos sean respetados para que la utilidad del sistema sea la más optima y adicionalmente que al momento de hacer la instalación se tenga en cuenta que se deben tener cuidados con la fauna y flora para el sistema sea amigable con el medio ambiente.
- El diseño que se tomó como el mejor para trabajar fue el número 2, ya que este es el que obtuvo más puntaje al momento de analizar las características con las que debía cumplir, estas características eran, que el costo de los materiales que se debían utilizar no sea tan alto, que su construcción sea sencilla, que sus mantenimientos se puedan realizar de manera fácil y rápida, que estos materiales escogidos sean buenos para que su vida útil sea lo más extensa posible y que sus funciones sean las indicadas para poder ser capaz de producir la energía deseada.
- Para el proceso de la elaboración de los cálculos se deben tener claro factores como las dimensiones del lugar donde se va a ubicar el tornillo para poder dictaminar los parámetros iniciales como la longitud máxima que puede tener el tornillo, el ancho máximo que deben tener las aspas y poder así calcular el valor del diámetro del eje que permita producir la cantidad de energía requerida.
- Al momento de hacer las pruebas del prototipo se evidencia que a pesar de tener un consumo que genera resistencia, el sistema sigue girando y produciendo la energía suficiente para alimentar el dispositivo conectado, el torque que nos proporciona el agua es la parte clave de todo el sistema, entre más caudal se tenga más torque se tendrá y más potencia se puede obtener del sistema.

## 20.2 RECOMENDACIONES

- Se recomienda aplicar algún tipo de producto que proteja al equipo de la corrosión debido a que este se encuentra en constante contacto con el agua la cual genera capas corrosión en el metal y a medida que esta va creciendo va debilitando el material hasta el punto de la ruptura.
- Se aconseja variar el diámetro del eje dependiendo la cantidad de energía que se necesite producir, a medida que el diámetro sea mayor, el tornillo tendrá la capacidad de producir más energía.
- En el caso los rodamientos que sujetan el tornillo y los que están acoplados debido que al estar trabajando ininterrumpidamente durante largos periodos de tiempo estos tienen a perder lubricación por lo tanto es aconsejable que se les esté revisando el aceite que tienen y aplicarles si es necesario, esto hará que se alargue la vida útil de los rodamientos evitando el costo de remplazarlos y haciendo que la maquina se detenga.
- Se aconseja que los materiales que se vaya a utilizar para realizar las aspas y el eje central del tornillo no tengan ningún tipo de recubrimiento debido a que esto puede llegar a ser un inconveniente al momento de realizar el proceso de soldadura por que los materiales no se van a unir de manera adecuada generando un mal proceso de unión que puede conllevar a una ruptura rápida de la soldadura.

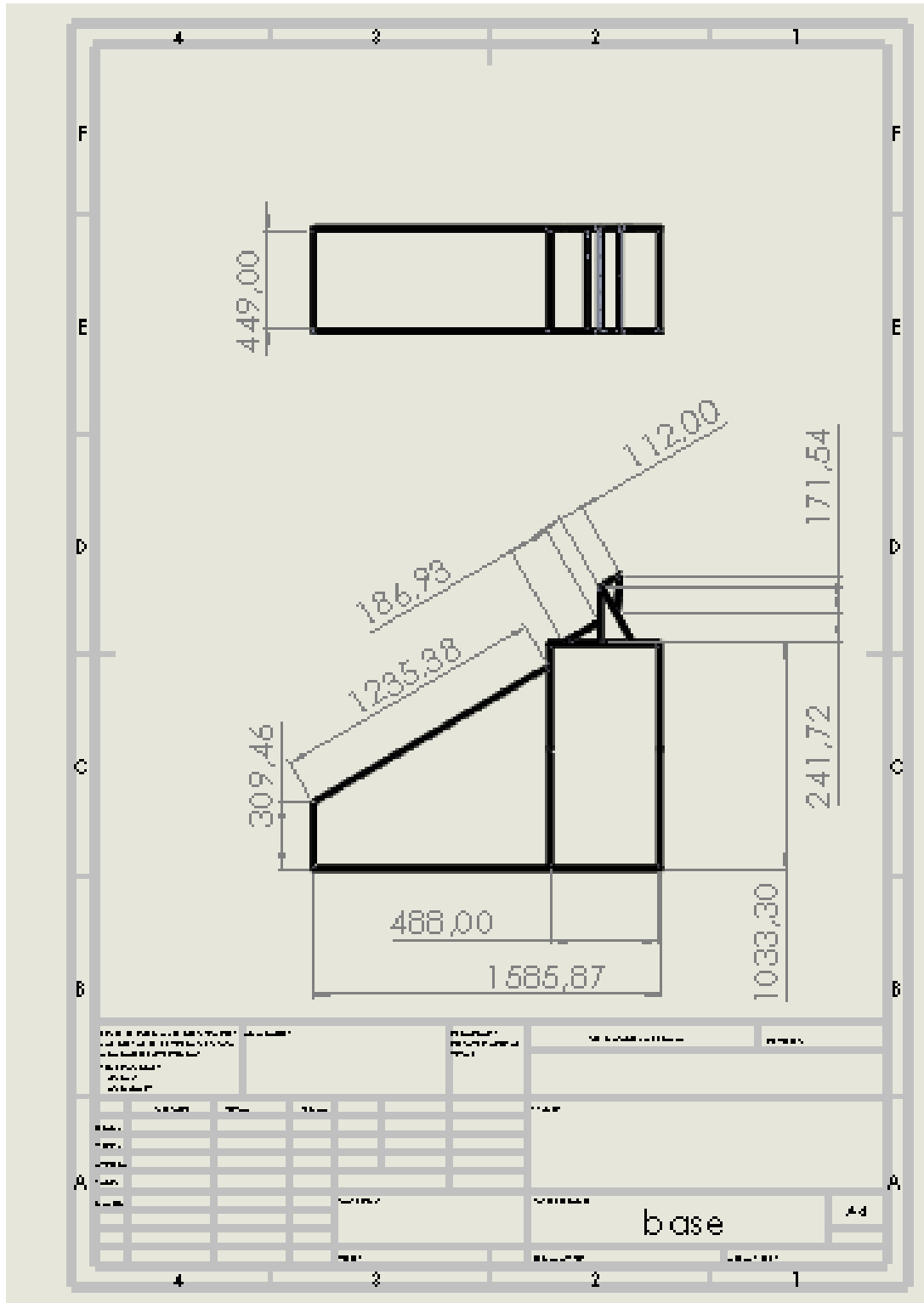
## 21 REFERENCIAS

- [1] J. SOTO HERNÁNDEZ, «Déficit de energía es solo de 3,33% del total de la población,» Diario La Republica, 21 Abril 2016. [En línea]. Available: <https://www.larepublica.co/infraestructura/deficit-de-energia-es-solo-de-333-del-total-de-la-poblacion-2371496>.
- [2] M. E. MADRID y J. M. TORO, «VIABILIDAD TÉCNICA Y ECONÓMICA DE TORNILLOS HIDRODINÁMICOS,» 2013. [En línea]. Available: <https://repository.eia.edu.co/bitstream/11190/307/1/CIVI0418.pdf>.
- [3] H. CALLE, «El Espectador,» 28 Noviembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.elespectador.com/noticias/medio-ambiente/la-energia-limpia-que-los-excombatientes-llevaron-a-miravalle/>.
- [4] M. I. Maulana, «Performance of Single Screw Archimedes Turbine Using Transmission,» 2019. [En línea]. Available: <file:///D:/Descargas/Performance-of-Single-Screw-Archimedes-Turbine-Using-Transmission2019IOP-Conference-Series-Materials-Science-and-Engineering.pdf>.
- [5] K. Shahverdi, R. Loni, B. Ghobadian, S. Gohari, S. Marofi y E. Bellos, «Numerical Optimization Study of Archimedes Screw Turbine (AST):,» 29 Julio 2019. [En línea]. Available: <file:///D:/Descargas/Numerical-Optimization-Study-of-Archimedes-Screw-Turbine-AST-A-case-study2020Renewable-Energy.pdf>.
- [6] A. FRANCO GARCIA, «Principio de Arquímedez,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/fluidos/estatica/arquimedes/arquimedes.htm>.
- [7] L. V. Terán, «Principio de Arquímedes,» Universidad Autónoma Del Estado De Hidalgo, Enero 2014. [En línea]. Available: <https://www.uaeh.edu.mx/scige/boletin/prepa4/n3/m4.html>.
- [8] Curiosoando.com, «¿Que es el peso especifico?,» 11 Octubre 2017. [En línea]. Available: <https://curiosoando.com/que-es-el-peso-especifico#:~:text=El%20peso%20espec%C3%ADfico%20es%20a,fuerza%20por%20unidad%20de%20volumen..>
- [9] Kayaalla, «Blog Fisiqita3,» 11 Junio 2010. [En línea]. Available: <http://blogfisiqita3.blogspot.com/2010/06/volumen-de-fluidos.html>.
- [1] A. M. Domingo, «Apuntes de Mecánica de Fluidos,» Mayo 2011. [En línea]. Available: <http://oa.upm.es/6934/1/amd-apuntes-fluidos.pdf>.
- [1] M. Del Mar, «¿Que es la gravedad?,» Espaciociencia.com, 02 Mayo 2020. [En línea]. Available: <https://espaciociencia.com/que-es-la-gravedad/>.

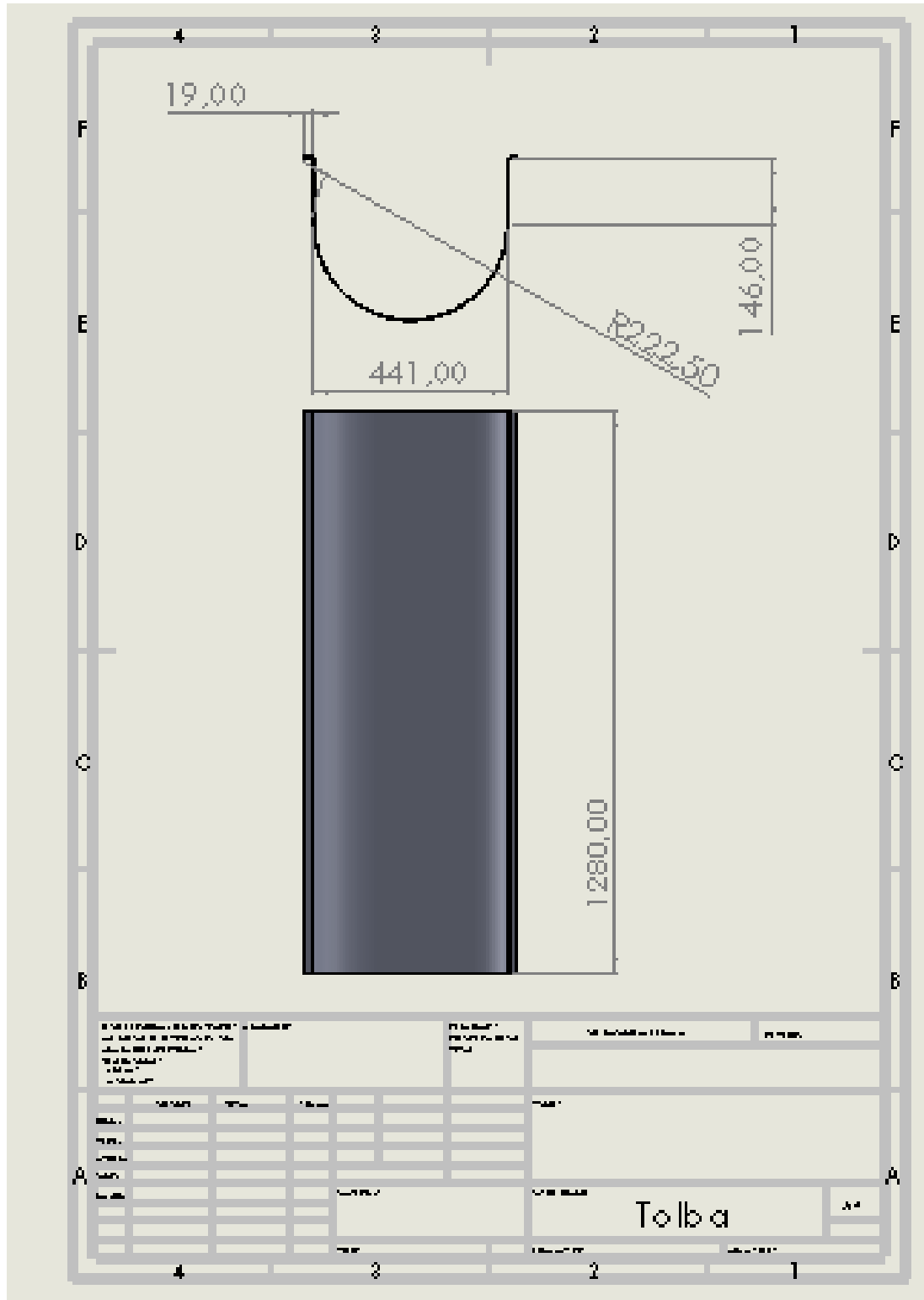
- [1 Hidro Metálica, «Hidrometalica - Tornillo de Arquimedes,» 2015. [En línea]. Available:  
2] <https://hidrometalica.com/tornillo-arquimedes/>.
- [1 Landustrie Sneek BV, «Tornillos de arquimedes,» 2016. [En línea]. Available:  
3] <https://www.landustrie.nl/es/productos/aguas-residuales/tornillos-de-arquimedes.html>.
- [1 Cuidemos el planeta, «Energías renovables,» 2018. [En línea]. Available:  
4] <https://cuidemoselplaneta.org/energias-renovables/>.
- [1 Factor Energía, «Energías renovables: características, tipos y nuevos retos,» 30 Agosto 2018.  
5] [En línea]. Available: <https://www.factorenergia.com/es/blog/noticias/energias-renovables-caracteristicas-tipos-nuevos-retos/>.
- [1 P. ARANGO y P. MAYA, «ESQUEMA DE MICRO-GENERACION HIDRAULICA A ESCALA  
6] MUNICIPAL,» 2015. [En línea]. Available:  
[https://repository.eia.edu.co/bitstream/11190/2358/1/ArangoPedro\\_2015\\_EschemaMicrogeneracionHidroelectrica.pdf](https://repository.eia.edu.co/bitstream/11190/2358/1/ArangoPedro_2015_EschemaMicrogeneracionHidroelectrica.pdf).
- [1 J. C. A. MEJIA, «DISEÑO DE UNA TURBINA HIDRÁULICA BASADA EN EL,» CIUDAD  
7] UNIVERSITARIA, 2011.
- [1 C. VILLEGAS ARANGO, «Generación de energía mediante tornillos de Arquímedes en PCH  
8] como aprovechamiento a los caudales turbinados,» Envigado, 2013.
- [1 D. M. Lucio Yugsi, «DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA MINI TURBINA TIPO TORNILLO DE  
9] ARQUÍMEDES PARA SER INSTALADA EN CANALES PRIMARIOS ABIERTOS Y GENERAR ENERGÍA MECÁNICA”,» Ambato, 2019.



## ANEXO 2. BASE DE LA ESTRUCTURA

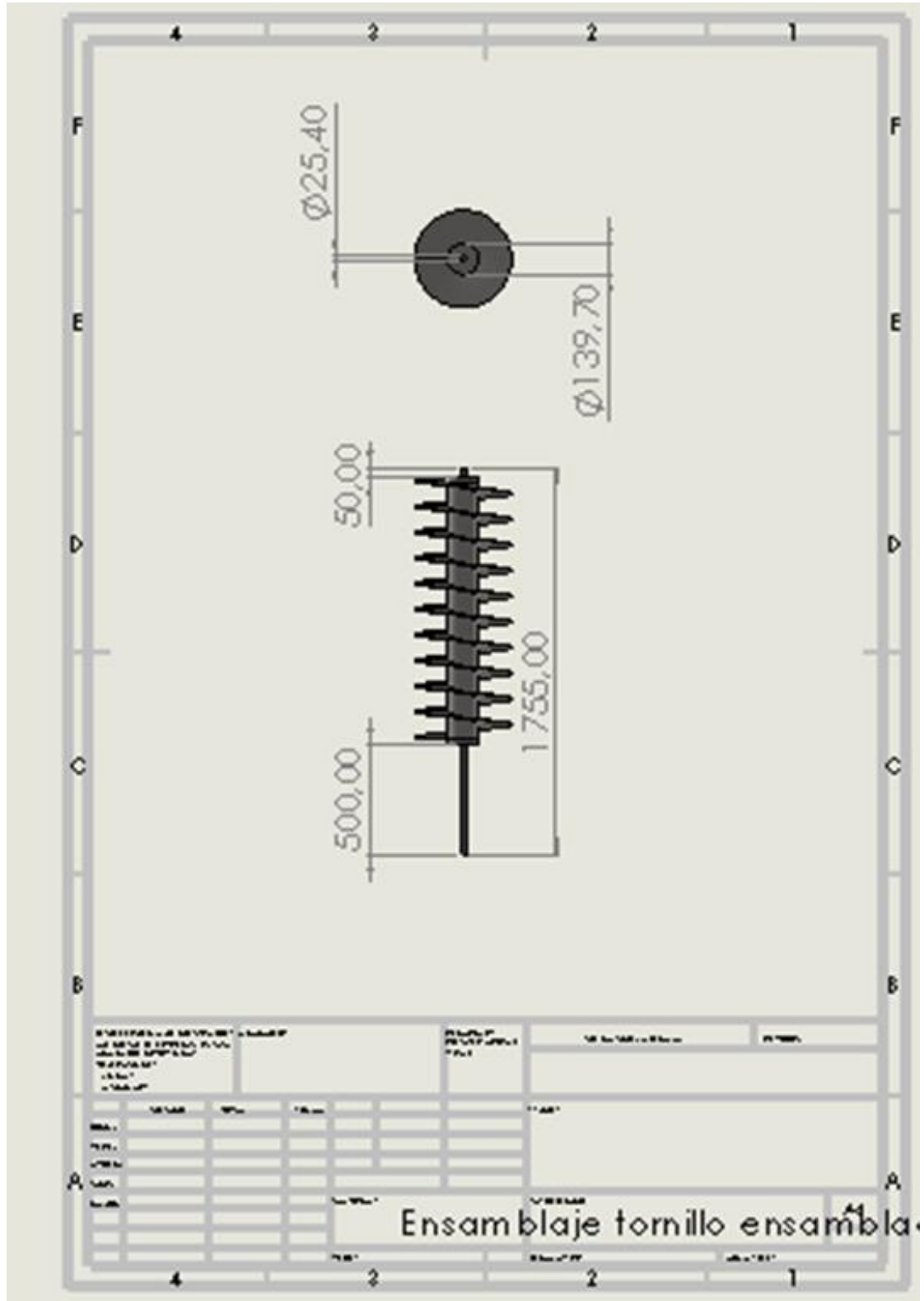


### ANEXO 3. CANAL DE DESAGUE





# ANEXO 5.TORNILLO ENSAMBLADO



# ANEXO 6. TANQUE RECOLECTOR DE AGUA

