



Diseño y construcción de un prototipo de un sistema de generación eléctrica 10 W a partir de un hidrotornillo tipo Arquímedes

**Luis Julián Castro García
Yany Ferney Hidalgo González**

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Ciudad, Colombia

2022

Diseño y construcción de un prototipo de un sistema de generación eléctrica 10 W a partir de un hidrotornillo tipo Arquímedes

Luis Julián Castro García
Yany Ferney Hidalgo González

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Ingeniero Mecánico.

Ingeniero Electromecánico.

Director:

Ing. Mec. Esp. Henry Moreno Acosta

Universidad Antonio Nariño

Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica

Ciudad, Colombia

Año 2022

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

_____.

Cumple con los requisitos para optar

Al título de _____.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Bogotá 2022

Dedicatoria

Hacemos honor a nuestros padres por el esfuerzo que realizaron para nosotros llegar a esta etapa, nuestros familiares y allegados que de una u otra manera hicieron posible este logro, hasta el día de hoy podemos decir que la fe y esperanza depositada en nosotros aquel día que decidimos partir de nuestro hogar hoy se ve reflejada en este proyecto.

También recordamos a quienes ya no están por circunstancias de la vida, que nos hubiese gustado tener presentes en este momento tan importante para nosotros, hoy solo viven en nuestra memoria.

Agradecimientos

En la vida hay muchas cosas que guardamos, pero en este caso la gratitud no es una de ellas.

Agradecemos al ING Henry Moreno por su orientación en el desarrollo de este proyecto de grado, a los ingenieros y profesores que hicieron parte de esta orientación académica.

Agradecemos a Eduardo Rodríguez y Martha García que en su rol laboral y familiar nos fue de mucha ayuda para completar esta etapa.

A nuestros compañeros de clases y seminarios con los cuales vivimos muchas experiencias reconfortantes.

Resumen

En este proyecto se presenta el desarrollo para el diseño y construcción de un prototipo de generación de energía eléctrica mediante el principio del tornillo de Arquímedes, haciendo uso de un caudal de agua disponible en un riachuelo en la vereda Punta grande, municipio de Guachetá Cundinamarca.

Este hidrotornillo está diseñado para trabajar con un caudal disponible de 10 L/s y así llegar a generar una potencia eléctrica de 10 W. El estudio de este hidrotornillo partió de una de las necesidades básicas que enfrentan las personas en la actualidad como lo es la falta de conexión al suministro energético para facilitar el desarrollo de actividades cotidianas, mediante conocimientos científicos y tecnológicos de sistemas de transformación de energía hidráulica en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica con ayuda de un generador, se alimenta una fuente de energía en este caso una lámpara led que permite dar iluminación a un determinado lugar, mediante la selección de materiales se lleva a cabo la construcción de la estructura que soporta el hidrotornillo permitiéndole girar libremente en sus puntos de apoyo. Siendo este un prototipo caracterizado como una microturbina por sus dimensiones utilizadas, se prevé que cuente con una facilidad al momento de su puesta en marcha y que su funcionamiento no requiera de mayor trabajo para que una persona lo pueda realizar.

Palabras clave: diseño, prototipo, hidrotornillo, generador.

Abstract

This project presents the development for the design and construction of a prototype for the generation of electric energy by means of the Archimedes screw principle, making use of a water flow available in a stream in the village of Punta Grande, municipality of Guachetá Cundinamarca.

This hydroscrew is designed to work with an available flow of 10 L/s and thus generate an electrical power of 10W. The study of this hydroscrew started from one of the basic needs faced by people today as it is the lack of connection to the energy supply to facilitate the development of daily activities, through scientific and technological knowledge of systems of transformation of hydraulic energy into mechanical energy and then into electrical energy with the help of a generator, an energy source is fed in this case a led lamp that allows lighting a certain place, through the selection of materials is carried out the construction of the structure that supports the hydroscrew allowing it to rotate freely in its support points. Being this a prototype characterized as a microturbine by its dimensions used is expected to have an ease at the time of its implementation and that its operation does not require more work for a person to perform.

Keywords: design, prototype, hydroscrew, generator.

Tabla de contenido

Introducción	15
1. Generalidades	16
1.1 Problemática.....	16
1.1.1 Condición energética del país	16
1.1.2 Problemáticas de cobertura.....	17
1.2 Justificación.....	18
1.3 Objetivo general	19
2. Marco Teórico	20
2.1 Principales componentes del hidrotornillo.....	20
2.1.1 Hidrotornillo tipo Arquímedes.	20
2.2 Análisis del hidrotornillo de Arquímedes	21
2.2.1 Medición de caudal.....	22
2.2.2 Ángulo de inclinación.....	23
2.2.3 Número de entradas del hidrotornillo	24
2.2.4 Velocidad de giro del tornillo sinfín.....	24
2.3 Generador eléctrico.	25
2.3.1 Instalaciones eléctricas de baja tensión	27
3. Estado del arte.....	29
3.1 Hidrotornillos presentes en el mercado mundial.....	29
3.2 Pico pica (proyecto 1)	29
3.3 Sinfín energy (proyecto 2).....	31
3.4 Hidrotor energy from water (Proyecto 3).....	33
3.5 HydroNI (proyecto 4).....	34
4. Especificaciones de diseño.....	36
4.1 Construcciones relevantes del hidrotornillo de Arquímedes.....	36
4.1.1 Enunciado básico del problema.	36
4.2 Funciones, requisitos de diseño y criterios de selección para un generador eléctrico con el principio de Arquímedes.....	36
4.2.1 Funciones del hidrotornillo.....	36
4.2.2 Requerimientos de diseño.....	36
4.2.3 Criterios de selección.....	37
4.3 Alternativas de diseño.	38
4.4 Descripción detallada de las alternativas presentadas.....	40
4.5 Caudal del río.	45
4.6 Medición de caudal de riachuelo.....	49
4.7 Potencia de diseño.....	52
5. Cálculos de geometrías.....	54
5.1 Geometrías principales de diseño.....	54
5.2 Ángulo de inclinación (θ).....	55
5.3 Número de entrada de hélices (N).....	56

5.4	Cálculos de geometrías.....	57
6.	Diseño constructivo del tornillo.	68
6.1	Cargas presentes en el tornillo sinfín.	68
6.2	Volumen y Peso de los componentes.....	69
6.3	Diagramas de cuerpo libre.....	76
6.4	Cálculo de reacciones y cargas presentes.....	78
6.5	Diagramas de momento flector y cálculo de ejes.....	86
6.6	Cálculo de los ejes.....	88
6.7	Selección de rodamientos.....	89
6.8	Análisis estático para la estructura que soportara el hidrotornillo.	95
6.8.1	Selección de material	96
6.8.2	Sujecciones y cargas	97
6.8.3	Cargas externas	99
6.8.4	Máxima tensión von mises.	102
6.8.5	Análisis de desplazamientos.	104
7.	Sistemas eléctricos del hidrotornillo.....	108
7.1	Selección del generador.	108
7.2	Selección de fusible y conductor eléctrico.....	113
7.3	Circuito eléctrico.....	117
8.	Resultados finales	119
8.1	Construcción del prototipo.....	119
8.2	Puesta en marcha.....	121
9.	Conclusiones	125
	Anexos	128

Lista de figuras

Figura 2-1	
Ilustración de un hidrotornillo.....	20
Figura 2-2	
Construcción básica de un motor síncrono.....	25
Figura 2-3	
Diagrama de pérdidas de un generador síncrono	26
Figura 3-4	
Micro generador hidráulico pico pica 10	30
Figura 3-5	
Generador hidráulico pico pica 500	30
Figura 3-6	
Central eléctrica sinfín barrera	32
Figura 3-7	
Central hidráulica jardín botánico de Gijón	32
Figura 3-8	
Turbina de generación fabricada por Hidrotor	34
Figura 4-9	
Alternativa 1, hidrotornillo con multiplicador de velocidad.....	38
Figura 4-10	
Alternativa 2, hidrotornillo sin multiplicador de velocidad.....	39
Figura 4-11	
Caudal comparado con altura de entrada de agua en función de la velocidad de giro.....	41
Figura 4-12	
Altura de entrada de agua.....	41
Figura 4-13	
Velocidad de giro en función del caudal	43
Figura 4-14	
Riachuelo Vereda Punta Grande.....	46
Figura 4-15	
Distancia entre punto A y B	47
Figura 4-16	
Ancho del río.....	47
Figura 4-17	
Profundidad del río	48
Figura 4-18	
Altura de entrada de agua.....	51
Figura 5-19	

Geometrías del tornillo	54
Figura 5-20	
Eficiencia dada por el ángulo de inclinación	55
Figura 5-21	
Eficiencia teórica descrita por el número de hélices y número de vueltas... 57	
Figura 5-22	
Relación de volumen de giro (λv) obtenida de los valores de λ relación de avance del tornillo y ρ relación de diámetro interior y diámetro exterior ... 59	
Figura 5-23	
Diámetro exterior D_o y diámetro interno D_i	60
Figura 5-24	
Paso del tornillo	62
Figura 5-25	
Longitud del tornillo con las hélices	63
Figura 5-26	
Ángulos de las hélices.....	65
Figura 5-27	
Ángulos de filo interno y externo de la hélice	65
Figura 6-28	
Geometrías de la hélice	69
Figura 6-29	
Eje hueco	71
Figura 6-30	
Tapa lateral inferior del eje hueco.....	73
Figura 6-31	
Tapa lateral superior del eje hueco.	74
Figura 6-32	
Diagrama de cuerpo libre de fuerzas distribuidas	77
Figura 6-33	
Diagrama de cuerpo libre fuerzas concentradas.....	78
Figura 6-34	
Diagramas de cuerpo libre en las coordenadas X y Y	86
Figura 6-35	
Diagrama de fuerza cortante	87
Figura 6-36	
Diagrama de momento flector	88
Figura 6-37	
Esquema de rodamientos en mm	91
Figura 6-38	
Cargas para los rodamientos NSK	93

Figura 6-39	
Estructura de soporte del hidrotornillo	95
Figura 6-40	
Geométrica fija platina inferior	97
Figura 6-41	
Geométrica fija platina superior.....	98
Figura 6-42	
Fuerza ejercida por el agua en el plano x a la platina inferior	99
Figura 6-43	
Fuerza ejercida por el agua en el plano x a la platina superior	100
Figura 6-44	
Peso ejercido del hidrotornillo en la platina inferior	101
Figura 6-45	
Peso ejercido del hidrotornillo en la platina superior.....	101
Figura 6-46	
Análisis de tensión platina inferior	102
Figura 6-47	
Análisis de tensión platina superior	103
Figura 6-48	
Análisis de desplazamientos platina inferior	104
Figura 6-49	
Análisis de desplazamientos platina inferior	105
Figura 7-50	
Motor síncrono	109
Figura 7-51	
Pruebas de velocidad en torno convencional.....	109
Figura 7-52	
Gráfica de voltaje del generador con carga de 10W.....	110
Figura 7-53	
Gráfica de voltaje del generador sin carga	112
Figura 7-54	
Lámpara led de 10W.....	112
Figura 7-55	
Plano circuito eléctrico	117
Figura 8-56	
Tornillo sinfín y estructura.	119
Figura 8-57	
Construcción de la estructura	119
Figura 8-58	
Construcción del tornillo sinfín	120

Figura 8-59
Puesta en funcionamiento..... ¡Error! Marcador no definido.

Figura 8-60
Voltaje generado..... 122

Figura 8-61
Corriente consumida por la lámpara 123

Figura 8-62
Puesta en funcionamiento..... 124

Listado de tablas

Tabla 3-1. Proyectos instalados por HydroNi.	35
Tabla 4-2. Matriz de decisión para alternativas de diseño.	44
Tabla 4-3. Tiempos tomados entre los puntos A y B.	50
Tabla 4-4. Medidas de ancho y profundidad del riachuelo.	50
Tabla 5-5: Parámetros de hélices más comunes.	58
Tabla 5-6. Parámetros de hélices más comunes.	61
Tabla 5-7. Condiciones del paso para el tornillo.	62
Tabla 6-8. Valores de dimensiones del tornillo sinfín.	68
Tabla:6-9. Fuerzas presentes en el tornillo sinfín.	77
Tabla 6-10. Área de contacto del agua con respecto al nivel de llenado.	81
Tabla 6-11. Factores de carga radial y de empuje, para rodamientos de una hilera de bolas y rodadura profunda.	90
Tabla: 6-12. Catálogo de rodamientos SNK.	90
Tabla 6-13. Duración recomendada para rodamientos.	92
Tabla 6-14. Tabla de propiedades físicas del material ASTM A36.	97
Tabla 7-15. Prueba del generador con carga de 10 W.	110
Tabla 7-16. Prueba del generador sin carga.	111
Tabla 7-17. Referencia de fusibles presentes en el mercado.	114
Tabla 7-18. Referencia de conductores según la instalación.	115

LISTADO DE SÍMBOLOS

Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	definición
Q	Caudal de agua disponible	m ³ /s	Ecuación 4-1
Ap	Área promedio del riachuelo	m ²	Ecuación 4-1
X	Ancho del riachuelo	m	Ecuación 4-2
h	Profundidad promedio del riachuelo	m	Ecuación 4-2
z	Distancia entre puntos	m	Ecuación 4-3
t	Tiempo de recorrido del agua	s	Ecuación 4-3
H	Altura del hidrotornillo	m	Ecuación 5-10
Pdis	Potencia de diseño	W	Ecuación 4-4
Pnom	Potencia nominal	W	Ecuación 4-4
T	Torque	N·mm	Ecuación 6-26
Ko	Factor de sobrecarga	Adimensional	Ecuación 4-4
Do	Diámetro exterior del tornillo	m	Figura 5-21
Di	Diámetro interno del tornillo	m	Figura 5-21
S	Paso de la hélice	m	Figura 5-21
L	Longitud del hidrotornillo	m	Figura 5-21
N	Número de entradas del tornillo	Adimensional	Número de hélices
n	Velocidad de giro	rpm	Ecuación 5-5
Ro	Radio exterior del tornillo	m	Ecuación 5-5
Di	Diámetro interno del eje hueco	m	Tabla 6-9
R1	Radio del eje interno	m	Tabla 6-9
Lhe	Longitud de las hélices	m	Tabla 6-9
La	Longitud del cojinete a	m	Tabla 6-9
Lb	Longitud del cojinete b	m	Tabla 6-9
e	Espesor de la hélice	m	Tabla 6-9
Lh	Longitud del eje hueco	m	Tabla 6-9
Wh	Peso del eje hueco	N	Ecuación 6-17
Whe	Peso de las hélices	N	Ecuación 6-15
Wa	Peso de cojinete a	N	Ecuación 6-19
Wb	Peso del cojinete b	N	Ecuación 6-20
Wt	Peso total de tornillo	N	Ecuación 6-22
Yc	Centroide	m	Tabla 6-11
Ac	Área de contacto con el agua	m ²	Tabla 6-11
Sx	Paso entre hélices	m	Ecuación 6-34
d	Diámetro de cojinetes	m	Ecuación 6-39
Fr	Carga Radial	N	Ecuación 6-37
x	Factor de carga radial	Adimensional	Ecuación 6-36
y	Factor de carga axial	Adimensional	Ecuación 6-36
Cor	Capacidad básica de carga estática	N	Ecuación 6-38
hin	Altura de entrada de agua	m	Figura 4-12
VI	Voltaje	V	Ecuación 6-44
Az	Reacción radial en el del eje a	N	Tabla 6-10
Ax	Reacción axial en el eje a	N	Tabla 6-10

Ay	Reacción radial del eje a	N	Tabla 6-10
Dt	Diámetro de la tapa lateral	m	Tabla 6-9
Lt	Longitud de la tapa lateral	m	Tabla 6-9
Vh	Volumen del eje hueco	m ³	Ecuación 6-14
Vhe	Volumen de la hélice	m ³	Ecuación 6-16
Va	volumen del eje a	m ³	Ecuación 6-18
Vb	volumen del eje b	m ³	Ecuación 6-20
Mb	Momento	N·mm	Ecuación 6-30
Sy	Resistencia ala fluencia	MPa	Ecuación 6-39
p	Carga equivalente	N	Ecuación 6-36
Fa	Carga axial	N	Ecuación 6-36
Cr	Carga básica dinámica	N	Ecuación 6-39
Fl	Factor por funcionamiento	Adimensional	Ecuación 6-39
Fn	Factor de velocidad	Adimensional	Ecuación 6-39
F.S.	Factor de diseño	Adimensional	Ecuación 6-40
I	Corriente	A	Ecuación 6-41
Da	Diámetro del eje a	m	Figura 6-30
Db	Diámetro del eje b	m	Figura 6-31
N	Factor de seguridad	Adimensional	Ecuación 6-39
Ib	Corriente de diseño del circuito	A	
In	Corriente nominal del fusible	A	
Iz	Corriente máxima admisible del conductor	A	
If	Corriente con la que funciona correctamente el fusible	A	
Pg	potencia del generador	W	Ecuación 6-44
Pl	Potencia de la lámpara	W	Ecuación 6-44
F.P	Factor de potencia	Adimensional	Ecuación 6-44

Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	definición
ϑ	Velocidad del agua	m/s	Ecuación 4-3
θ	Ángulo de inclinación	°	Figura 5-21
λv	Relación de volumen de giro	Adimensional	Ecuación 5-5
β	Ángulo de filo exterior	°	Figura 5-27
α	Ángulo de filo interior	°	Figura 5-27
ρ_a	Densidad del agua	Kg/m ³	Tabla 6-9
ρ_m	Densidad del material	Kg/m ³	Tabla 6-9
ρ	Relación de diámetro optimo	Adimensional	Tabla 5-7
σ_{material}	Limite elástico del material	MPa	Ecuación 6-40
$\sigma_{\text{diseño}}$	Esfuerzo permitido del diseño	MPa	Ecuación 6-40
λ	Relación de avance	Adimensional	Tabla 5-6

Introducción

En este documento se desarrolla el diseño de un sistema de generación eléctrica a partir de la realización de un hidrotornillo tipo Arquímedes, el cual hace uso de un caudal de agua para su funcionamiento, teniendo en cuenta el desarrollo de los cálculos que están enfocados al diseño y construcción para el posterior funcionamiento del tornillo sinfín se presentan algunas limitaciones de funcionamiento como lo es el caudal constante del riachuelo para que el hidrotornillo funcione de forma correcta. Capítulo a capítulo se muestra el desarrollo que se debe tener en cuenta para la selección de los componentes que se deben tener en cuenta para su correcta fabricación.

Este estudio tiene relevancia en el campo de la ingeniería mecánica y electromecánica, puesto que su implementación promueve la combinación de distintas áreas del conocimiento como la electricidad y la mecánica, en función de suplir una necesidad básica de acceso a energía eléctrica, aportando a la igualdad y prosperidad social al proveer un servicio básico a determinada comunidad, además su aplicación en el área investigada permite la generación y transformación de la energía mecánica a eléctrica.

En el respectivo desarrollo se enunciará los distintos componentes que hacen parte de este sistema de microgeneración y que se deben tener en cuenta para garantizar un correcto funcionamiento al momento de realizar la respectiva transformación de energía, no obstante, la selección de los materiales para la estructura de soporte se lleva a cabo teniendo en cuenta la disponibilidad en el mercado.

1. Generalidades

1.1 Problemática

1.1.1 *Condición energética del país*

Colombia es la sexta nación con una matriz de generación de energía limpia¹, con un 68% de capacidad instalada, de la cual el 85% de las fuentes de generación de energía son plantas eléctricas de fuentes renovables, aunque Colombia no cuenta con un 100% de cobertura eléctrica a nivel nacional, perjudicando a comunidades y personas que no se encuentran interconectadas con este servicio, inconveniente que las ha llevado a utilizar diferentes maneras de satisfacer esta necesidad básica por medio de la iluminación de veladoras, antorchas y hogueras dentro de las viviendas, mecheros a base de combustible, entre otros métodos que pueden repercutir en la salud y seguridad de las comunidades, debido a los gases arrojados como monóxido de carbono, dióxido de azufre, entre otros; según la Organización Mundial de la Salud (OMS), en el 2012 la exposición a las partículas de humo de leña o carbón causaron afecciones respiratorias y cardiovasculares a largo plazo, afectando a niños, ancianos y en especial a las mujeres que son quienes están mayor tiempo expuestas a estas partículas de humo².

¹ <https://www.acolgen.org.co/mapa-generacion/>. (s. f.). [Ilustración]. <https://www.acolgen.org.co/mapa-generacion/>

² NACIONES UNIDAS. (2012, 6 julio). Noticias ONU. <https://news.un.org/es/story/2012/07/1246581>

1.1.2 Problemáticas de cobertura

Suministrar electricidad a las poblaciones rurales más apartadas es un desafío, debido a las condiciones geográficas del país, es dispendioso instalar las redes eléctricas que atraviesan las distintas montañas de las principales cordilleras colombianas, sumado a esto, el conflicto armado que se vive dentro de los territorios apartados hacen que sea un poco más difícil interconectar las zonas rurales con las redes eléctricas de suministro de las principales hidroeléctricas, por lo que la instalación de estas redes eléctricas con estas características, implica altos costos de infraestructura y logística, que a largo plazo no sería viables para la electrificadora debido al bajo consumo que pueden tener estas comunidades alejadas.

En Colombia los departamentos que más sufren esta problemática de falta de energía son: Nariño, Chocó, Guajira y Cauca; si observamos detenidamente la geografía de estos departamentos encontramos que cuentan con una zona altamente montañosa y no poseen la infraestructura necesaria para llevar a cabo la construcción de una red eléctrica lejana, los habitantes de las zonas rurales de estos departamentos tiene que sortear día a día la falta de suministro energético, aunque algunas de estas comunidades tienen el servicio eléctrico a diario, otras solo cuentan con el servicio de manera intermitente y muchas más de estas comunidades no cuentan con este servicio; estas comunidades no se han familiarizado con los beneficios que se pueden tener al contar con energía eléctrica, la falta de este servicio causa efectos negativos en el ámbito social, ambiental, económico y de comunicación; repercutiendo su desarrollo, frente a las demás comunidades que cuentan con este servicio. Por otra parte, la falta de energía en los hogares dificulta las condiciones para que los jóvenes y niños puedan estudiar en mejores condiciones.

1.2 Justificación

El prototipo presentado en este documento se llevara a cabo de criterios desarrollados en artículos científicos que han aportado al desarrollo de la energía hidráulica sin afectar ecosistemas acuíferos; con la fabricación e implementación de este proyecto se pretende ayudar a las familias que cuentan con una fuente hídrica cercana a su lugar de vivienda, con el fin de que puedan tener una pequeña fuente de energía eléctrica y así suplir algunas necesidades básicas, como iluminación o comunicación; las cuales no son necesarias durante lapsos de tiempo prolongados, pero si pueden conllevar a una mejor calidad de vida para estos hogares que pueden llegar a utilizarlo en una determinada jornada, ahora bien existen condiciones climáticas que se suman a las dificultades propias de las zonas rurales, sus consecuencias han afectado parte de la población Colombiana, por lo cual este prototipo de generación permite fomentar el desarrollo sostenible y amigable con los ecosistemas donde se planean instalar, ya que para su puesta en marcha no es necesario realizar una intervención de gran envergadura, sino que, por el contrario, solo se debe garantizar una entrada de caudal de más o menos 10 L/s de agua al hidrotornillo.

En razón de lo antes expuesto, esta propuesta de prototipo se considera viable y necesaria, ya que permitirá el acceso a un servicio básico a una determinada comunidad, además se cuenta con el conocimiento y las herramientas para realizar dicho proyecto, promoviendo el posicionamiento de la universidad Antonio Nariño como una de las mejores universidades del país, al contar con un proyecto que está a la vanguardia no solo de las necesidades actuales del país, sino a la vanguardia del conocimiento, aportando al reto que tiene la Universidad como institución comprometida con los procesos de transformación positiva del país.

Así mismo, este prototipo es relevante para la Facultad de Ingeniería Mecánica, Electrónica y Biomédica, ya que representa un aporte a reconocimiento de alta calidad como facultad, por

medio de un proyecto que enlaza los conocimientos de la mecánica y la electricidad, haciendo uso de la transformación de energía, tomando un alto compromiso social y un reto de llevar electricidad a zonas apartadas con un sentido de ayuda e igualdad social.

1.3 Objetivo general

Diseñar y construir un prototipo de sistema de generación eléctrica de 10 W a partir de un hidrotornillo de Arquímedes.

Objetivos específicos

- Diseñar y construir el hidrotornillo de Arquímedes
- Diseñar y construir la estructura mecánica para soporte del hidrotornillo de Arquímedes.
- Seleccionar e instalar el generador eléctrico o motor síncrono de 5 a 20 w.
- Diseñar y construir el circuito eléctrico del sistema de generación.
- Determinar las condiciones de velocidad de flujo y profundidad de operación.
- Elaborar la documentación y planos que soportan el diseño y la construcción del prototipo.

2. Marco Teórico

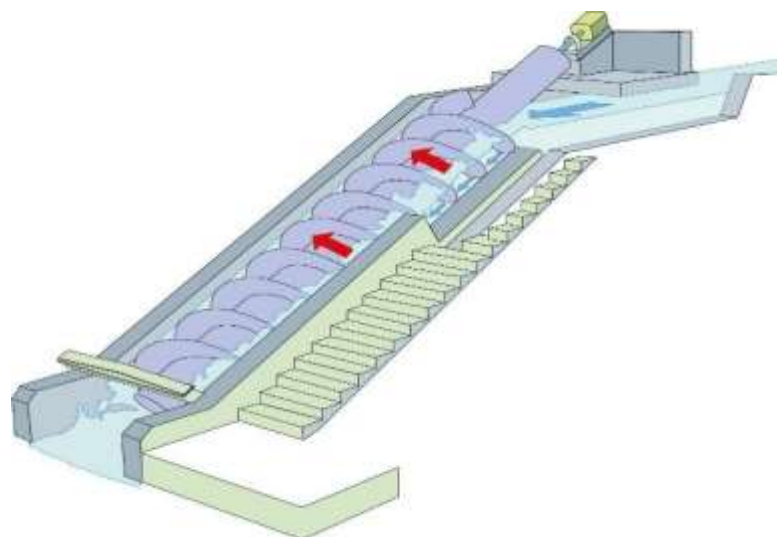
2.1 Principales componentes del hidrotornillo.

2.1.1 Hidrotornillo tipo Arquímedes.

El hidrotornillo de Arquímedes es una máquina hidráulica cuya función es transformar energía hidráulica en energía mecánica. Consta fundamentalmente de un tornillo que gira debido a la interacción del agua que fluye por gravedad a través de él, generando un par de torsión en las hélices del tornillo sinfín que al estar acoplado a un generador mediante un eje central convierte la energía mecánica en energía eléctrica³. (Figura 2-1).

Figura 2-1

Ilustración de un hidrotornillo



Fuente : Autor

³ Yoosef Doost, A., & Lubitz, W. D. (2020). Archimedes Screw Turbines: A Sustainable Development Solution for Green and Renewable Energy Generation—A Review of Potential and Design Procedures. *Sustainability*, 12(18), 7352. <https://doi.org/10.3390/su12187352>

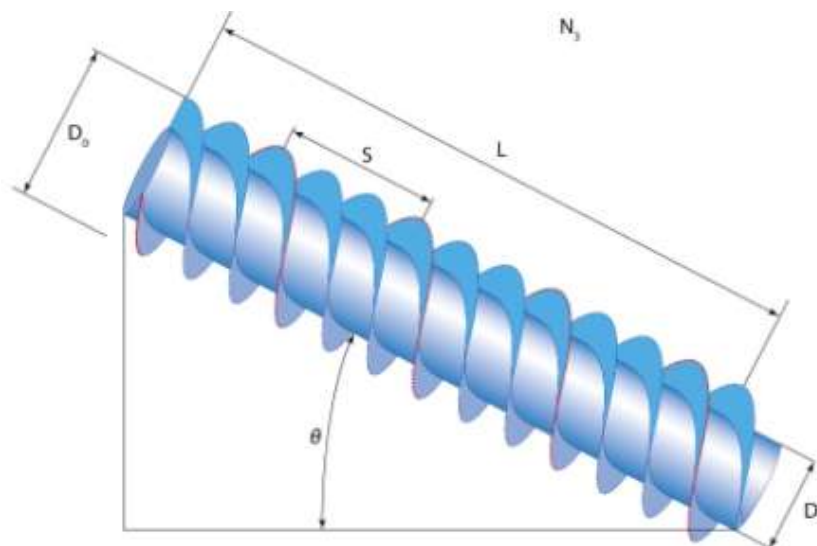
Los hidrotornillos realizan un trabajo creado entre las diferencias de presión de agua con las hélices, aunque no se clasifican como un mecanismo de impulso o reacción, estos hidrotornillos se clasifican en una tercera categoría la cual es considerada como máquinas de presión que tienden a ser estáticas, estos sistemas tienen mucho en común con las ruedas hidráulicas que cuentan con el mecanismo de transformación de energía mecánica a energía eléctrica, aparte de esto deben contar con un caudal que en ningún momento se disminuya totalmente, ya que estos sistemas de generación no almacenan energía eléctrica a menos que se le haga una instalación por aparte; en algunos puntos donde existen cambios drásticos de clima como de lluvias o época de sequía, se propone hacer un estudio previo a la instalación para garantizar que el caudal del río a vertedero no disminuya en su totalidad o en dado caso en época de lluvia previamente se pueda instalar un sistema de compuerta para que no se aumente considerablemente el caudal de agua y se puedan presentar daños en la estructura de soporte del hidrotornillo o algunos de sus componentes internos o externos.

2.2 Análisis del hidrotornillo de Arquímedes

Para el diseño y desarrollo del hidrotornillo de Arquímedes se analizan sus parámetros característicos como altura de salto de agua, caudal disponible, ángulo de inclinación y número de hélices. Con base en estos parámetros se determina la geometría del hidrotornillo: diámetro exterior, diámetro interior, paso del hidrotornillo, longitud del hidrotornillo y ángulo de las hélices, algunas de estas características demuestran en la Figura 2-2.

Figura 2-2

Geometrías del tornillo



Fuente: Autor.

Do: Diámetro exterior del tornillo [m].

Di: Diámetro interior del tornillo [m].

Θ : Ángulo de inclinación del hidrotornillo [°].

L: Longitud del tornillo[m].

N: Número de hélices del tornillo.

S: Paso de las hélices [m].

2.2.1 Medición de caudal

Uno de los principales parámetros que se debe tener en cuenta para el cálculo de las dimensiones del hidrotornillo es el caudal de agua disponible en el lugar de implementación del proyecto, para realizar la medición del caudal se hace uso del método del flotador donde se disponen en el riachuelo dos marcas fijas y paralelas entre sí, siendo perpendiculares al flujo con una distancia entre ellas de 1 metro o más y una trayectoria recta sin obstáculos. A mayor distancia entre las marcas A y B más precisa será la medida de los datos.

El caudal de agua está dado por la velocidad del fluido y el área promedio que se tiene en el riachuelo.

$$Q = A_p \cdot v \text{ Ecuación A}$$

2.2.2 Ángulo de inclinación

La eficiencia de un hidrotornillo en función del ángulo inclinación (θ) la cual está dada entre los 25° y 36° , donde se indica que a menor ángulo de inclinación la eficiencia aumenta, y a mayor ángulo de inclinación se hace más corto por lo cual su eficiencia disminuye y su velocidad aumenta, según experimentos realizados por Brada⁴. El ángulo de inclinación está asociado a la longitud del hidrotornillo y esto conlleva a tener un mayor o menor volumen de agua dentro de las hélices del hidrotornillo.

Teniendo en cuenta que el paso del tornillo sinfín (S) del tornillo sinfín se determina mediante los procedimientos descritos para bombas, los cuales son descritos por Nagel⁵ se debe tener en cuenta la medida del ángulo de inclinación de hidrotornillo para las siguientes condiciones.

$\theta < 30^\circ$	$S = 1.2 \cdot D_o$
$\theta = 30^\circ$	$S = D_o$
$\theta > 30^\circ$	$S = 0.8 \cdot D_o$

⁴ K. Brada (1999). Wasserkraftschnecke ermöglicht Stromerzeugung über Kleinkraftwerke [Hydraulic screw generates electricity from micro hydropower stations]. Maschinenmarkt Würzburg, Mitteilung 14, pp. 52–56.

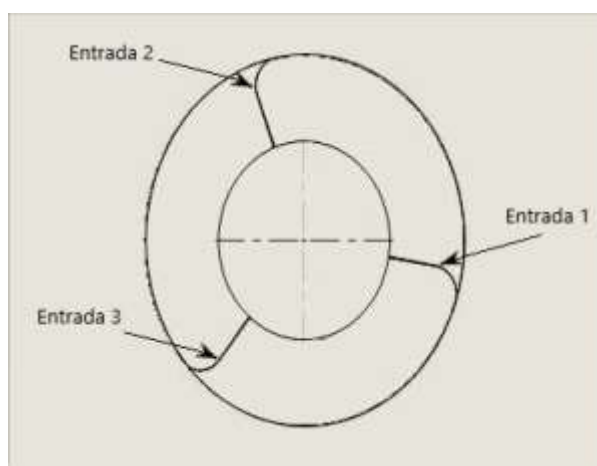
⁵ Fuente: Nagel, G., Ohg., R., - Ing, G. N. M., & Ritz-Pumpenfabrik OHG. (1968). Archimedian Screw Pump Handbook. RITZ-Pumpenfabrik OHG.

2.2.3 *Número de entradas del hidrotornillo*

El número de entradas del hidrotornillo está propuesto por Rorres donde indica que a medida que se aumenta el número de entradas en el hidrotornillo desde 1 hasta 5 su eficiencia aumenta, pero se debe tener presente que a partir de 5 su eficiencia no aumenta de una forma considerable, también es necesario destacar que para fabricar un tornillo sinfín de más de entradas se torna complejo y costoso por la cantidad de material que se debe utilizar.

Figura 2-3

Entradas de agua en el hidrotornillo



Fuente: Autor.

2.2.4 *Velocidad de giro del tornillo sinfín*

La velocidad de giro depende del caudal disponible en el riachuelo, el ángulo de inclinación, el diámetro externo del tornillo sinfín y la relación de volumen de giro, esta ecuación está descrita por Rorres⁶ la cual se muestra a continuación.

⁶ Nuernbergk, D. M., & Rorres, C. (2013). Analytical Model for Water Inflow of an Archimedes Screw Used in Hydropower Generation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(2), 213–220

$$n = \frac{Q \cdot 60 \cdot \tan \theta}{2 \cdot \pi^2 \cdot R_o^3 \cdot \lambda v} \text{ Ecuación B}$$

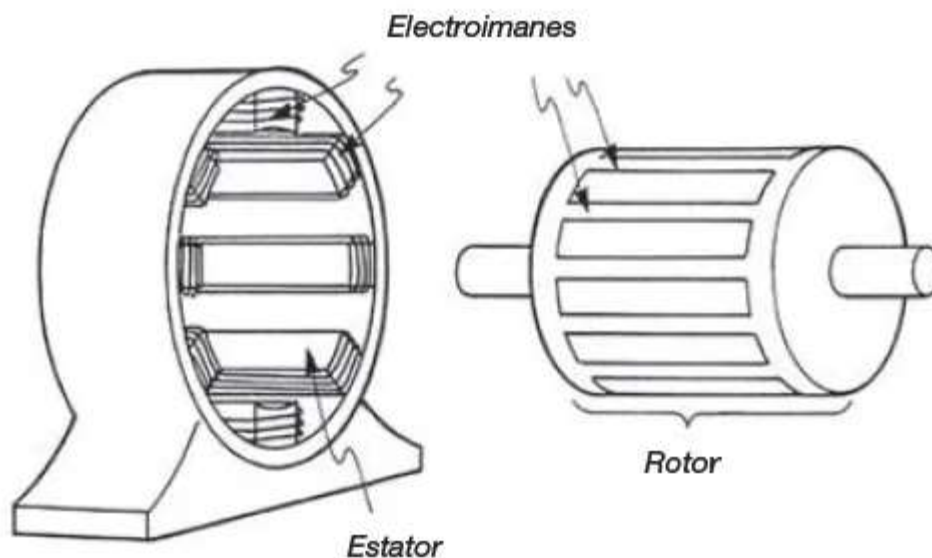
2.3 Generador eléctrico.

Cuando se utilizan los motores síncronos como generadores eléctricos siempre se acoplan a un sistema de generación de potencia como lo puede ser una turbina hidráulica, motores de combustión interna, máquinas gravitacionales (en este caso un hidrotornillo con principio de Arquímedes), la selección del generador se explica con detalle en los capítulos 6 y 7. Por lo tanto, los motores síncronos se pueden utilizar como generadores de electricidad, ya que por medio de sus electroimanes crean un campo magnético el cual gira a la misma velocidad que el rotor del motor y de este modo transforman la energía mecánica que le llega en energía eléctrica, la frecuencia eléctrica que se produce se sincroniza con la velocidad de rotación que se suministra por el eje que se encuentra acoplado desde el tornillo de Arquímedes en este caso⁷, los motores síncronos presentan dos tipos de devanados: uno de ellos es el devanado del inductor el cual está enrollado en las ranuras presentes en el estator el cual forma los electroimanes, el otro devanado es el que se encuentra presente en el rotor, (Figura 2-4).

Figura 2-4

Construcción básica de un motor síncrono

⁷ Chapman, S. J. (2012). maquinas eléctricas. En *máquinas eléctricas* (5.ª ed., Vol. 1, pp. 147–159). McGraw-Hill Education.



Fuente: Formación para la Industria 4.0. (2021, 11 junio). Motores Síncronos. | Formación para la Industria 4.0. Formación para la Industria 4.0 | Cursos gratuitos y online para la Industria. Instalador electricista, Autómatas y Robótica.

Como la frecuencia está ligada al número de polos y a la velocidad de rotación del tornillo, la podemos expresar mediante la siguiente ecuación:

$$f = \frac{\eta m \cdot p}{120} \text{ Ecuación C}$$

Donde:

f = Frecuencia que se planea trabajar.

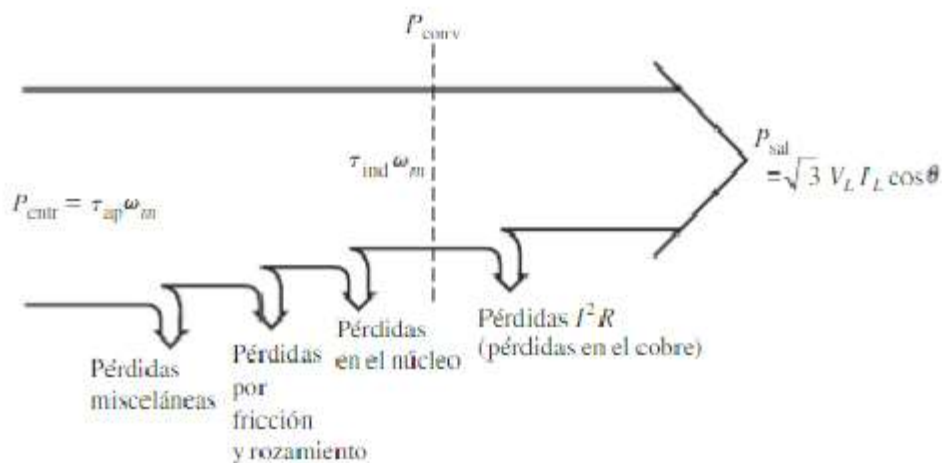
ηm = Velocidad de rotación.

p = Número de polos a utilizar.

Como no toda la potencia que genera la máquina es trasladada hasta el generador síncrono, se tienen ciertas pérdidas, las cuales se observan en la siguiente figura. (Figura 2-5).

Figura 2-5

Diagrama de pérdidas de un generador síncrono



Fuente: Chapman, S. J. (2012a). Diagrama de flujo de potencia de un generador síncrono [Grafico]. En máquinas eléctricas (5.a ed., p. 157).

2.3.1 Instalaciones eléctricas de baja tensión

Teniendo en cuenta la normatividad RETIE para la instalación eléctrica se deben tener en cuenta parámetros externos que puedan afectar el correcto funcionamiento del circuito o que pueda llegar a poner en riesgo la integridad humana, es por eso que se hace uso de ciertos parámetros como lo son: análisis de riesgos de origen eléctrico, cálculos de protecciones para sobretensiones o sobrecorrientes, cumplimiento de distancias de seguridad, ubicación del lugar donde será instalado el prototipo, ya que esto influye a que condiciones ambientales será sometido el circuito eléctrico.

Las condiciones ambientales influyen directamente en el correcto funcionamiento y en la durabilidad de los componentes, esta normatividad está descrita por la guía de protección⁸ y sus numerales describen el nivel de sólidos o agua que puede entrar en contacto según sus componentes

⁸ Novelec, E. G. (2020, 10 abril). *Estándares de protección IP y NEMA – Guía práctica*. Grupo Novelec. <https://blog.gruponovelec.com/electricidad/estandares-de-proteccion-ip-y-nema-guia-practica/#:%7E:text=El%20sistema%20de%20clasificaci%C3%B3n%20IP,o%20el%20C3%ADquidos%20como%20el%20agua.>

por tal motivo es tan importante el estudio de los mismos y su grado de contacto con el agua y el polvo por ser un prototipo expuesto a condiciones de intemperie.

3. Estado del arte.

3.1 Hidrotornillos presentes en el mercado mundial

Para el estudio del hidrotornillo es necesario revisar algunos dispositivos que se encuentran actualmente en el mercado y que últimamente se han utilizado con mayor frecuencia a partir del año 2010 en adelante, esto debido a la iniciativa de nuevas empresas para apoyar el cuidado ambiental y el desarrollo de energías renovables, a continuación, se presenta una breve descripción de los proyectos más relevantes.

3.2 Pico pica (proyecto 1)

El pico pica es un prototipo de generación de energía⁹, donde haciendo uso de pequeñas corrientes de agua se logra producir la suficiente energía necesaria para que funcione una pequeña lámpara de iluminación de 4 W, teniendo en cuenta que si se hace una variación en las características de fábrica se logra tener una mayor generación de energía y por ende se han desarrollado dos prototipos; pico pica 10, (Figura 3-5) y pico pica 500, (Figura 3-6).

Estos prototipos desarrollados a partir del año 2011 en la ciudad de Ena, ubicada en la región de Gifu - Japón, tiene como objetivo la generación de energía con pequeñas corrientes de agua; el pico pica 10 por ser un prototipo pequeño¹⁰, con medidas aproximadas de un metro a lo largo de su carcasa y un ancho de 28 centímetros lo hacen fácil de manipular y transportar a lugares

⁹ Renewable energy: Micro hydraulic power unit (spiral type Pico-Hydro unit “PicoPica10”, “PicoPica500”). (s. f.). United Nations Industrial Development Organization. http://www.unido.or.jp/en/technology_db/5276/

¹⁰ Generador de energía hidráulica ultra pequeño. (2019, 15 mayo). [Vídeo]. YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=PrwykucbCF0>

educativos donde se busca concientizar a los niños y jóvenes sobre mejores métodos de generación de energía sin que el medio ambiente sufra cambios drásticos que lo puedan afectar.

Figura 3-5

Micro generador hidráulico pico pica 10



Fuente: Japan Video Topics - español. (2019, 15 mayo). Generador de energía hidráulica ultra pequeño. You Tube.
<https://www.youtube.com/watch?v=PrwykucbCF0&t=137s>

El pico pica 500 utiliza el mismo sistema de generación del pico pica 10, a diferencia que este ya es utilizado para generación de energía en lugares a mayor escala, teniendo en cuenta que es fabricado con mayores dimensiones, le facilita la circulación de peces dentro del hidrotornillo, con esto se planea que sea amigable con los ecosistemas donde se instala.

Figura 3-6

Generador hidráulico pico pica 500



Fuente: UNIDO ITPO Tokio. (2019, 1 febrero). Pico Pica 500 in operation. YouTube.
<https://www.youtube.com/watch?v=9nkQES3QdZY>

3.3 Sinfín energy (proyecto 2).

Esta empresa europea especializada en energías renovables presenta entre su gama de proyectos la línea de centrales eléctricas de generación de energía basada en el principio de Arquímedes, siendo una de las tecnologías de generación hidráulica con eficiencias de hasta 90% esto debido a su forma lineal, compacta y de fácil adaptación a los diferentes caudales de los ríos permitiendo diseños óptimos de funcionamiento¹¹.

Sinfín Energy instaló una central hidráulica con dos hidrotornillos paralelos¹², (Figura 3-7), ubicados en la planta industrial de Solvay España, con el principal objetivo de vender electricidad a la red y poder realizar proyectos experimentales; los dos hidrotornillos son capaces

¹¹ Sinfín Energy | La energía hidráulica desde la naturaleza. (2020, 9 noviembre). Sinfín Energy. <http://www.sinfinenergy.com/>

¹² Hidrotornillo | Sinfín Energy | Turbina hidráulica de micro-generación. (2020, 6 febrero). Sinfín Energy. <http://www.sinfinenergy.com/hidrotornillo/>

de producir 70 kW de potencia en una altura de caída de agua de 2 metros y un caudal de 5 metros cúbicos por segundo, estos hidrotornillos cuentan con un sistema que le permite a los peces descender con facilidad sin sufrir afectaciones.

Figura 3-7

Central eléctrica sinfín barrera



Fuente: Sinfín Energy. (2020, 11 noviembre). Central Hidráulica Sinfín Barrera: ¿Cómo se produce la entrada de agua en los tornillos? (vídeo 7). YouTube. <https://www.youtube.com/watch?v=FtBt5otqqyM>.

Sinfín Energy también instaló una central hidráulica de generación, (Figura 3-8), con ayuda del Jardín Botánico de Gijón y la Universidad de Oviedo, en este jardín botánico se necesitaba energía para alimentar un sistema de ultrasonido para el mantenimiento de la laguna, se instaló un hidrotornillo capaz de entregar una potencia de 12 kW. Aparte de esto se instalaron otros sistemas de generación para tener un mayor suministro de energía.

Figura 3-8

Central hidráulica jardín botánico de Gijón



Fuente: Hidrotornillo | Sinfin Energy | Turbina hidráulica de micro generación. (2020, 6 febrero). Sinfin Energy. <http://www.sinfinenergy.com/hidrotornillo/>.

3.4 Hidrotor energy from water (Proyecto 3)

Hidrotor es una empresa española comprometida con la fabricación de sistemas de generación eléctrica, su principal proyecto fue elaborado en Austria- España donde se suministró a un hotel energía renovable y limpia, esta empresa cuenta con un banco de pruebas en Gijón Austria España¹³.

Una de sus principales turbinas de generación hidráulica donde se aprovecha una caída de agua para generar energía eléctrica totalmente limpia, (Figura 3-9), está capacitada para generar entre los 5 kW y 200 kW según condiciones de instalación y dimensiones del hidrotornillo, como lo indica Hidrotor se puede adaptar una turbina con un salto de agua entre los 5 y 6,5 metros y un

¹³ Hidrotor. (2019, 19 noviembre). HIDROTOR © - estación de producción de energía limpia. Hidrotor | Turbina hidráulica de micro-generación de energía. <https://www.hidrotor.com/>

caudal aproximado de 4 metros cúbicos por segundo se alcanzarían a producir 100 kW, lo suficiente como para el abastecimiento básico de 25 hogares.

Figura 3-9

Turbina de generación fabricada por Hidrotor



Fuente: Begráfika Diseño y Publicidad. (2018, 31 mayo). HIDROTOR. YouTube.

<https://www.youtube.com/watch?v=q8kowwZbIk8&t=190s>.

3.5 HydroNI (proyecto 4)

HydroNI empresa de Reino Unido está dedicada a la generación de energía eléctrica, esta empresa desarrolla proyectos de ingeniería en lugares donde se cuenta con altas caídas de agua y se pueden instalar turbinas Pelton, en caídas de agua medianas se utilizan turbinas de flujo cruzado y en caídas de agua bajas se implementan turbinas Kaplan y tornillo de Arquímedes esto debido a que la altura de caída de agua no supera los 30 metros como lo es el hidrotornillo tipo Arquímedes. La empresa HydroNI ha instalado 3 importantes proyectos que se detallan a continuación en la siguiente tabla.

Tabla 3-1.**Proyectos instalados por HydroNi.**

Nombre del proyecto	Potencia	Ubicación	Características
Carncairn Hydro	20 [kW]	Irlanda del norte, broughsane	salto de agua: 5,7 m caudal: 538 l/s primer hidrotornillo instalado en Irlanda del norte
Balliwvey Hydro	34 [kW]	Irlanda del norte, River Bann	salto de agua: 1,45 m caudal: 3100 l/s en este proyecto se desvío el río River Bann y construcción piscina para peces
Whitehill Hydro	54 [kW]	Irlanda del norte; Garvagh	salto de agua: 2,58m caudal: 2800 l/s

Fuente: HydroNI - Case Studies. (s. f.).

<http://www.hydroNi.co.uk/Case%20Study%2020%20kW%20Archimedes%20Screw.html>. Recuperado 8 de septiembre de 2021, de <http://www.hydroNi.co.uk/Case%20Study%2020%20kW%20Archimedes%20Screw.htm>

4. Especificaciones de diseño.

4.1 Construcciones relevantes del hidrotornillo de Arquímedes.

4.1.1 Enunciado básico del problema.

Este trabajo aborda gran importancia al subsanar una de las necesidades de la sociedad, la energía eléctrica tiene un costo y una cobertura a nivel nacional, pero aun así para lugares remotos a ciudades o pueblos que carecen de este servicio donde no tienen cobertura o un servicio intermitente implicando la conectividad de las personas y recurriendo a métodos de iluminación como velas en horas de la noche complicando la productividad de las personas y ocasionando problemas de salud.

4.2 Funciones, requisitos de diseño y criterios de selección para un generador eléctrico con el principio de Arquímedes.

4.2.1 Funciones del hidrotornillo.

A continuación, se muestran las funciones más relevantes del hidrotornillo de Arquímedes.

1. El tornillo sinfín recibe la potencia hidráulica de un fluido en movimiento (agua).
2. Transforma energía del fluido en energía mecánica haciendo uso del tornillo.
3. Generar la suficiente energía para encender una lámpara de 10 w.

4.2.2 Requerimientos de diseño.

Se presentan una serie de parámetros los cuales se deben tener en cuenta para los cálculos de diseño y posteriormente la fabricación del hidrotornillo de Arquímedes, el diseñador deberá tomar ciertas decisiones según las condiciones del lugar donde se planea instalar y llevar a cabo su funcionamiento.

1. La potencia eléctrica nominal generada por el hidrotornillo debe ser de 10 W
2. Se ha estudiado un pequeño riachuelo en el Departamento de Cundinamarca, municipio de Guachetá, Vereda Punta Grande, donde el caudal de agua se evalúa a detalle en el numeral 4.5, posteriormente se tiene como resultado un caudal de 0.01 m³/s; también se explica cómo mediante una pequeña intervención se logra determinar este caudal necesario para el correcto funcionamiento de este hidrotornillo.
3. El salto de agua se dimensiona mediante las características especificadas en el siguiente capítulo en el numeral 1 donde se tiene en cuenta la profundidad del riachuelo.
4. La inclinación del tornillo de Arquímedes brinda un mejor desempeño por lo cual debe oscilar entre los 25° y 36°, en el siguiente capítulo se explica a detalle la selección de este ángulo.
5. Se estima un número de entradas al hidrotornillo igual a 3 por temas de costos y adecuado funcionamiento.

4.2.3 Criterios de selección

Los siguientes criterios se dan de acuerdo a consultas realizadas en artículos científicos, simulaciones hechas a diferentes prototipos y fabricaciones sobre este tipo de hidrotornillo.

Seguridad: El hidrotornillo debe trabajar bajo medidas de seguridad debido a que genera electricidad y los sistemas eléctricos no deben estar en contacto con el agua para no exponer a las personas cercanas al hidrotornillo.

Costo: Se plantea que sea económico de desarrollar por sus sencillos componentes.

Tamaño: Debe contar con un tamaño y peso moderado, ya que se planea mover por una sola persona y ser acorde a las condiciones del riachuelo.

Confiabilidad: No presentar fallas y funcionamiento correcto por un lapso de tiempo largo.

Mantenimiento: Intervención mínima, mantenimiento periódicamente largo, fácil de ensamblar y transportar.

Operación: Al momento de entrar en funcionamiento de bajo ruido y no presente vibraciones excesivas.

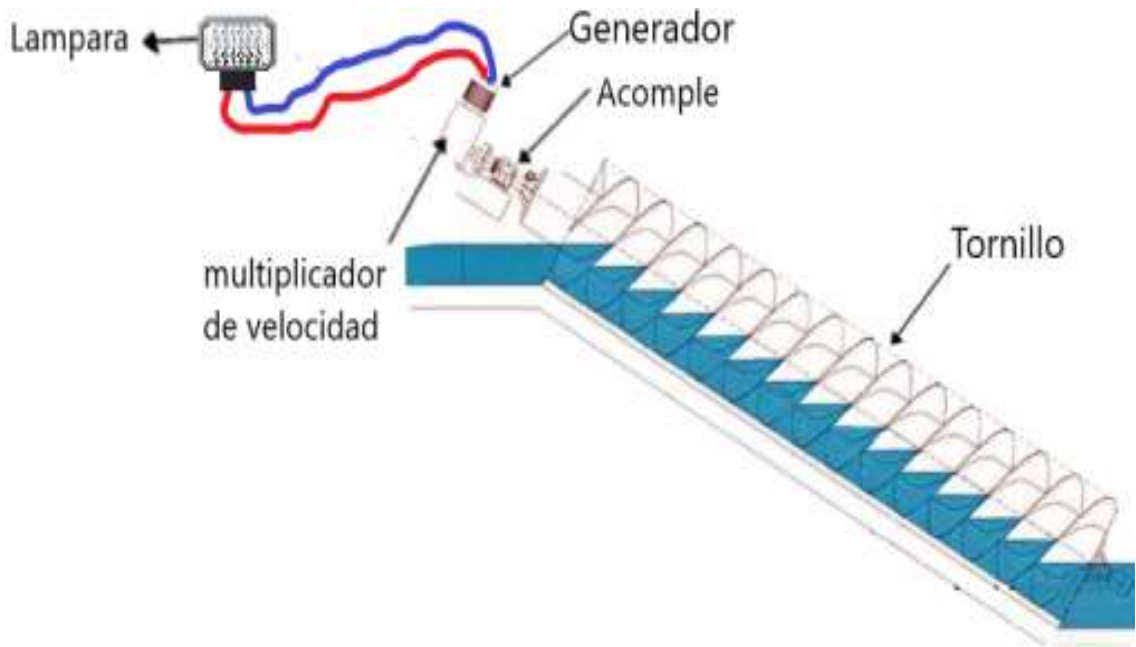
4.3 Alternativas de diseño.

Se proponen dos alternativas de tipos de hidrotornillo de Arquímedes donde posteriormente se tiene en cuenta sus características y cuáles se asemejan a los requerimientos de diseños mencionados anteriormente.

A continuación, (Figura 4-9) se muestra un hidrotornillo de Arquímedes en el cual el fluido en movimiento del riachuelo ejerce su acción y pone en movimiento de rotación el tornillo de Arquímedes, donde con ayuda de un multiplicador de velocidad acoplado al eje principal del tornillo sinfín se propone aumentar la velocidad de rotación antes de llegar al generador eléctrico.

Figura 4-11

Alternativa 1, hidrotornillo con multiplicador de velocidad

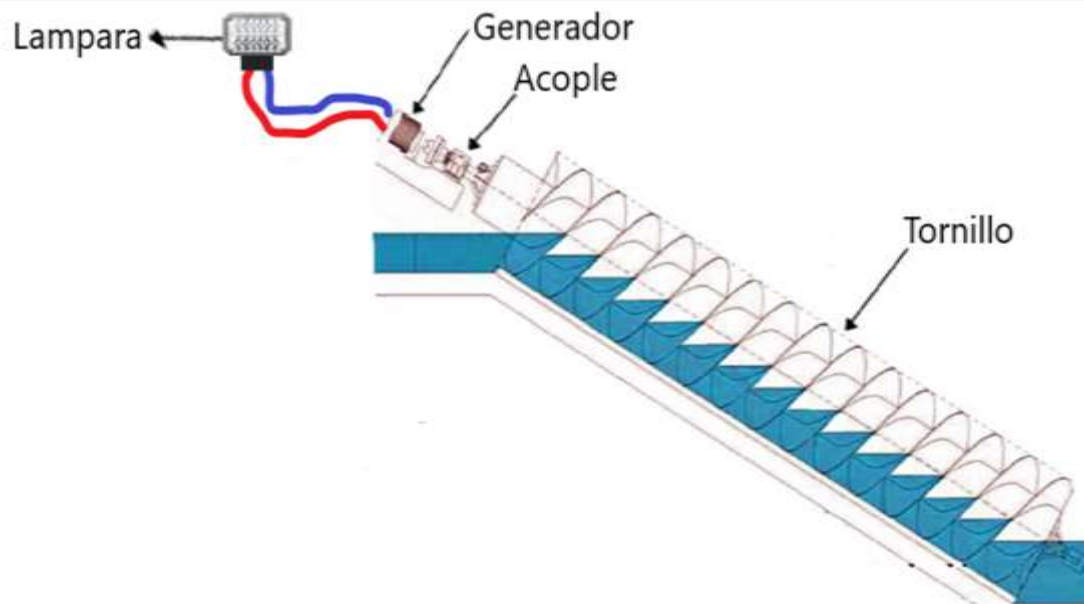


Fuente: Lubitz, W. D. (Ed.). (2014). Gap flow in archimedes screws. CSME International.

Posteriormente (Figura 4-12), se propone un hidrotornillo de Arquímedes donde cuenta con el mismo funcionamiento y a diferencia del anterior, este no cuenta con un multiplicador de velocidad, sino que, por el contrario, el eje de salida del tornillo sinfín estará acoplado directamente al eje del generador eléctrico el cual gira a la misma velocidad de rotación del tornillo sinfín.

Figura 4-12

Alternativa 2, hidrotornillo sin multiplicador de velocidad



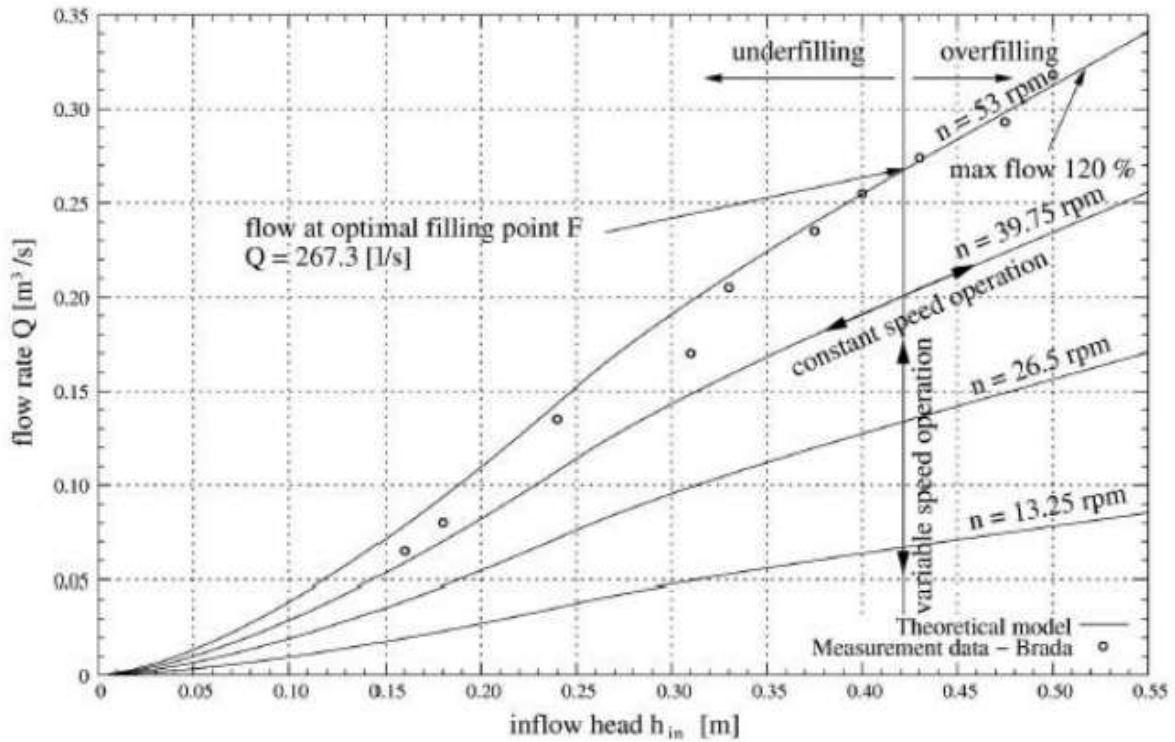
Fuente: Lubitz, W. D. (Ed.). (2014). Gap flow in archimedes screws. CSME International.

4.4 Descripción detallada de las alternativas presentadas.

Alternativa 1: Este modelo de hidrotornillo es utilizado en caudales a partir de $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ y saltos de agua superiores a 1 m de altura, generando bajas velocidades de giro y un alto torque. En estos hidrotornillos se implementan multiplicadores de velocidad, donde los tornillos sinfín presentan velocidades de giro, bajas pero generan un alto torque, mientras que en el eje del generador se verá reflejada una alta velocidad, pero un bajo torque esto por el uso del multiplicador de velocidad, usualmente la velocidad de giro en el eje de entrada del alternador convencional es superior a las 1500 rpm, estas velocidades de giro son comunes en alternadores y generadores de energía usados comúnmente. En la Figura 4-13 se mostrarán gráficamente los estudios realizados por Rorres 2013, en esta alternativa se implementa un alternador convencional que necesariamente tendrá un multiplicador de velocidad para así entregar al alternador la velocidad de giro necesaria a más de 1500 rpm.

Figura 4-13

Caudal comparado con altura de entrada de agua en función de la velocidad de giro

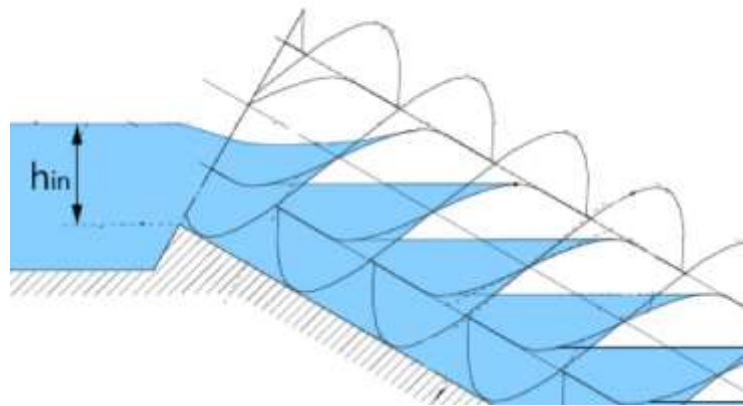


Fuente: Nuernbergk, D. M., & Rorres, C. (2013). Analytical Model for Water Inflow of an Archimedes Screw Used in Hydropower Generation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(2), 213–220

Para tener presente la figura 4-13, se debe tener en cuenta la entrada de agua (h_{in}) mostrada en la figura 4-14.

Figura 4-14

Altura de entrada de agua



Fuente: Nuernbergk, D. M., & Rorres, C. (2013). Analytical Model for Water Inflow of an Archimedes Screw Used in Hydropower Generation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(2), 213–220

Analizada la figura 4-11, se entiende que con un mayor caudal la velocidad de giro es baja, debido a su altura de entrada y geometría del tornillo con base en los estudios realizados por Rorres 2013¹⁴

$$n_1 \downarrow \cdot T_1 \uparrow = n_2 \uparrow \cdot T_2 \downarrow$$

Donde:

Entrada del multiplicador de velocidad

$n_1 \downarrow$ = Baja velocidad de giro entregada al multiplicador por el tornillo.

$T_1 \uparrow$ = Torque alto entregado al multiplicador por el tornillo.

Salida del multiplicador de velocidad

$n_2 \uparrow$ = Alta velocidad del multiplicador entregada al alternador convencional.

$T_2 \downarrow$ = Bajo torque del multiplicador entregado al alternador convencional.

¹⁴ Nuernbergk, D. M., & Rorres, C. (2013). Analytical Model for Water Inflow of an Archimedes Screw Used in Hydropower Generation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(2), 213–220

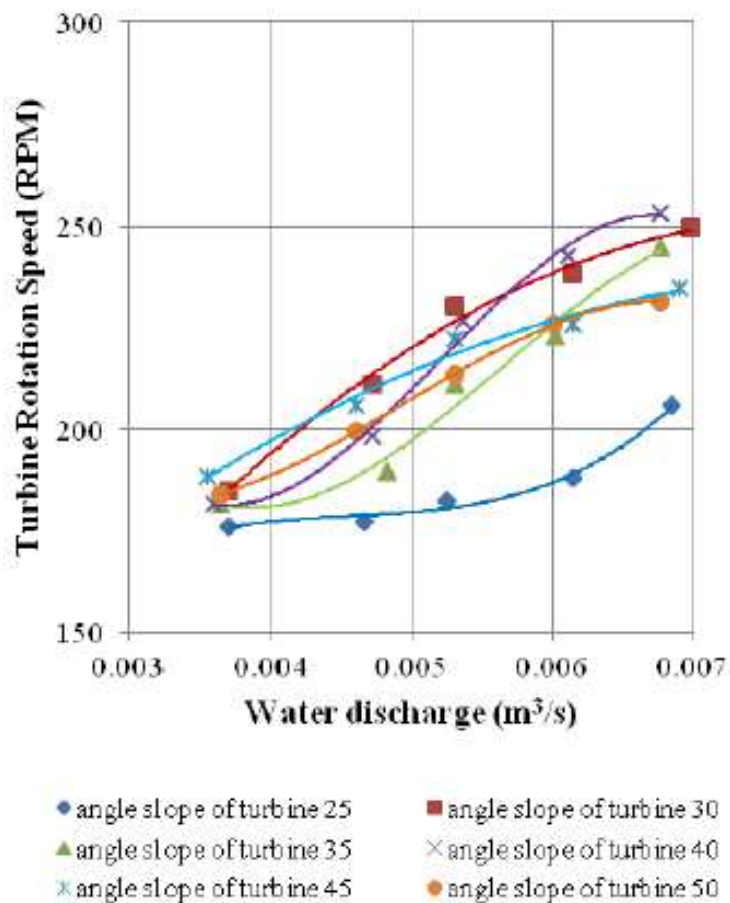
Con lo mencionado anteriormente la velocidad de giro n_1 a la entrada del multiplicador de velocidad es baja velocidad, pero con un alto torque T_1 esto permite utilizar un multiplicador de velocidad que en la salida entregue al alternador convencional una velocidad de giro n_2 alta y por consiguiente un bajo torque T_2 , siendo así la implementación de cajas de velocidades en ríos con grandes caudales.

Alternativa 2: En la figura 4-12, se plantea una alternativa en la que el alternador se acoplara directamente al tornillo, con base en a la investigación realizada en documentos, los hidrotornillos pequeños¹⁵ no presentan multiplicadores de velocidad de giro, en caudales desde los 0.0035 m³/s a caudales de 0.03 m³/s, el rango de velocidades desde 170 rpm a 255 rpm. En la figura 4-15 muestra curvas de características de velocidad de giro con caudal disponible y estudio de los diferentes ángulos en la inclinación del tornillo. Se evidencia que a mayor caudal mayor velocidad de giro, cabe aclarar que las dimensiones del tornillo son mucho menores a las que se presentan en la alternativa 1.

Figura 4-15

Velocidad de giro en función del caudal

¹⁵ YoosefDoost, A., & Lubitz, W. D. (2020). Archimedes Screw Turbines: A Sustainable Development Solution for Green and Renewable Energy Generation—A Review of Potential and Design Procedures. *Sustainability*, 12(18), 7352.



Fuente Bambang Yulistiyanto, Yul Hizhar, & Lisdiyanti. (2012). EFFECT OF FLOW DISCHARGE AND SHAFT SLOPE OF ARCHIMIDES (SCREW) TURBIN ON THE MICRO-HYDRO POWER PLANT. *dinamika TEKNIK SPIPIL*, 12(1).

En la tabla 4-3 se evalúan los criterios de selección teniendo en cuenta requerimientos de diseño y funciones para las dos alternativas presentadas. Donde se toma 10 como nivel más favorable y 1 el menos favorable.

Tabla 4-2.

Matriz de decisión para alternativas de diseño.

	Seguridad	Costo	Tamaño	Confiabilidad	Mantenimiento	Operación	Rango
Factor de ponderación	0,15	0,2	0,3	0,15	0,1	0,1	1,0
Alternativa 1	8 1.2	6 1.2	9 2.7	7 1.05	5 0.5	7 0.7	7,35
Alternativa 2	8 1.2	10 2	9 2.7	10 1.5	9 0.9	9 0.9	9,2

Fuente: Autor

Teniendo en cuenta las alternativas mencionadas anteriormente, tiene mejor viabilidad la alternativa 2 donde el eje del tornillo sinfín se acopla directamente al generador. Según estudios realizados¹⁶ se determina una velocidad de rotación entre las 200 rpm y 300 rpm tomando así para este proyecto una velocidad de giro promedio de 250 rpm, esto basado en la figura 4-15 que se muestra anteriormente.

Esta velocidad de giro se tiene en cuenta para los cálculos del siguiente capítulo donde se detallan las geometrías principales del hidrotornillo.

4.5 Caudal del río.

Para diseñar el hidrotornillo se evalúa las condiciones del lugar, donde se pretende emplear está micro turbina teniendo en cuenta la caída de agua y caudal disponible.

El lugar escogido es un riachuelo que está ubicado en el Departamento de Cundinamarca, municipio de Guachetá, Vereda Punta Grande, como se muestra en la figura 4-16. Se propone la intervención de este riachuelo represando el agua con lonas fáciles de manipular para que su nivel

¹⁶ Bambang Yulistiyanto, Yul Hizhar, & Lisdiyanti. (2012). EFFECT OF FLOW DISCHARGE AND SHAFT SLOPE OF ARCHIMIDES (SCREW) TURBIN ON THE MICRO-HYDRO POWER PLANT. *dinamika TEKNIK SPIPIL*, 12(1).

aumente a un punto deseado y posteriormente se canalice al hidrotornillo sin generar desviaciones del caudal que puedan llegar afectar el sustento de agua a fincas para sus diferentes propósitos mientras se estén haciendo las respectivas pruebas de funcionamiento, posteriormente se retiran las lonas y se deja el riachuelo con las condiciones que se encontró.

Figura 4-16

Riachuelo Vereda Punta Grande



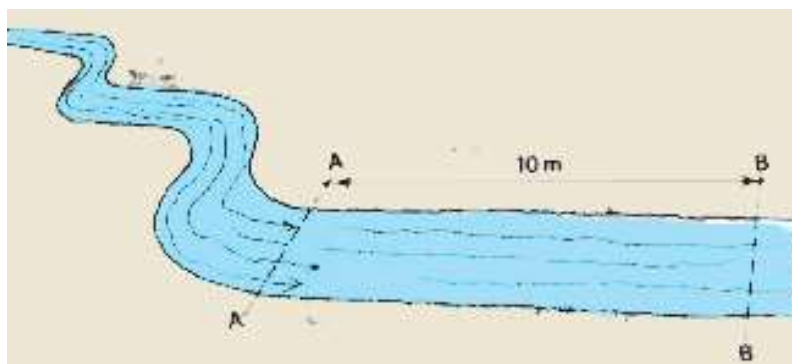
Fuente: Autor.

En la medición del caudal del riachuelo se utilizó el método del flotador, el cual se emplea para medir caudales en pequeños y grandes ríos, donde estos mismos tienen caudales tranquilos y de poca turbulencia.

Al realizar la medición del caudal por el método del flotador se disponen en el riachuelo dos marcas fijas y paralelas entre sí, siendo perpendiculares al flujo con una distancia entre ellas de 1 metro o más. A mayor distancia entre las marcas A y B, más precisa será la medida del tiempo entre ellas como se muestra a continuación (Figura 4-17).

Figura 4-17

Distancia entre punto A y B

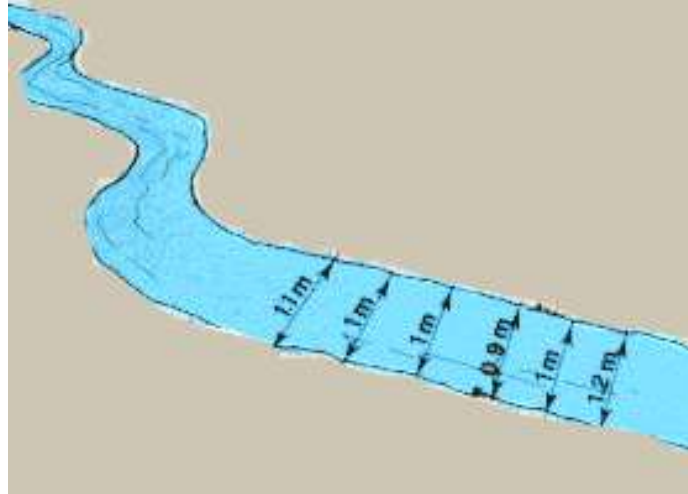


Fuente: Food and agriculture organization of the United Nations. (s. f.). www.fao.org. Recuperado 7 de marzo de 2022, de https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6705s/x6705s03.htm

Se dispone de un trayecto casi recto en el río donde el mismo debe estar limpio de plantas o rocas que puedan obstruir el flotador y afectar la medición del mismo. Para determinar la velocidad media del agua se emplea el flotador, en este caso una pelota de plástico, se suelta en la primera marca situada en lo más central del mismo, siendo cronometrada para tener el tiempo que transcurre en llegar a la segunda marca. Se mide el ancho del río dentro de las marcas puestas A y B como se muestra en la figura 4-18 y después se mide la profundidad del río como se observa en la figura 4-19.

Figura 4-18

Ancho del río



Fuente: Food and agriculture organization of the United Nations. (s. f.). www.fao.org. Recuperado 7 de marzo de 2022, de https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6705s/x6705s03.htm

Figura 4-19

Profundidad del río



Fuente: Food and agriculture organization of the United Nations. (s. f.). www.fao.org. Recuperado 7 de marzo de 2022, de https://www.fao.org/fishery/docs/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6705s/x6705s03.htm

Para calcular el caudal se ve representado en la ecuación 4-1, se determina el área con la ecuación 4-2 y la velocidad en la superficie en la ecuación 4-3, empleando las ecuaciones:

$$Q = Ap \cdot v \quad (\text{ecuación 4-1})$$

$$Ap = x \cdot h \quad (\text{ecuación 4-2})$$

$$v = \frac{Z}{t} \quad (\text{ecuación 4-3})$$

Donde para hacer uso de estas ecuaciones se debe tener ciertas características del riachuelo como lo es:

Q = Caudal.

v = Velocidad del agua.

A_p = Área promedio.

X = Ancho promedio.

h = Profundidad promedio.

Z = Distancia entre los puntos de estudio.

t = Tiempo de recorrido.

4.6 Medición de caudal de riachuelo.

A continuación, se presenta una serie de pasos de cómo se debe obtener una medida del caudal y profundidad del riachuelo, las cuales se deben tener en cuenta en el siguiente capítulo para los cálculos de las geometrías principales del tornillo sinfín.

Paso 1

Al establecer los puntos A y B se fijan dos líneas paralelas perpendiculares al flujo del agua en un tramo recto, con una separación de 10 metros entre el punto A y B, utilizando 4 estacas y dos cuerdas, como se muestra en la figura 4-17.

Paso 2

Con una pelota plástica y un cronómetro se deja caer la pelota en el punto A, se mide el tiempo que tarda en desplazarse al punto B que está a 10 metros del punto A. Se hace este procedimiento 4 veces y se promedia el tiempo que tardó en desplazarse del punto A al B. Ver resultados (tabla 4-3).

Tabla 4-3.**Tiempos tomados entre los puntos A y B.**

	Tiempo[s]
1	250
2	246
3	245
4	252
Promedio	248.25

Fuente: Autor

Paso 3

Entre los puntos A y B tomando el ancho y profundidad desde el punto A hasta el punto B, cada 2 metros para un total de 6 medidas. En el tramo de A hasta B con las 6 medidas respectivas de ancho y profundidad se calcula el promedio.

Para cada resultado resultados ver (tabla 4-4).

Tabla 4-4.**Medidas de ancho y profundidad del riachuelo.**

Referencia	Ancho [m]	Profundidad[m]
0	0.97	0.22
2	1.02	0.24
4	1.05	0.26
6	0.95	0.24
8	0.97	0.27
10	0.97	0.3
Promedio	0.988	0.255

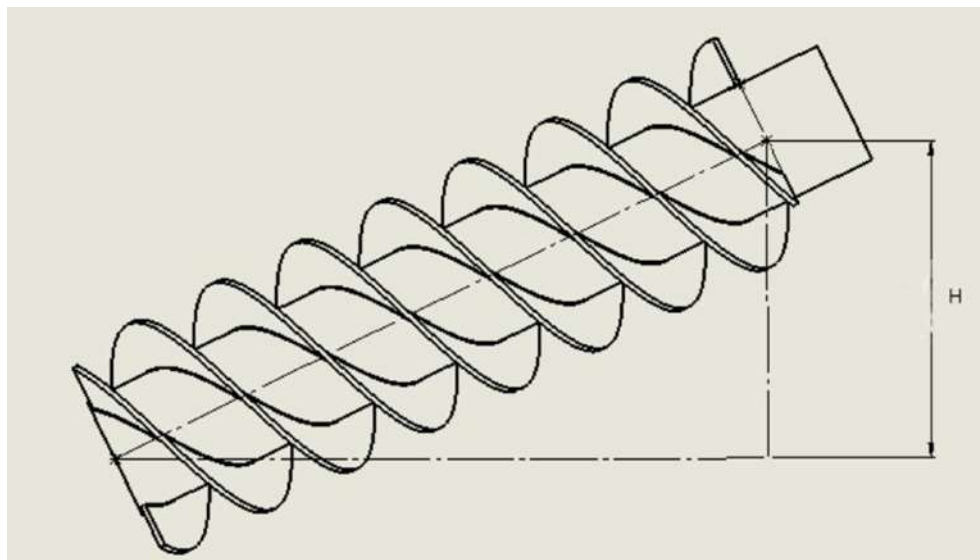
Fuente: Autor

Para desarrollar la caída de agua se tiene en cuenta la profundidad del riachuelo, la cual se describe en la tabla 4-5. Al observar los resultados obtenidos de las distintas mediciones se obtiene un resultado de una profundidad promedio igual a 0,25 m y un ancho promedio de 0,988 m por tal

motivo es necesario realizar una intervención en el río represando el agua para canalizarla al hidrotornillo, al hacer esto se considera que el nivel de agua aumente aproximadamente 0.05m y se toma una altura de entrada de agua de 0.30 m.

Figura 4-20

Altura de entrada de agua



Fuente: Autor

En la figura 4-20 se ilustra entre qué puntos se debe medir la altura de entrada de agua, para este hidrotornillo es de $H = 0.25\text{m}$

Paso 4

Con los datos obtenidos anteriormente se calcula el caudal del riachuelo por medio del método flotador con las ecuaciones 4-1, 4-2 y 4-3.

Para calcular el área, se extrae los resultados de media siendo los datos que se muestran en la tabla 4-4.

x: ancho. $x = 0,988\text{ m}$

h: profundidad. $h = 0,255\text{ m}$

Reemplazar los datos en la (ecuación 4-2).

$$Ap = x \cdot h \text{ (ecuación 4-2)}$$

$$Ap = 0,988 \cdot 0.255 = 0.251 \text{ m}^2$$

Para calcular velocidad superficial se extrae el tiempo promedio de (tabla 4-3) y la distancia entre los puntos A y B igual a 10 m.

z: distancia entre A y B. $z = 10 \text{ m}$

t: tiempo entre A y B. $t = 248,25 \text{ s}$

Remplazar los datos en la (ecuación 4-3).

$$v = \frac{z}{t} \text{ (ecuación 4-3)}$$

$$v = \frac{10}{248,25} = 0.040 \text{ m/s}$$

Con los datos obtenidos anteriormente de área y velocidad superficial, se calcula el caudal remplazando los valores en la (ecuación 4-1).

$$Q = Ap \cdot v \text{ (ecuación 4-1)}$$

$$Q = 0,25 \cdot 0.040 = 0.010 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$Q = 10,07 \text{ L/s}$$

4.7 Potencia de diseño.

Teniendo en cuenta que la potencia nominal es de 10 W, la cual representa un requerimiento de diseño necesario para la iluminación de una lámpara led, se deben tener presentes una serie de pérdidas y dimensionamientos de eficiencia y desarrollo, los cuales no se tienen en cuenta en cálculos pertinentes justifican el uso de un factor global de sobrecarga (Ko) de 1.7, teniendo en cuenta que se está diseñando el hidrotornillo para una potencia nominal de 10W a continuación se establece la ecuación 4-4 donde se describe este proceso.

$$P_{dis} = K_o \cdot P_{nom} \text{ (ecuación 4-4)}$$

P_{dis} = Potencia de diseño [W].

K_o = Factor de sobrecarga = 1.7.

P_{nom} = Potencia nominal [W] = 10W

Reemplazando los datos en la ecuación 4-4 se tiene el siguiente resultado, el cual será la potencia de diseño que se tiene en cuenta para los demás cálculos.

$$P_{dis} = 1.7 \cdot 10$$

$$P_{dis} = 17W$$

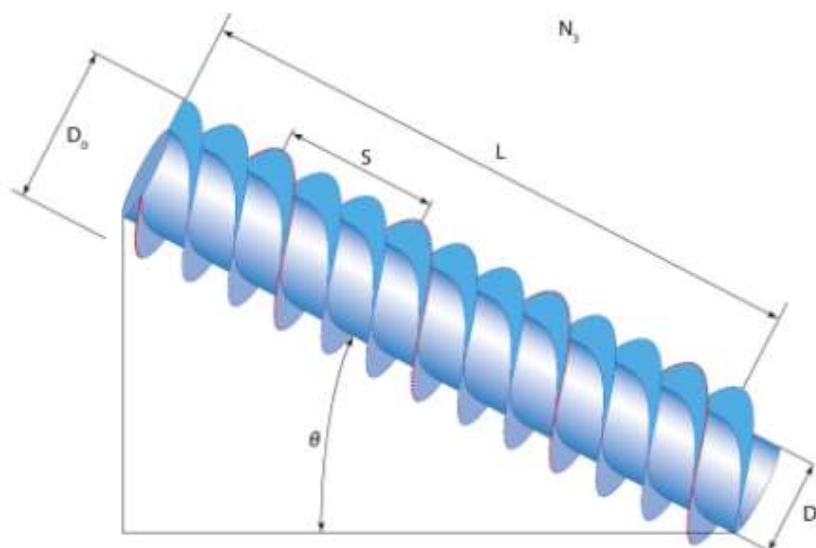
5. Cálculos de geometrías.

5.1 Geometrías principales de diseño.

Para el diseño y desarrollo del hidrotornillo de Arquímedes se analizan sus parámetros característicos como lo son: Altura de salto de agua, caudal disponible, diámetro exterior, ángulo de inclinación y número de entradas de las hélices. Con base en estos parámetros se determina la geometría del hidrotornillo: Diámetro exterior, diámetro interior, paso del tornillo sinfín, ángulo de inclinación del hidrotornillo, longitud del hidrotornillo y ángulo de inclinación de las hélices, estos se presentan de manera gráfica en la Figura 5-21.

Figura 5-21

Geometrías del tornillo



Fuente: Autor.

A continuación, se nombran las variables descritas en la figura 5-21, las cuales son necesarias para la construcción del hidrotornillo.

Do: Diámetro exterior del tornillo [m].

Di: Diámetro interior del tornillo [m].

Θ : Ángulo de inclinación del hidrotornillo [$^{\circ}$].

L: Longitud del tornillo[m].

N: Número de hélices del tornillo.

S: Paso de las hélices [m].

Para el diseño del hidrotornillo se tiene en cuenta parámetros descritos en artículos científicos, como son el ángulo de inclinación y número de hélices.

5.2 Ángulo de inclinación (θ).

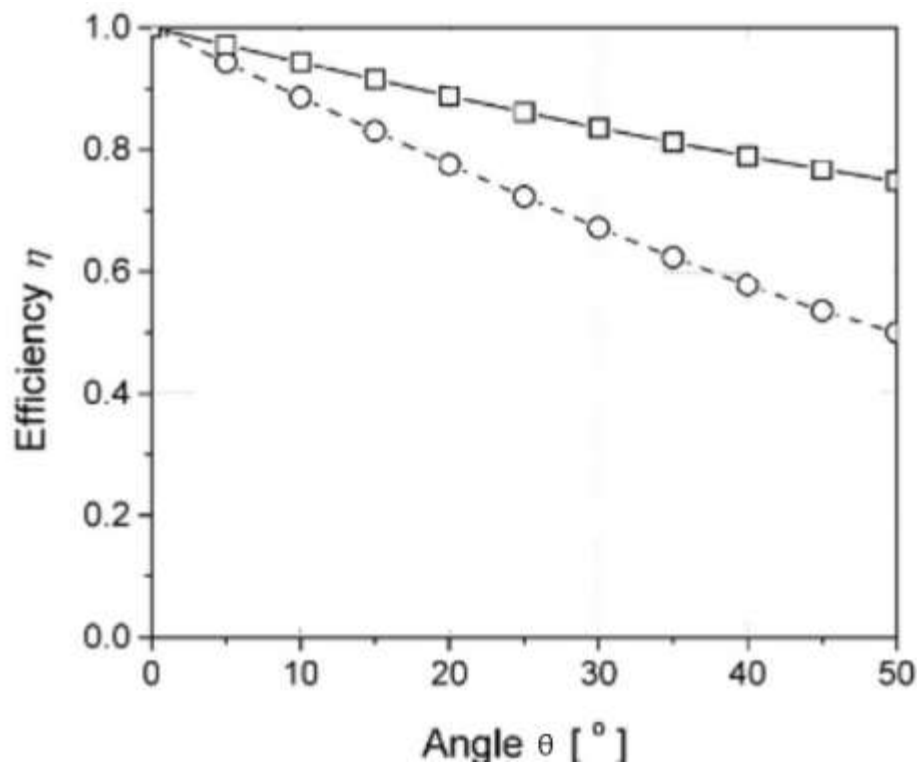
La figura 5-22 muestra la eficiencia de un hidrotornillo en función del ángulo inclinación del mismo, indica que a menor ángulo de inclinación la eficiencia aumenta, se debe tener en cuenta que el caudal debe ser constante. Los ángulos menores implican mayores eficiencias, pero tienen como resultado un mayor esfuerzo de construcción, y así un mayor costo. Experimentos realizados por Brada¹⁷ establece que los ángulos de un hidrotornillo se deben trabajar entre (25° a 36°), esto debido a que ángulos menores aumentan su longitud y mayores ángulos disminuye la longitud y con lleva menores caudales dentro del tornillo. Para cálculos de diseño se utilizará un ángulo de 26° .

$$\theta=26^{\circ}$$

Figura 5-22

Eficiencia dada por el ángulo de inclinación

¹⁷ K. Brada (1999). Wasserkraftschnecke ermöglicht Stromerzeugung über Kleinkraftwerke [Hydraulic screw generates electricity from micro hydropower stations]. Maschinenmarkt Würzburg, Mitteilung 14, pp. 52–56.



Fuente: Müller, G., & Senior, J. (2009). Simplified theory of Archimedean screws. *Journal of Hydraulic Research*, 47(5), 666–669. <https://doi.org/10.3826/jhr.2009.3475>

5.3 Número de entrada de hélices (N).

La figura 5-23 especifica la eficiencia teórica con dos y tres hélices para un hidrotornillo respecto al número de vueltas del mismo, se demuestra que con tres entradas de hélices su eficiencia es mayor comparado con el de dos. Otros autores como (Rorres 2000)¹⁸ aseguran que con mayor número de entradas de hélices su eficiencia aumenta, otro autor con estudios experimentales (Lyons 2014)¹⁹, aclara que la eficiencia con mayor número de hélices no es significativamente alta, además que los costos de fabricación se aumentan al contar con un número

80.

¹⁸ Rorres, C. (2000). The Turn of the Screw: Optimal Design of an Archimedes Screw. *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(1), 72–80.

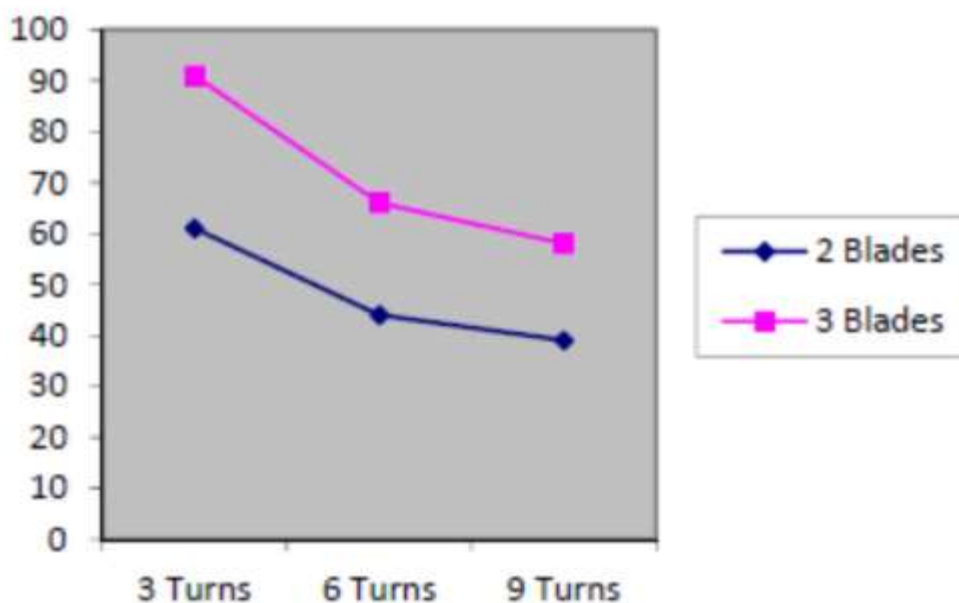
¹⁹ Murray William Keith Lyons (2014). Lab Testing and Modeling of Archimedes Screw Turbines. A Thesis presented to The Faculty of Graduate Studies of The University of Guelph

elevado de hélices. Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente para los cálculos de diseño de este hidrotornillo, se implementa tres entradas de hélices.

$$N=3$$

Figura 5-23

Eficiencia teórica descrita por el número de hélices y número de vueltas.



Fuente: Zafirah Rosly, C., Ummu Jamaludin, K., Suruya Azzhari, N., Ammar Nik Mu'tasim, M., Nurys Oumer, A., & Rao, N. T. (2016). PARAMETRIC STUDY ON EFFICIENCY OF ARCHIMEDES SCREW TURBINE. ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, 11(18).

5.4 Cálculos de geometrías.

En el siguiente paso a paso se muestra detalladamente el proceso que se debe llevar a cabo para determinar las principales geometrías del tornillo sinfín.

Paso 1: Determinación de velocidad de rotación.

Para calcular la velocidad de giro que se puede llegar a presentar en un hidrotornillo según el caudal que se disponga en el vertedero, ángulo de inclinación del hidrotornillo, radio exterior y

volumen por relación de giro se tiene en cuenta la ecuación descrita en Rorres²⁰ con unidades de [rpm].

$$n = \frac{Q \cdot 60 \cdot \tan \theta}{2 \cdot \pi^2 \cdot R_o^3 \cdot \lambda_v} \text{ (Ecuación 5-5)}$$

n = Velocidad de giro [rpm].

θ = Ángulo de inclinación del tornillo [°]

R_o = Radio del diámetro exterior [m].

Q = Caudal disponible [m³/s].

λ_v = Relación de volumen de giro.

Para relación de volumen de giro (λ_v), se debe tener en cuenta los valores descritos de λ y ρ por Rorres mostrados en la tabla 5-5.

Tabla 5-5:

Parámetros de hélices más comunes.

Número de hélices	ρ óptimo	λ óptimo
1	0,5358	0,1285
2	0,5369	0,1863
3	0,5357	0,2217
4	0,5353	0,2456
5	0,5352	0,263

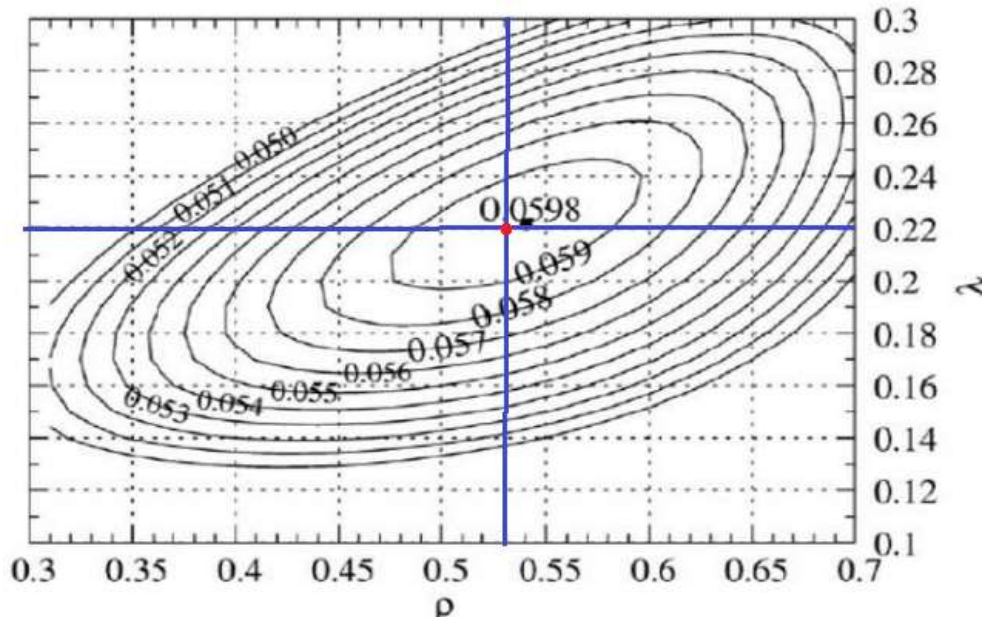
Fuente: Rorres, C. (2000). The Turn of the Screw: Optimal Design of an Archimedes Screw. Journal of Hydraulic Engineering, 126(1), 72–80.

²⁰ Nuernbergk, D. M., & Rorres, C. (2013). Analytical Model for Water Inflow of an Archimedes Screw Used in Hydropower Generation. Journal of Hydraulic Engineering, 139(2), 213–220

Con los datos extraídos de la tabla 5-5, para un número de hélices 3 se obtiene que $\lambda=0.2217$ y $\rho=0.5357$, se revisa la figura 5-24 para obtener el valor de λ_v ,

Figura 5-24

Relación de volumen de giro (λ_v) obtenida de los valores de λ relación de avance del tornillo y ρ relación de diámetro interior y diámetro exterior



Fuente: Nuernbergk, D. M., & Rorres, C. (2013). Analytical Model for Water Inflow of an Archimedes Screw Used in Hydropower Generation. *Journal of Hydraulic Engineering*, 139(2), 213–220

Con el volumen por relación de giro obtenido de la figura (5-24) $\lambda_v=0.0598$ se despeja el radio exterior “Ro” de la ecuación (5-5) y se obtiene la siguiente ecuación (5-6).

$$Ro = \sqrt[3]{\frac{Q \cdot 60 \cdot \tan \theta}{2 \cdot \pi^2 \cdot n \cdot v \lambda}} \text{ ecuación (5-6).}$$

En la ecuación (5-6) se reemplaza los siguientes datos.

Datos

$n = 250$ rpm

$\theta = 26^\circ$

$R_o = \text{incógnita}$

$\lambda_v = 0.0598$

$Q = 0.01 \text{ l/s}$

$$R_o = \sqrt[3]{\frac{0.01 \cdot 60 \cdot \tan 26}{2 \cdot \pi^2 \cdot 250 \cdot 0.0598}}$$

$$R_o = \sqrt[3]{0.00099}$$

$$R_o = 0.099 \text{ m}$$

Para facilidad de cálculos se trabaja con el valor del diámetro, para esto es necesario multiplicar el radio exterior por dos.

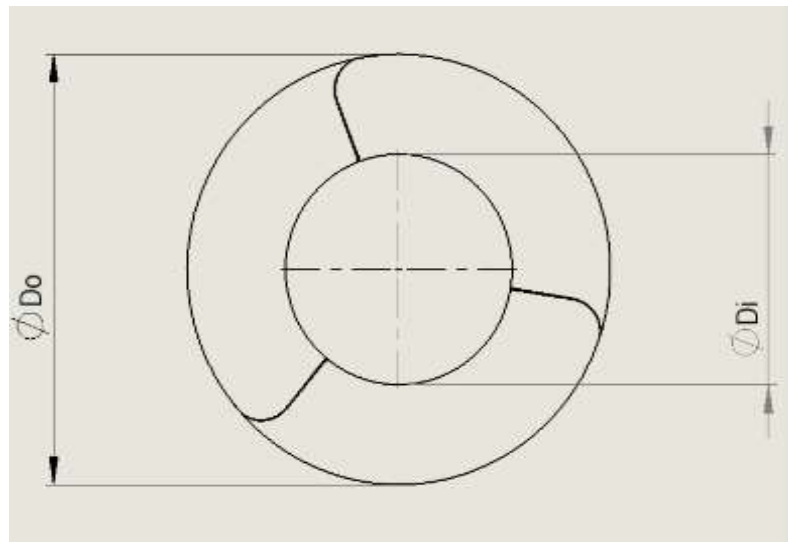
$$D_o = 2 \cdot R_o$$

$$D_o = 2 \cdot 0.099$$

$$D_o = 0.19 \text{ m}$$

Figura 5-25

Diámetro exterior D_o y diámetro interno D_i



Fuente: Autor.

Paso 2: Diámetro interior

Para determinar el diámetro interno D_i se hace una revisión a la tabla descrita por Rorres donde se describen parámetros óptimos para cada número de hélices en la (tabla 5-6).

Tabla 5-6.**Parámetros de hélices más comunes.**

Número de hélices	ρ óptimo	λ óptimo
1	0,5358	0,1285
2	0,5369	0,1863
3	0,5357	0,2217
4	0,5353	0,2456
5	0,5352	0,263

Fuente: Rorres, C. (2000). The Turn of the Screw: Optimal Design of an Archimedes Screw. Journal of Hydraulic Engineering, 126(1), 72–80.

De la (tabla 5-6) se extrae la relación de diámetro (ρ óptimo) con el número de hélices $N=3$. Para calcular el diámetro interno D_i (figura 5-25) se reemplaza los valores y se despeja la (ecuación 5-7).

$$\rho = \frac{D_i}{D_o} \text{ (ecuación 5-7)}$$

Datos

$$\rho \text{ óptimo} = 0.5357$$

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

Se despeja D_i de la (ecuación 5-7) y se reemplaza los datos en la (ecuación 5-8)

$$D_i = \rho * D_o \text{ (ecuación 5-8)}$$

$$D_i = 0,5357 * 0.19\text{m}$$

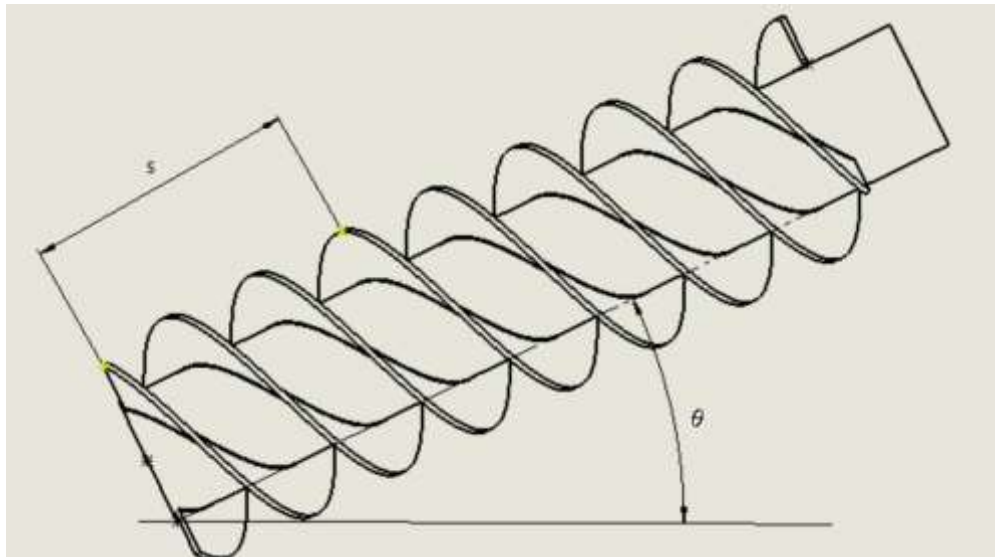
$$D_i = 0,10m$$

Paso 3: Paso de cada hélice en el tornillo.

El paso del tornillo es la distancia de avance que genera una vuelta en cada hélice, para determinar esta distancia del paso se debe tener en cuenta tres condiciones, (tabla 5-7) donde teniendo en cuenta el ángulo se toma una de estas condiciones para calcular el paso denominado S (figura 5-26) del tornillo.

Figura 5-26

Paso del tornillo



Fuente: Autor.

Tabla 5-7.

Condiciones del paso para el tornillo.

$\theta < 30^\circ$	$S = 1.2 * D_o$
$\theta = 30^\circ$	$S = D_o$
$\theta > 30^\circ$	$S = 0.8 * D_o$

Fuente: Nagel, G., Ohg., R., - Ing, G. N. M., & Ritz-Pumpenfabrik OHG. (1968). Archimedian Screw Pump Handbook. RITZ-Pumpenfabrik OHG.

Con la (tabla 5-7) se determina el paso del tornillo teniendo en cuenta el ángulo de inclinación del mismo θ [°].

θ : Ángulo de inclinación del hidrotornillo = 26°

Do: Diámetro exterior = 0.199 m

S: Paso de la hélice.

Se revisa la información de la (tabla 5-7) y se establece la condición con el ángulo θ .

Condición: si $\theta < 30^\circ$, entonces $S = 1.2D_o$.

Con la condición establecida se calcula el paso con la (ecuación 5-9).

$$s = 1.2 \cdot D_o \text{ (ecuación 5-9)}$$

$$s = 1.2 \cdot 0.198$$

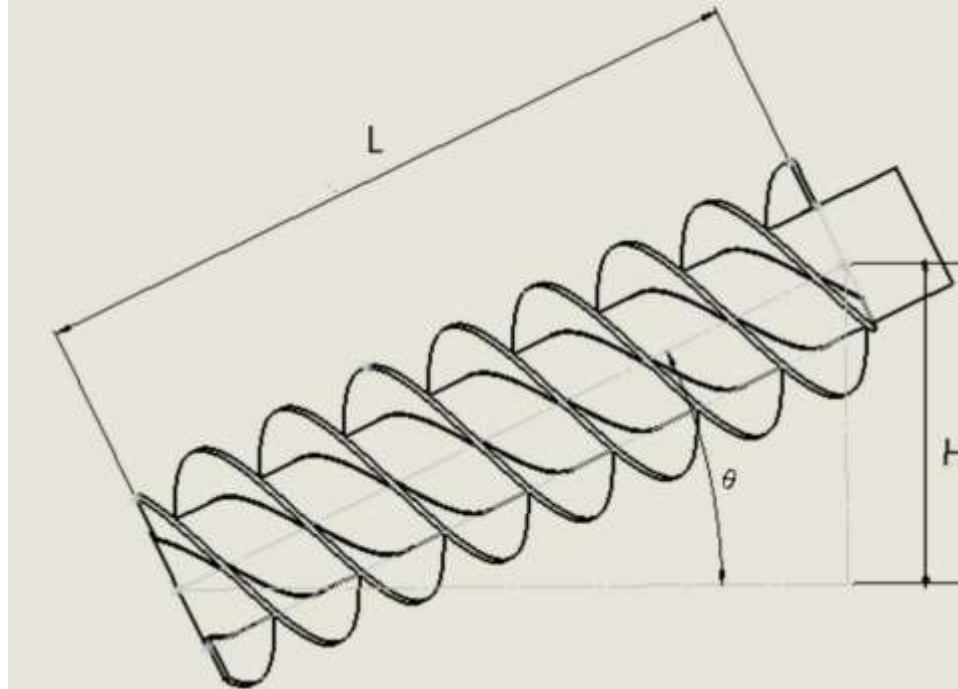
$$s = 0.23 \text{ m}$$

Paso 4: Longitud del tornillo.

Esta longitud comprende la distancia que recubren las hélices en el tornillo (figura 5-27) sinfín, ver (ecuación 5-10).

Figura 5-27

Longitud del tornillo con las hélices



Fuente: Autor.

$$L = \frac{H}{\text{sen } \theta} \text{ (ecuación 5-10)}$$

H: Altura = 0.30 m

θ : Ángulo de inclinación= 26°

L: Longitud

Reemplazar estos valores en la ecuación 5-10 se obtiene lo siguiente:

$$L = \frac{H}{\text{sen } \theta} \text{ (ecuación 5-10)}$$

$$L = \frac{0,30\text{m}}{\text{sen } (26)}$$

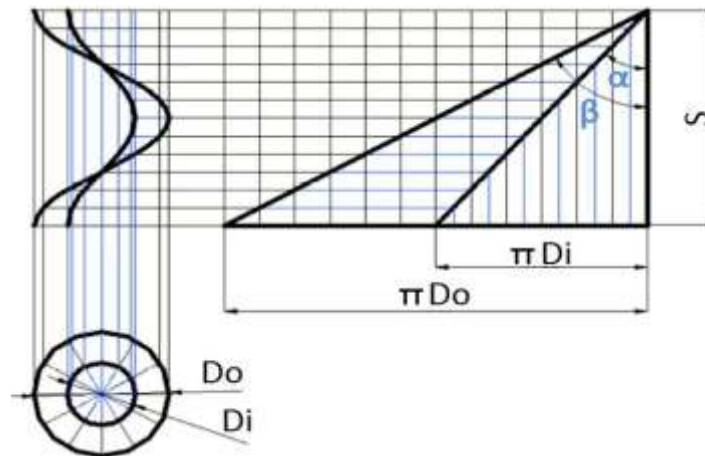
$$L = 0.68 \text{ m}$$

Paso 5: Ángulos internos de las hélices.

En la figura 5-29 se ilustran los ángulos que conforman el filo exterior (β) e interior (α) de la hélice, siendo α el ángulo que desempeña el máximo torque, este se describe en la ecuación 5-12 y el ángulo exterior en la ecuación 5-11.

Figura 5-28

Ángulos de las hélices



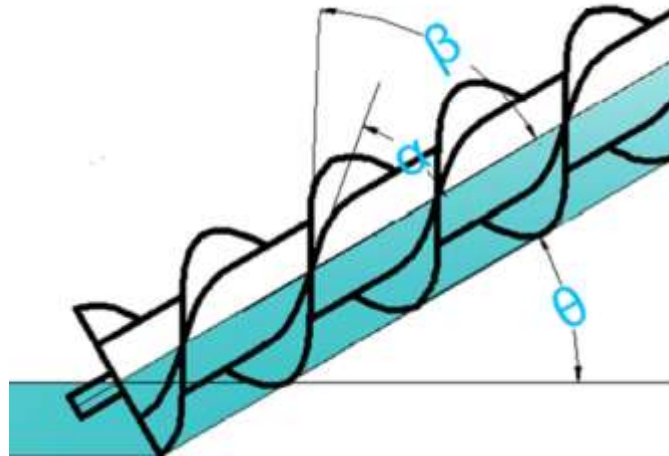
Fuente: Iván Segura Rodríguez. (2016, noviembre). optimización y estudio hidrodinámico de una microturbina hidráulica para el aprovechamiento energético de pequeños saltos de agua. Universidad Jaume.

$$\tan \beta = \frac{\pi \cdot D_o}{S} \quad (\text{ecuación 5-11})$$

$$\tan \alpha = \frac{\pi \cdot D_i}{S} \quad (\text{ecuación 5-12})$$

Figura 5-29

Ángulos de filo interno y externo de la hélice



Fuente: Mejía, J. C. (2011). Ángulos de inclinación del tornillo [Ilustración]. En Universidad de san salvador (Diseño de una turbina hidráulica basada en el tornillo de Arquímedes ed.).

Para los valores de diámetro externo D_o , diámetro interno D_i y paso de la hélice S se extraen los valores obtenidos en “geometría del tornillo” pasos (1, 2 y 3). De este capítulo.

Datos:

D_o : diámetro exterior= 0.199 m

D_i : diámetro interior=0.106 m

S : paso de la hélice= 0.2383 m

Teniendo presente estos valores se reemplazan los datos en la ecuación 5-11 y ecuación 5-

12

Para el ángulo β filo exterior se tiene:

$$\tan \beta = \frac{\pi \cdot D_o}{S} \text{ (ecuación 5-11)}$$

$$\tan \beta = \frac{\pi \cdot 0.19}{0.23}$$

$$\tan \beta = 2.61 \text{ rad}$$

$$\beta = 69.15^\circ$$

Para el ángulo α filo interior se tiene:

$$\tan \alpha = \frac{\pi \cdot D_i}{s} \quad (\text{ecuación 5-12})$$

$$\tan \alpha = \frac{\pi \cdot 0.10}{0.23}$$

$$\tan \alpha = 1.40 \text{ rad}$$

$$\alpha = 54.44^\circ$$

el ángulo α filo interior es donde se presenta el máximo torque que puede llegar a entregar el tornillo sinfín.

6. Diseño constructivo del tornillo.

6.1 Cargas presentes en el tornillo sinfín.

Para construir el tornillo sinfín es necesario realizar un diseño estructural de las cargas y reacciones presentes, para estos respectivos cálculos es necesario tener en cuenta los siguientes datos de entrada determinados anteriormente, estos se mencionan en la tabla 6-8y posteriormente el paso a paso expuesto.

Tabla 6-8.

Valores de dimensiones del tornillo sinfín.

S	Paso de la hélice	0.238	m
D ₁	Diámetro interno del eje	0.102	m
R ₁	Radio interno del eje	0.051	m
D _i	Diámetro externo del eje	0.106	m
R _i	Radio externo del eje	0.053	m
D _o	Diámetro externo del tornillo	0.199	m
R _o	Radio exterior del tornillo	0.099	m
L _{he}	Longitud de las hélices	0.684	m
L _a	Longitud eje a	0.050	m
L _b	Longitud eje b	0.085	m
D _t	Diámetro de la tapa lateral	0.102	m
L _t	Longitud de la tapa lateral	0.005	m

e	Espesor de la hélice	0.0019	m
L _h	Longitud del eje hueco	0.834	m
ρ _a	Densidad del agua	1000	Kg/m ³
θ	Ángulo de inclinación	26	°
α	Ángulo de máximo torque	54.44	°
ρ _m	Densidad del material	7850	Kg/m ³

Fuente: Autor.

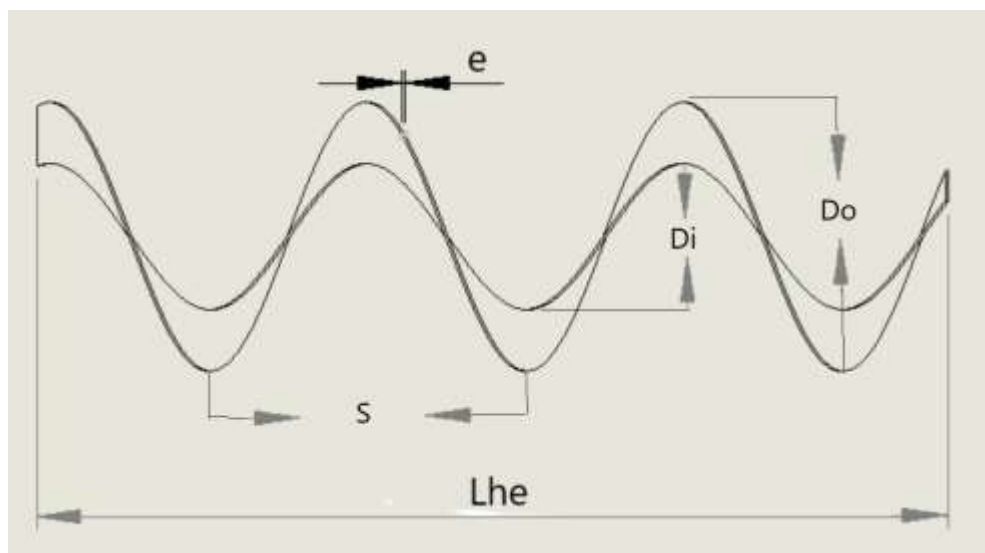
6.2 Volumen y Peso de los componentes

Paso 1: Volumen de la hélice.

Para calcular el volumen de la hélice es necesario tener en cuenta el espesor (e), la longitud de que ocupan las hélices en el eje hueco (L_{he}), el número de entradas (N), el paso de las hélices (S) y sus respectivos radios, en la figura 6-30 se observa detalladamente.

Figura 6-30

Geometrías de la hélice



Fuente: Autor.

Para calcular el volumen de las hélices es necesario usar la ecuación 6-14 y posteriormente la ecuación 6-14 para su respectivo peso.

$$V_{he} = \pi(R_o^2 - R_i^2) \cdot \frac{L_{he}}{s} \cdot e \cdot N \text{ (ecuación 6-14)}$$

V_{he}: Volumen de la hélice.

R_o: Radio exterior del tornillo

R_i: Radio externo del eje hueco

L_{he}: Longitud de la hélice.

S: Paso del tornillo.

N: Número de entradas.

e: Espesor de la hélice.

Con los valores de la tabla 6-8 se reemplazan en la ecuación 6-14 y se obtiene el siguiente resultado.

$$V_{he} = \pi(0.099^2 - 0.053^2) \cdot \frac{0.684}{0.238} \cdot 0.002 \cdot 3$$

$$V_{he} = 0.37 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

Paso 2: Peso de la hélice

Teniendo el respectivo volumen de la hélice es necesario calcular el peso de la misma, aunque es pequeño no se debe despreciar, ya que esto afecta los cálculos siguientes.

$$W_{he} = \rho_m \cdot V_{he} \cdot g \text{ (ecuación 6-15)}$$

W_{he}: Peso de la hélice.

ρ_m: Densidad del acero ASTM A32.

V_{he}: Volumen de la hélice.

g: gravedad

Con los valores de la tabla 6-9 se reemplazan en la ecuación 6-15 y se obtiene el siguiente resultado.

$$W_{he} = 7850 \cdot 0.378 \times 10^{-3} \cdot 9.81$$

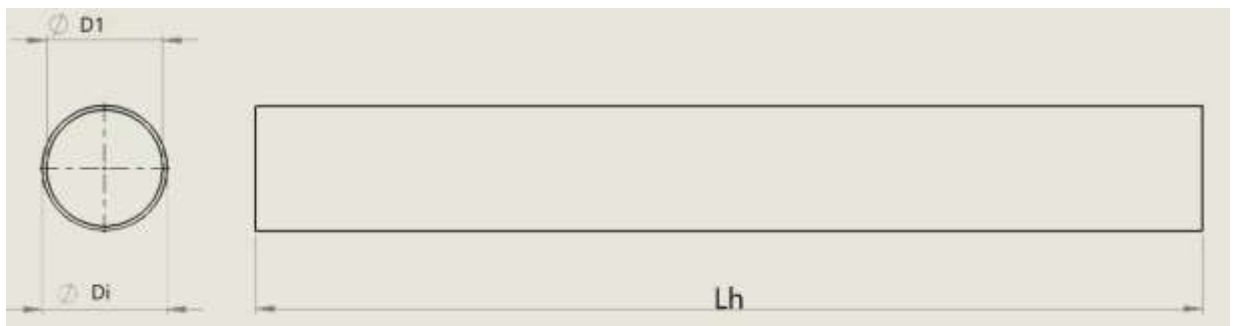
$$W_{he} = 29.13 \text{ N}$$

Paso 3: Volumen del eje hueco.

Para disminuir peso y costos del material se propone usar un tubo hueco Figura 6-31 para posteriormente instalar las hélices sobre el mismo, el volumen y peso se calculan mediante las ecuaciones 6-26 y 6-17 respectivamente.

Figura 6-31

Eje hueco



Fuente: Autor

$$V_h = \pi(R_i^2 - R_1^2) \cdot L_h \text{ (ecuación 6-16)}$$

V_h: Volumen de la hélice.

R_i: Radio externo del eje hueco.

R₁: Radio interno del eje hueco.

L_h: Longitud del eje hueco.

Con los valores de la tabla 6-8 se reemplazan en la ecuación 6-16 y se obtiene el siguiente resultado.

$$Vh = \pi(0.053^2 - 0.051^2) \cdot 0.834$$

$$Vh = 0.54 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

Paso 4: Peso del eje hueco.

El peso del eje hueco se debe tener en cuenta mediante las relaciones de diámetros calculadas en el volumen anterior, en este prototipo se planea que sea liviano.

$$Wh = \rho m \cdot Vh \cdot g \text{ (ecuación 6-17)}$$

Wh: Peso del eje hueco.

ρm : Densidad del acero ASTM A36.

g: Aceleración de la gravedad.

Con los valores de la tabla 6-8 se reemplazan en la ecuación 6-17 y se obtiene el siguiente resultado

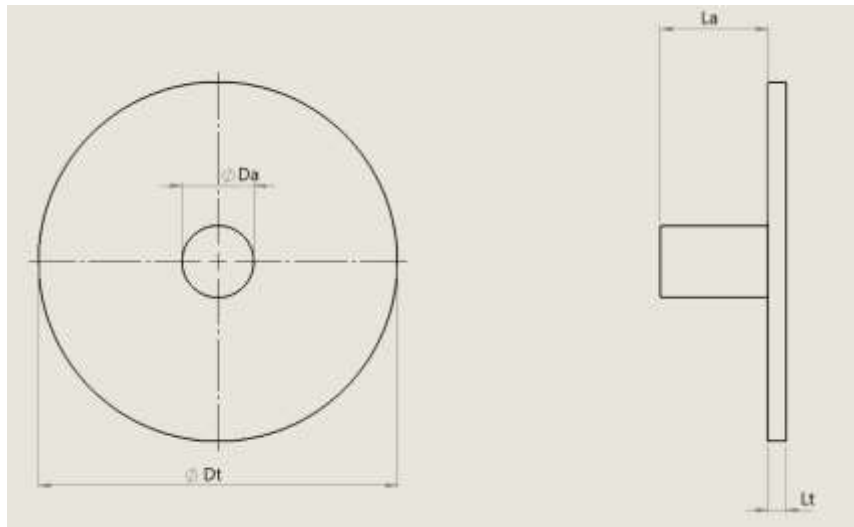
$$Wh = 7850 \cdot 0.544 \times 10^{-3} \cdot 9.81$$

$$Wh = 41.94 \text{ N}$$

Para que el tornillo sinfín gire libremente se planea instalar unos ejes en los extremos junto a unos discos soldados los cuales hacen la función de tapas laterales del eje hueco, posteriormente los ejes estarán sujetos por unas chumaceras que estarán atornilladas al punto de anclaje de la estructura.

Paso 5: Volumen del eje a.

En la figura 6-32 se muestra un eje donde se instala uno de los rodamientos, este eje debe estar soldado a un disco el cual posteriormente se debe soldar al eje hueco y así se obtiene una de las tapas laterales del eje hueco.

Figura 6-32***Tapa lateral inferior del eje hueco***

Fuente: Autor.

Como el tornillo sinfín estará con una inclinación, esta punta debe ser instalada en la parte inferior, ya que es más corta que la siguiente punta.

Para calcular el respectivo volumen se tiene en cuenta la ecuación 6-18.

$$Va = \frac{\pi}{4} \cdot Da^2 \cdot La + \frac{\pi}{4} \cdot Dt^2 \cdot Lt \text{ (ecuación 6-18)}$$

Va: Volumen del eje a.

La: Longitud del eje a.

Da: Diámetro del eje a.

Dt: Diámetro del disco.

Lt: Longitud del disco.

Con los valores de la tabla 6-8 se reemplazan en la ecuación 6-18 y se obtiene el siguiente resultado

$$Va = \frac{\pi}{4} \cdot 0.0254^2 \cdot 0.05 + \frac{\pi}{4} \cdot 0.102^2 \cdot 0.005$$

$$Va = 0.066 \times 10^{-3} m^3$$

Paso 6: Peso del eje a.

Con la ecuación 6-19 se calcula el peso que puede llegar a tener estas dos piezas mencionadas anteriormente.

$$Wa = \rho m \cdot Va \cdot g \text{ (ecuación 6-19)}$$

Wa: Peso del eje a.

ρm : Densidad del acero ASTM A36.

Va: Volumen del eje a.

g: Aceleración de la gravedad.

Con los valores de la tabla 6-8 se reemplazan en la ecuación según lo requiera y se obtiene el siguiente resultado.

$$Wa = 7850 \cdot 0.066 \times 10^{-3} \cdot 9.81$$

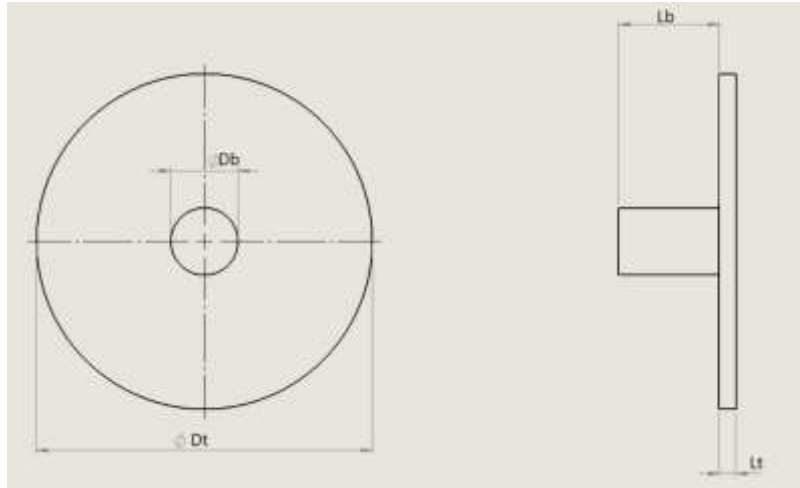
$$Wa = 5.09 N$$

Paso 7: Volumen del eje b

Para este eje se tiene en cuenta las mismas características del anterior, adicional a este se debe dejar un poco más largo, ya que este será el de la parte superior y ahí se planea acoplar el generador eléctrico.

Figura 6-33

Tapa lateral superior del eje hueco.



Fuente: Autor.

Para calcular el volumen del eje junto a la respectiva tapa se hace uso de la siguiente ecuación

$$Vb = \frac{\pi}{4} \cdot Db^2 \cdot La + \frac{\pi}{4} \cdot Dt^2 \cdot Lt \text{ (ecuación 6-20)}$$

Vb: Volumen del eje b.

Db: Diámetro del eje b.

Lb: Longitud del eje b.

Dt: Diámetro de la tapa.

Lt: Longitud de la tapa.

Con los valores de la tabla 6-8 se reemplazan en la ecuación según lo requiera y se obtiene el siguiente resultado.

$$Vb = \frac{\pi}{4} \cdot 0.0254^2 \cdot 0.085 + \frac{\pi}{4} \cdot 0.102^2 \cdot 0.005$$

$$Vb = 0.08 \times 10^{-3} m^3$$

Paso 8: Peso del eje b.

Mediante la ecuación 6-21 se calcula el peso del eje b

W_b : Peso del eje b.

ρ_m : densidad del acero ASTM A36.

g : Aceleración de la gravedad.

$$W_b = \rho_m \cdot V_b \cdot g \text{ (ecuación 6-21)}$$

$$W_b = 7850 \cdot 0.088 \times 10^{-3} \cdot 9.81$$

$$W_b = 6.47N$$

Teniendo los respectivos pesos de las partes que se van a utilizar para el ensamble del tornillo sinfín es necesario conocer el peso total, para esto es necesario sumar el peso de los ejes, el peso del eje hueco y el peso de las hélices. Ecuación (6-22)

$$W_t = W_{he} + W_h + W_a + W_b \text{ (ecuación 6-22)}$$

W_t : peso total del hidrotornillo.

W_{he} : Peso de la hélice = 29.13 N

W_h : Peso del eje hueco = 41.94 N

W_a : Peso del eje a = 5.09 N

W_b : Peso del eje b = 6.47 N

$$W_t = 29.13 + 41.94 + 5.09 + 6.47$$

$$W_t = 82.65 N$$

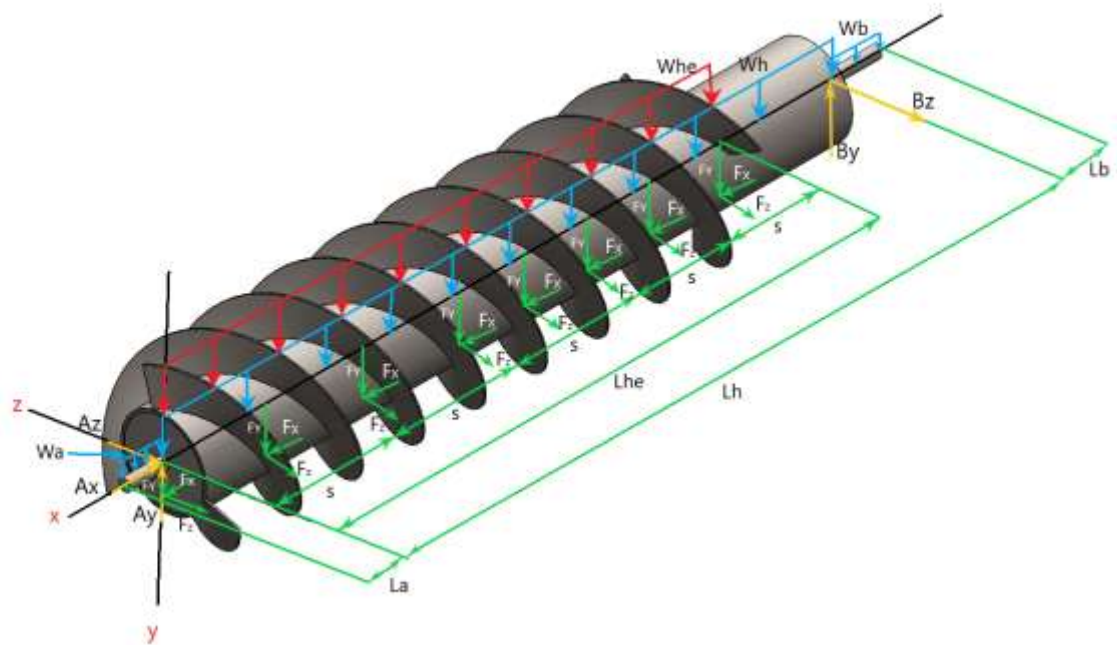
$$W_t = 8.42 kg$$

6.3 Diagramas de cuerpo libre.

A continuación, se muestra el diagrama de cuerpo libre para determinar las reacciones que se ejercen en los apoyos y las fuerzas que actúan en el tornillo.

Figura 6-34

Diagrama de cuerpo libre de fuerzas distribuidas



Fuente: Autor

Tabla:6-9.

Fuerzas presentes en el tornillo sinfín.

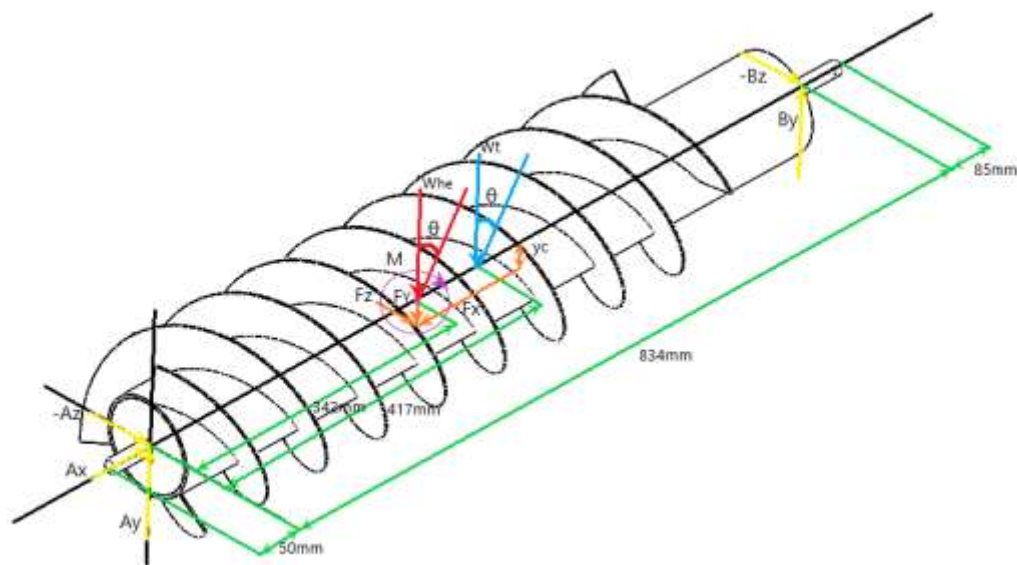
Símbolo	Definición	Valor
Az	Reacción radial en el Z del eje a	-6.58 N
Ax	Reacción axial en el eje a	47.55 N
Ay	Reacción radial en el eje Y del eje a	51.97 N
Wa	Peso del eje a	5.09 N
Wb	Peso del eje b	6.47 N
Wh	Peso del eje hueco	41.94 N
Whe	Peso de la hélice	29.21 N
Bz	Reacción radial en el eje z del eje b	4.64 N

B_y	Reacción radial en el eje Y del eje b	45.51 N
S	Paso de la hélice	0.23 m
L _{he}	Longitud de la hélice	0.68 m
L _h	Longitud del eje hueco	0.83 m
L _a	Longitud del eje a	0.05 m
L _b	Longitud del eje b	0.08 m

Fuente: Autor

Figura 6-35

Diagrama de cuerpo libre fuerzas concentradas



6.4 Cálculo de reacciones y cargas presentes.

A continuación, se describen las cargas presentes en cada uno de los ejes de coordenadas, estas son el peso del eje hueco y el peso de las hélices ecuaciones 6-22 y 6-23. También es importante tener en cuenta las fuerzas de empuje en dirección axial al tornillo, las cuales se encuentran en las ecuaciones 6-24, 6-25, 6-26.

Whex: Peso de la hélice descompuesto en y.

Whx: Peso del eje hueco descompuesto en y.

θ : Ángulo de inclinación.

ρa : Densidad del agua.

Ac: Área de contacto de la hélice y el agua.

Sx: Paso entre hélices.

Lhe: Longitud de hélice.

S: Paso de la hélice.

α : Ángulo de máximo torque.

$$Fy = \rho a \cdot g \cdot Ac \cdot Sx \cdot \cos(\theta) \cdot \frac{Lhe}{S} \quad (\text{ecuación 6-23})$$

$$Fx = \rho a \cdot g \cdot Ac \cdot Sx \cdot \sin(\theta) \cdot \frac{Lhe}{S} \quad (\text{ecuación 6-24})$$

$$Fz = \rho a \cdot g \cdot Ac \cdot Sx \cdot \sin(\theta) \cdot \tan(\alpha) \cdot \frac{Lhe}{S} \quad (\text{ecuación 6-25})$$

El torque que va a llegar a producir el efecto de la energía hidráulica en el tornillo sinfín este dado por la ecuación 6-28.

$$T = \rho a \cdot g \cdot Lhe \cdot Ac \cdot \sin(\theta) \cdot \tan(\alpha) \cdot Yc \quad (\text{ecuación 6-26})$$

θ : Ángulo de inclinación.

ρa : Densidad del agua.

Ac: Área de contacto de la hélice y el agua.

Lhe: Longitud de hélice.

α : Ángulo de máximo torque.

Yc: Ubicación del centroide.

g: Aceleración de la gravedad.

Teniendo en cuenta los diagramas de cuerpo libre se procede hacer las sumatorias de cada una de las fuerzas presentes en cada eje de coordenadas. A continuación, se muestra el respectivo proceso.

$$\sum F_x = 0$$

En el eje de coordenadas X están presentes las reacciones del eje a, fuerza de empuje del agua en dirección axial y el peso total del tornillo sinfín

$$+Ax - Fx - (Wt \cdot \text{sen}(\theta)) = 0 \text{ (ecuación 6-27)}$$

Para el eje de coordenadas Y se tiene presente la reacción del eje a, b, fuerza de empuje del agua en dirección axial y el peso total del tornillo sinfín.

$$\sum F_y = 0$$

$$+Ay + By - Fy - (Wt \cdot \text{cos}(\theta)) = 0 \text{ (ecuación 6-28)}$$

Para el eje de coordenadas Z se tiene presente la reacción del eje a, b, fuerza de empuje del agua en dirección axial.

$$\sum F_z = 0$$

$$-Az - Fz + Bz = 0 \text{ (ecuación 6-29)}$$

Posteriormente, se hacen los respectivos cálculos de momentos presentes en el tornillo sinfín, ubicando el punto central en el eje a.

$$\sum M_x \cup = 0$$

$$Mb - Fz \cdot Yc = 0 \text{ (ecuación 6-30)}$$

$$\sum M_y \cup = 0$$

$$-Fz \cdot 0.342 + Bz \cdot 0.834 = 0 \text{ (ecuación 6-31)}$$

$$\sum M_z \cup = 0$$

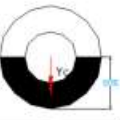
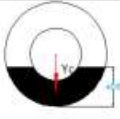
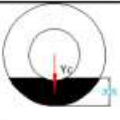
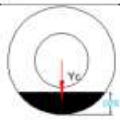
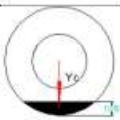
$$(Fy + Whe \cdot \cos(\theta)) \cdot 0.342 + Wh \cdot 0.417 \cdot \cos(\theta) - By \cdot 0.834 + Wb \cdot 0.919 \cdot$$

$\cos(\theta) = 0$ (ecuación 6-32)

Para resolver estas ecuaciones mencionadas anteriormente es necesario calcular los siguientes valores los cuales son utilizados frecuentemente en los cálculos, estas ecuaciones se toman de la tabla 6-10 donde según el nivel de llenado de agua se tiene en cuenta un procedimiento.

Tabla 6-10.

Área de contacto del agua con respecto al nivel de llenado.

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

Fuente: Mejia, J. C. (2011, octubre). diseño de una turbina hidráulica basada en el tornillo de Arquímedes. Universidad de el salvador.

Para este diseño se propone un nivel de llenado de agua del 50%, teniendo en cuenta esto y basados en la tabla 6-10 se calcula el área de contacto con el agua, el paso entre hélices y el respectivo centroide, por lo tanto, se tienen las siguientes ecuaciones.

$$Ac = \frac{3}{8} \pi \cdot Ro^2 \text{ (ecuación 6-33)}$$

Ro: Radio externo.

Ac: Área de contacto con el agua.

$$Ac = \frac{3}{8} \pi \cdot 0.099^2$$

$$Ac = 11.54 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

Para calcular el respectivo paso entre las hélices se tiene la ecuación 6-34

$$Sx = \frac{S}{N} \text{ (ecuación 6-34)}$$

Sx: Paso entre hélices.

S: Paso de las hélices = 0.238 m

N: Número de entradas de las hélices = 3

$$Sx = \frac{0.238}{3}$$

$$Sx = 0.079 \text{ m}$$

Para calcular la distancia del centroide según el nivel de llenado se hace uso de la ecuación 6-35

$$Yc = 0.4451 \cdot Ro \text{ (ecuación 6-35)}$$

Ro: Radio externo.

Yc: Distancia del Centroide

$$Yc = 0.4951 \cdot 0.099$$

$$Yc = 0.049 \text{ m}$$

Teniendo estos valores presentes se procede a calcular las reacciones mencionadas en las ecuaciones 6-23 a 6-34.

Para calcular el torque presente a lo largo del eje se hace uso de la ecuación 6-26

$$T = \rho a \cdot g \cdot Lhe \cdot Ac \cdot \sin(\theta) \cdot \tan(\alpha) \cdot Yc \text{ (ecuación 6-26)}$$

T= torque a lo largo del eje.

ρ_a = Densidad del agua.

g = Aceleración de la gravedad.

L_{he} = Longitud de las hélices.

A_c = Área en contacto con el agua.

Θ = Ángulo de inclinación del hidrotornillo.

α = Ángulo externo de la hélice.

Y_c = Distancia del centroide.

Reemplazando los valores de la tabla 6-9 necesarios para el desarrollo de la ecuación 6-26 se obtiene:

$$T = 1000 \cdot 9.81 \cdot 0.684 \cdot 11.546 \times 10^{-3} \cdot \text{sen}(26) \cdot \tan(54.44) \cdot 0.044$$

$$T = 2.32 N \cdot m$$

Se calculan las fuerzas de empuje en dirección axial al tornillo respecto a cada eje de coordenadas según el diagrama de cuerpo libre, para estos cálculos se debe tener presente las ecuaciones 6-23, 6-24, 6-25, donde los valores a reemplazar se muestran en la tabla 6-8 y se nombran a continuación.

$$F_y = \rho_a \cdot g \cdot A_c \cdot S_x \cdot \cos(\theta) \cdot \frac{L_{he}}{S} \text{ (ecuación 6-23)}$$

F_y = fuerza de empuje que ejerce el agua en dirección radial al tornillo en el eje y.

ρ_a = Densidad del agua.

g = Aceleración de la gravedad.

A_c = Área en contacto con el agua.

Θ = Ángulo de inclinación del hidrotornillo.

S_x : Paso entre hélices.

L_{he} = longitud de las hélices.

S: Paso de las hélices.

Lhe= longitud de las hélices.

Teniendo en cuenta los valores de la tabla 6-8 se reemplazan en la ecuación y se obtiene lo siguiente.

$$Fy = 1000 \cdot 9.81 \cdot 11.546 \times 10^{-3} \cdot 0.0793 \cdot \cos(26) \cdot \frac{0.684}{0.238}$$

$$Fy = 23.20N$$

Para calcular la fuerza de empuje del agua en la dirección de coordenadas y del diagrama de cuerpo libre se tiene la ecuación 6-25

$$Fx = \rho a \cdot g \cdot Ac \cdot Sx \cdot \sin(\theta) \cdot \frac{Lhe}{s} \text{(ecuación 6 -24)}$$

Teniendo en cuenta los valores de la tabla 6-8 se reemplazan en la ecuación y se obtiene lo siguiente.

$$Fx = 1000 \cdot 9.81 \cdot 11.546 \times 10^{-3} \cdot 0.0793 \cdot \sin(26) \cdot \frac{0.684}{0.238}$$

$$Fx = 11.31N$$

Para calcular la fuerza de empuje del agua en la dirección de coordenadas z del diagrama de cuerpo libre se tiene la ecuación 6-27

$$Fz = \rho a \cdot g \cdot Ac \cdot Sx \cdot \sin(\theta) \cdot \tan(\alpha) \cdot \frac{Lhe}{s} \text{(ecuación 6-25)}$$

Teniendo en cuenta los valores de la tabla 6-8 se reemplazan en la ecuación y se obtiene lo siguiente.

$$Fz = 1000 \cdot 9.81 \cdot 11.546 \times 10^{-3} \cdot 0.0793 \cdot \sin(26) \cdot \tan(26) \cdot \frac{0.684}{0.238}$$

$$Fz = 15.82N$$

Teniendo las fuerzas de empuje en dirección axial al tornillo se calculan las demás reacciones presentes en el tornillo sinfín, las cuales se mencionan a continuación:

$$+Ax - Fx - (Wt \cdot \text{sen}(\theta)) = 0 \text{ (ecuación 6-27)}$$

De la ecuación (ecuación 6-29) se despeja la reacción del eje en el eje X en el punto de apoyo denominado A.

$$Ax = Fx - (Wt \cdot \text{sen}(\theta))$$

$$Ax = 11.316 - (82.659 \cdot \text{sen}(26))$$

$$Ax = 47.55$$

$$Mb - Fz \cdot Yc = 0 \text{ (ecuación 6 -30)}$$

De la ecuación 6-32 se despeja la reacción del momento desde el eje a, por lo tanto, se tiene la nueva ecuación.

$$Mb = Fz \cdot Yc$$

$$Mb = 15.829 \cdot 0.044$$

$$Mb = 0.775N \cdot m$$

$$-Fz \cdot 0.342 + Bz \cdot 0.834 = 0 \text{ (ecuación 6-31)}$$

De la ecuación (ecuación 6-33) se despeja la reacción del eje b en el eje de coordenadas Z.

$$Bz = \frac{Fz \cdot 0.342}{0.834}$$

$$Bz = \frac{11.316 \cdot 0.342}{0.834}$$

$$Bz = 4.64N$$

$$-Az - Fz + Bz = 0 \text{ (ecuación 6-29)}$$

De la ecuación (ecuación 6-31) se despeja la reacción del eje A en el eje de coordenadas Z.

$$Az = -Fz + Bz$$

$$Az = -15.829 + 4.640$$

$$Az = -6.54 \text{ N}$$

De la ecuación (ecuación 6-34) se despeja la reacción del eje b en el eje de coordenadas y.

$$(Fy + Whe \cdot \cos(\theta)) \cdot 0.342 + Wh \cdot 0.417 \cdot \cos(\theta) - By \cdot 0.834 + Wb \cdot 0.919 \cdot$$

$$\cos(\theta) = 0 \text{ (ecuación 6-32)}$$

$$By = \frac{(Fy + Whe \cdot \cos(\theta)) \cdot 0.342 + Wh \cdot 0.417 \cdot \cos(\theta) + Wb \cdot 0.919 \cdot \cos(\theta)}{0.834}$$

$$By$$

$$= \frac{(23.201 + 29.138 \cdot \cos(26)) \cdot 0.342 + 41.946 \cdot 0.417 \cdot \cos(26) + 6.478 \cdot 0.919 \cdot \cos(26)}{0.834}$$

$$By = 45.51 \text{ N}$$

De la ecuación (ecuación 6-28) se despeja la reacción del eje A en el eje de coordenadas y.

$$+Ay + By - Fy - (Wt \cdot \cos(\theta)) = 0$$

$$Ay = -By + Fy + (Wt \cdot \cos(\theta))$$

$$Ay = -45.519 + 23.201 + (82.659 \cdot \cos(26))$$

$$Ay = 51.97 \text{ N}$$

En las siguientes figuras 6-36 6-37 6-38 se encuentra diagrama de cuerpo libre, diagrama de fuerza cortante y diagrama de momento flector.

6.5 Diagramas de momento flector y cálculo de ejes.

Figura 6-36

Diagramas de cuerpo libre en las coordenadas X y Y

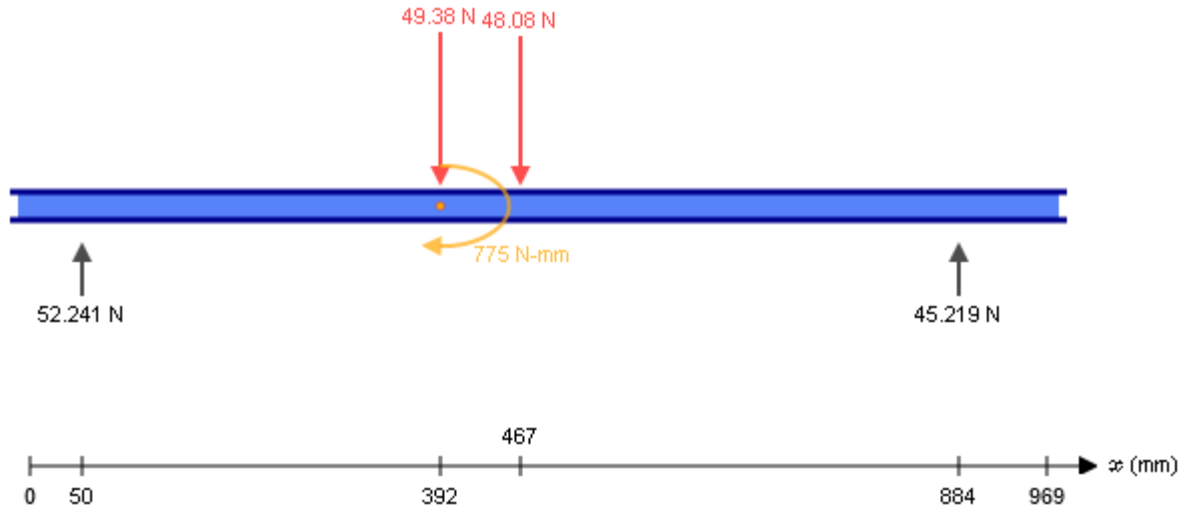


Figura 6-37

Diagrama de fuerza cortante

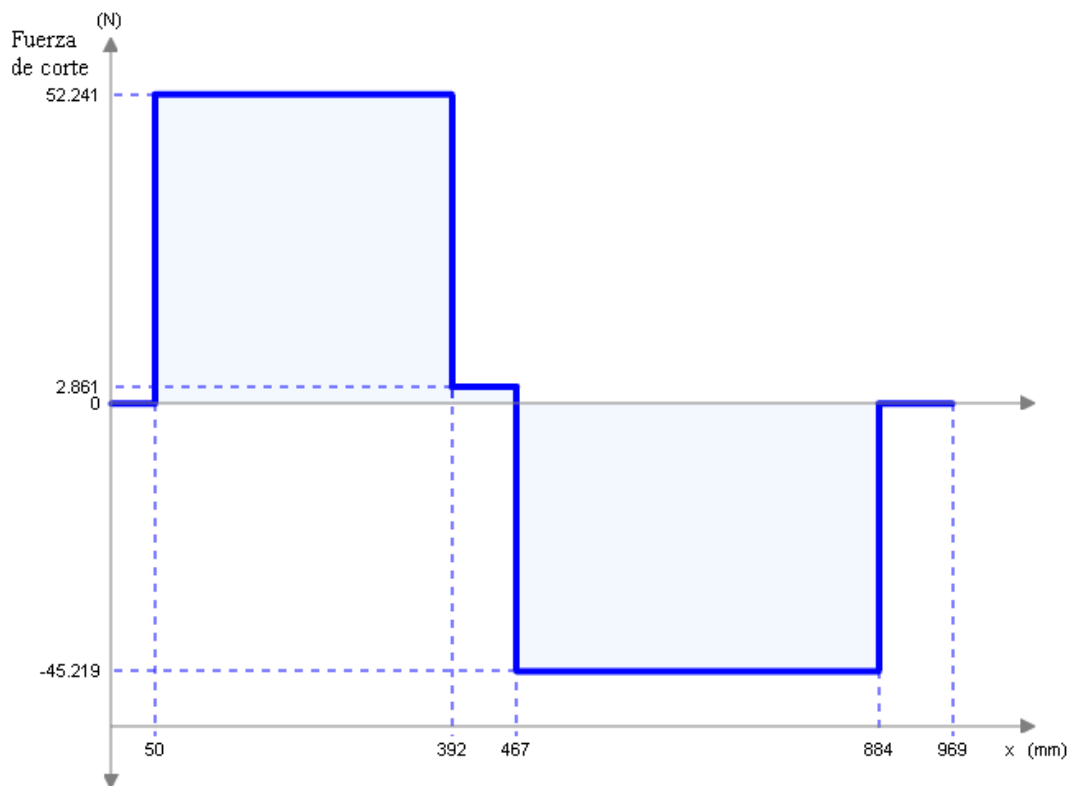
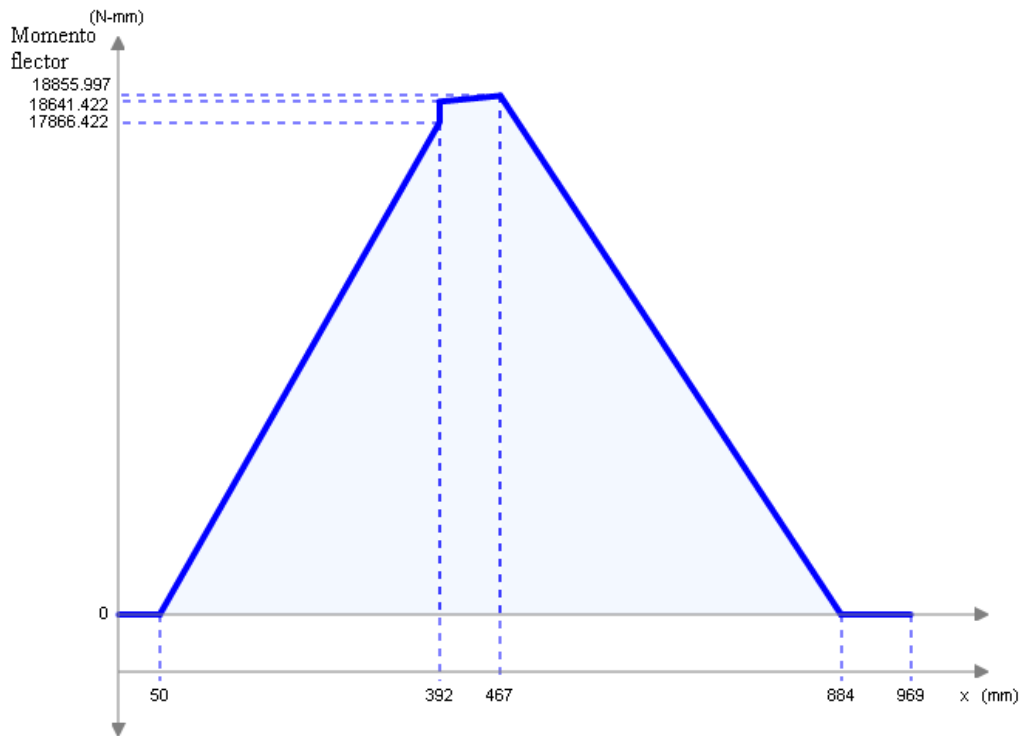


Figura 6-38

Diagrama de momento flector



Fuente: Autor

6.6 Cálculo de los ejes

Teniendo los diagramas se procede con el cálculo para el respectivo diámetro de los ejes a y b donde se instalan los rodamientos, este cálculo se hace mediante el desarrollo de las siguientes ecuaciones donde se tiene en cuenta: el par torsional equivalente (T_e), esfuerzo cortante de diseño (T_d), esfuerzo cortante en la barra (τ) y módulo de sección polar (Z_p)

$$T_e = \sqrt{M^2 + T^2} \text{ (Ecuación 6-36)}$$

Teniendo en cuenta que el eje diseñado para este prototipo estará sometido a la teoría de falla por esfuerzo cortante y combinado, se toma un esfuerzo cortante de diseño como se muestra a continuación en la Ecuación 6-37.

$$\tau_d = \frac{0.50 S_y}{N} \text{ (Ecuación 6-37)}$$

Luego de la consideración anterior se procede con que $\tau = \tau_d$

$$\tau = \frac{T_e}{Z_p} \text{ (Ecuación 6-38)}$$

$$Z_p = \frac{\pi D^3}{16} \text{ (Ecuación 6-39)}$$

Con las ecuaciones 6-36 a 6-38 se obtiene la ecuación para los respectivos diámetros de los ejes donde se instalarán los rodamientos.

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot N}{\pi \cdot s_y} \cdot \sqrt{M^2 + T^2}} \text{ (Ecuación 6-40)}$$

d= Diámetro

N= Factor de seguridad: se toma un valor de 4 debido a los análisis de los esfuerzos, el ambiente al que estará expuesto y se estima una seguridad adicional para tener una mejor confianza; criterio obtenido del libro de máquinas de Robert Mott cuarta edición.

Sy= 250 MPa: Resistencia ala fluencia.

M= 18855.99 N·mm: Momento obtenido de la figura 6-38.

T=2328.14 N·mm: Torque ejercido a lo largo del tornillo.

$$d = \sqrt[3]{\frac{32 \cdot 4}{\pi \cdot 250} \cdot \sqrt{18855.99^2 + 2328.14^2}}$$

$$d = 14.57mm$$

6.7 Selección de rodamientos.

Teniendo en cuenta el diámetro mínimo de los ejes a y b se seleccionará los rodamientos para soportar estos ejes adecuados para determinar la capacidad básica de carga estática y capacidad básica de carga dinámica.

F_r: Carga radial

F_a : Carga axial

Datos

$n = 250$ rpm

\emptyset diámetro de ejes: 14.57 mm mínimo determinado por diseño

$$p = xFr + yFa \text{ (Ecuación 6-42)}$$

Para determinar la carga radial se hace uso de la Ecuación 6-42.

$$F_r = \sqrt{A_y^2 + A_z^2} \text{ Ecuación 6-42}$$

A_y : reacción en $A_y = 51.97$ N

A_z : reacción en $A_z = 6.53$ N

Datos obtenidos anteriormente de las reacciones en el soporte a.

$$Fr = \sqrt{51.975^2 + 6.538^2} = 52.38 \text{ N}$$

Para calcular los parámetros e y Y que dependen de T/C_o ver tabla 6-11

Tabla 6-11.

Factores de carga radial y de empuje, para rodamientos de una hilera de bolas y rodadura profunda.

e	T/C_o	Y	e	T/C_o	Y
0.19	0.014	2.30	0.34	0.170	1.31
0.22	0.028	1.99	0.38	0.280	1.15
0.26	0.056	1.71	0.42	0.420	1.04
0.28	0.084	1.55	0.44	0.560	1.00
0.30	0.110	1.45			

Nota: $X = 0.56$, para todos los valores de Y .

Fuente: M. (2006). *Diseño De Elementos De Maquinas* (4.ª ed.). Pearson Educación.

Tabla: 6-12.

Catálogo de rodamientos SNK.

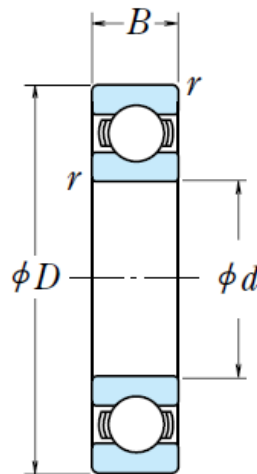
Dimensiones [mm]			Designación
------------------	--	--	-------------

				Índices de carga [N] básica		Velocidad límite rpm	
				estática	dinámica		
d	D	B	r _{min}	Cor	C	aceite	
15	32	9	0,3	2830	5600	2800	6002

Fuente: Corporación SNK

Figura 6-39

Esquema de rodamientos en mm



Fuente: Rodamientos de rígidos de bolas. (2022). MOTION & CONTROL NSK. Recuperado 1 de abril de 2022, de <https://www.nskamericas.com/es/products/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings.html>

Teniendo en cuenta el catálogo SNK y la condición de diámetro mínimo permitido para el diseño, selecciona los rodamientos para verificar su factibilidad en el diseño.

Teniendo en cuenta la tabla 6-12 se selecciona el rodamiento de diámetro interno de 15 mm con sellado DDU.

Para saber el factor de carga axial ecuación (6-42)

F_a : Carga axial = 47.55 N

C_{or} : Capacidad básica de carga estática = 2830 N

F_a/C_{or} Ecuación 6-43

$$\frac{F_a}{C_{or}} = \frac{47.55}{2830} = 0.0168$$

De acuerdo con la tabla 6-12 e: carga límite de empuje es más o menos 0.22

Para saber el valor del factor de la carga axial (y) se hace una interpolación.

$$y = 2.238$$

Carga equivalente:

Sobre el rodamiento a se ejercen cargas radiales y axiales, la carga equivalente está descrita por la ecuación (6-40). Para determinar la carga equivalente dada por el fabricante NSK corporación.

$$p = xFr + yFa \text{ ecuación (6-40).}$$

p: Carga equivalente.

x: Factor radial = 0.56

F_r: Carga radial = 52.38 N

y: Factor de carga axial = 2.23

F_a: Carga axial = 47.55 N

$$p = 0.56 \cdot 52.38 + 2.238 \cdot 47.55 = 135.74 \text{ N}$$

Para determinar la capacidad de carga básica C el fabricante NSK proporciona tablas para factor por velocidad F_n y factor por duración F_l que se muestran en la figura 6-38, de la tabla 6-12 se selecciona el criterio de horas de uso.

Tabla 6-13.

Duración recomendada para rodamientos.

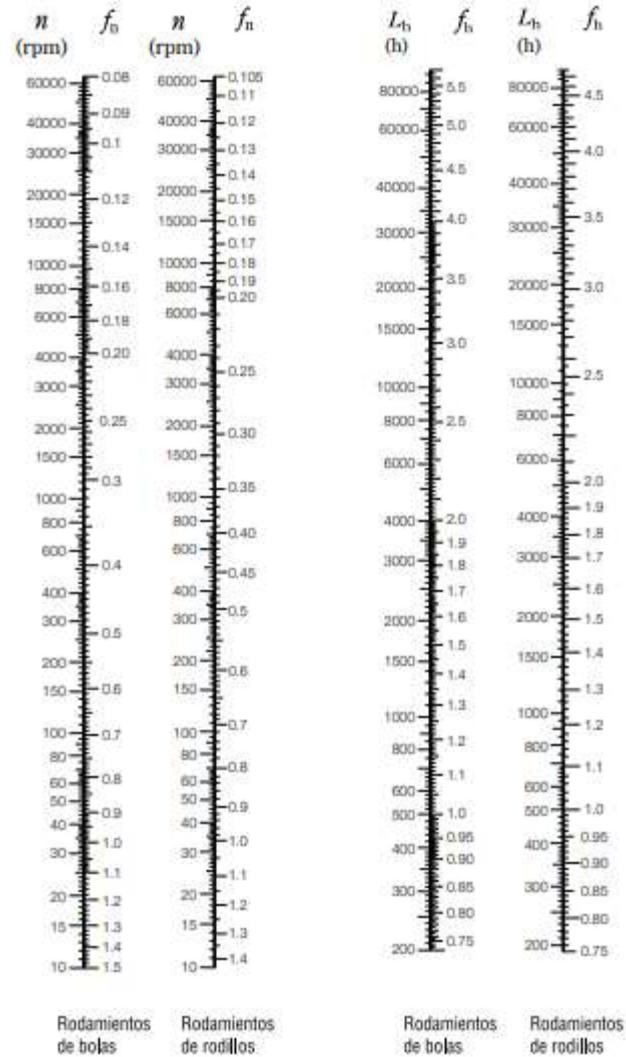
Aplicación	Duración de diseño L_{10} , h
Electrodomésticos	1000-2000
Motores de aviación	1000-4000
Automotores	1500-5000
Equipo agrícola	3000-6000
Elevadores, ventiladores industriales, transmisiones de usos múltiples	8000-15 000
Motores eléctricos, sopladores industriales, máquinas industriales en general	20 000-30 000
Bombas y compresores	40 000-60 000
Equipo crítico en funcionamiento durante 24 h	100 000-200 000

Fuente: M. (2006). *Diseño De Elementos De Maquinas* (4.^a ed.). Pearson Educación

Una vez obtenida la duración diseño se hace uso de la figura (6-40)

Figura 6-40

Cargas para los rodamientos NSK



Fuente: Rodamientos de rígidos de bolas. (2022). MOTION & CONTROL NSK. Recuperado 1 de abril de 2022, de <https://www.nskamericas.com/es/products/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings.html>

Para calcular la carga básica dinámica se hace uso de la Ecuación 6-44

$$C_r = p \cdot Fl / Fn \text{ Ecuación 6-44}$$

C_r: Carga básica dinámica.

Fl: Factor por funcionamiento.

Fn: Factor de velocidad.

p: Carga equivalente.

$$C_r = 135 \cdot \frac{5.8}{0.5} = 1566 \text{ N}$$

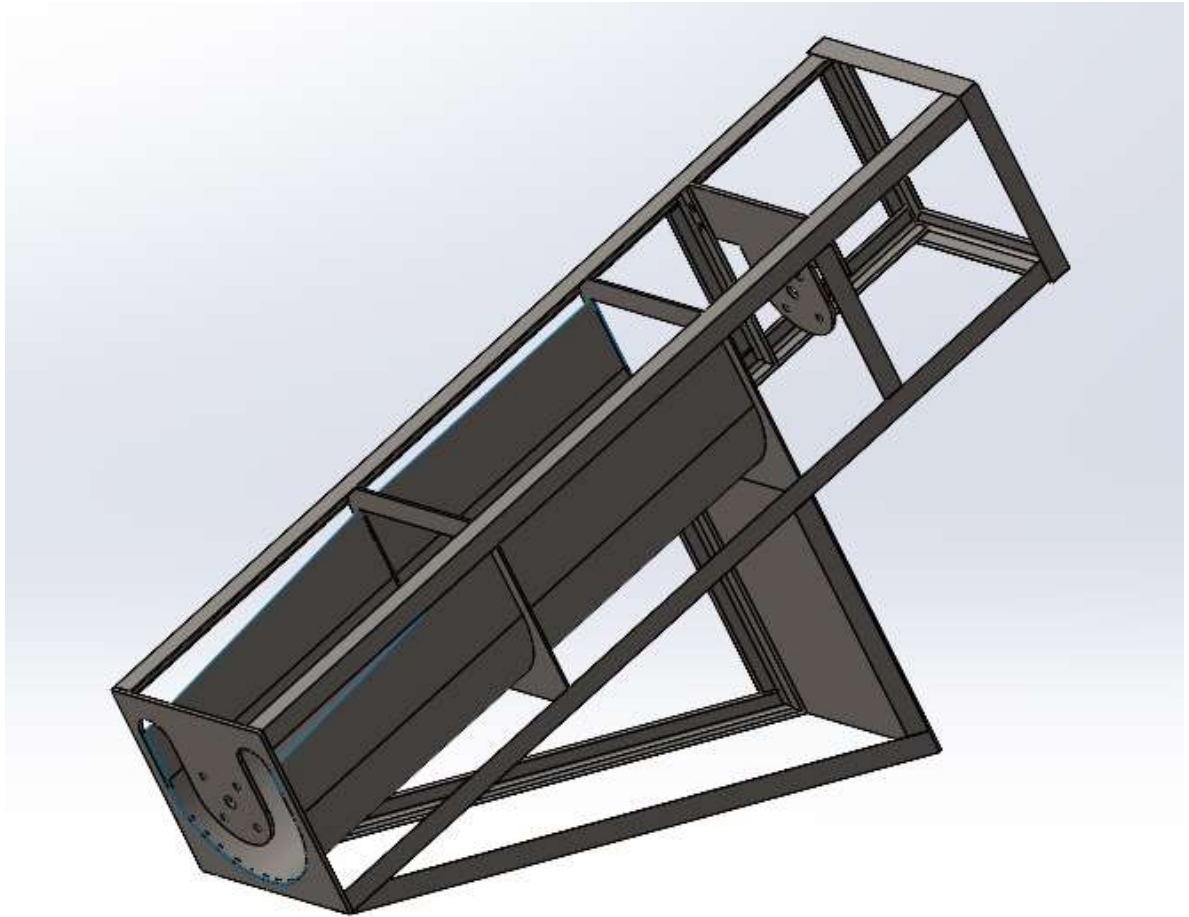
Teniendo la capacidad de carga básica C_r es satisfactorio, el rodamiento escogido 6002 del catálogo de NSK con un diámetro interno de 15 mm con una carga básica de 2830 N de tipo de sellado de goma de contacto DDU con resistencia al agua.

6.8 Análisis estático para la estructura que soportara el hidrotornillo.

Para tener el análisis estático, se debe diseñar una estructura desarmable para poder hacer un fácil mantenimiento, fácil fabricación y que no conlleve piezas especiales de fabricación que puedan generar sobre costos, además se debe tener en cuenta geometrías del hidrotornillo como lo son diámetro exterior del hidrotornillo: 202 mm, longitud total del hidrotornillo: 834 mm, longitud de la canal: 684 mm; ángulo de inclinación: 26°. Basado en estas características, la estructura se fabrica en dos fases para poder armar el tornillo sinfín dentro de la estructura, una de ellas comprende la parte estructural de soporte, la canal y la platina de soporte del tornillo sinfín inferior y la otra comprende la platina de soporte superior y el soporte del generador la cual se sujeta a la primera con tonillos. Se emplea ángulo 1/8 x 1" ATSM A36 y lámina ATSM A36 3/16"; con estas condiciones se diseña en Solidworks la estructura que se ajuste a las medidas geométricas que caracterizan el hidrotornillo figura 6-41.

Figura 6-41

Estructura de soporte del hidrotornillo



Fuente: autor

6.8.1 Selección de material

Para llevar a cabo el estudio estático se debe definir las propiedades físicas del material, las propiedades del material describen el comportamiento de este, para estudios estructurales. Para la selección del material se tiene en cuenta aspectos como son disponibilidad en el mercado y costos del material, para este prototipo se plantea el uso del material ASTM A36 acero al carbono material isotrópico elástico con un límite elástico de 250 MPa y un límite a la tracción de 400 MPa y de una densidad de 4850 Kg/m^3 material principalmente utilizado en la fabricación de estructuras en acero soldadas y atornilladas, ver tabla 6-14.

Tabla 6-14.**Tabla de propiedades físicas del material ASTM A36.**

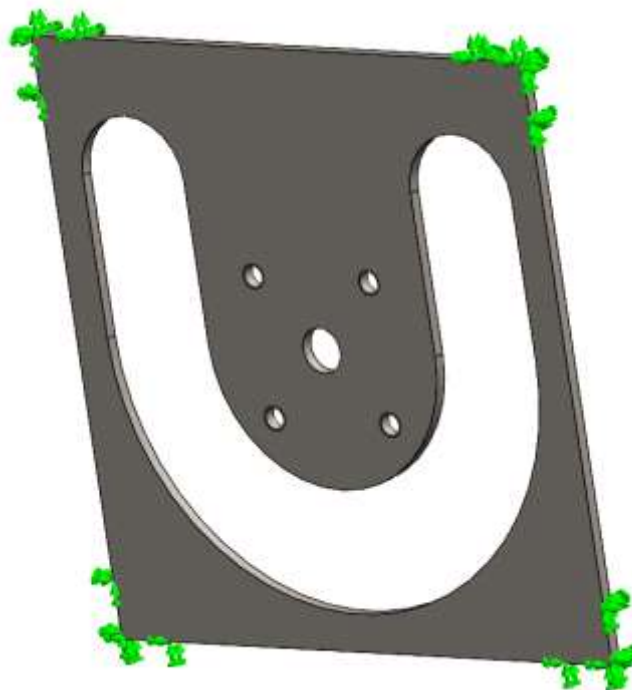
Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	200000	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.26	N/D
Módulo cortante	79300	N/mm ²
Densidad de masa	7850	kg/m ³
Límite de tracción	400	N/mm ²
Límite de compresión		N/mm ²
Límite elástico	250	N/mm ²
Coefficiente de expansión térmica		/K
Conductividad térmica		W/(m·K)
Calor específico		J/(kg·K)
Cociente de amortiguamiento del material		N/D

Fuente: Autor tomada de SolidWorks.

6.8.2 Sujeciones y cargas

Las cargas y sujeciones definen el entorno en el que se encuentra la estructura teniendo en cuenta los resultados obtenidos por el hidrotornillo, se hace estudio el estudio en las piezas que soportaran el peso del tornillo y el empuje del agua.

Figura 6-42***Geométrica fija platina inferior***

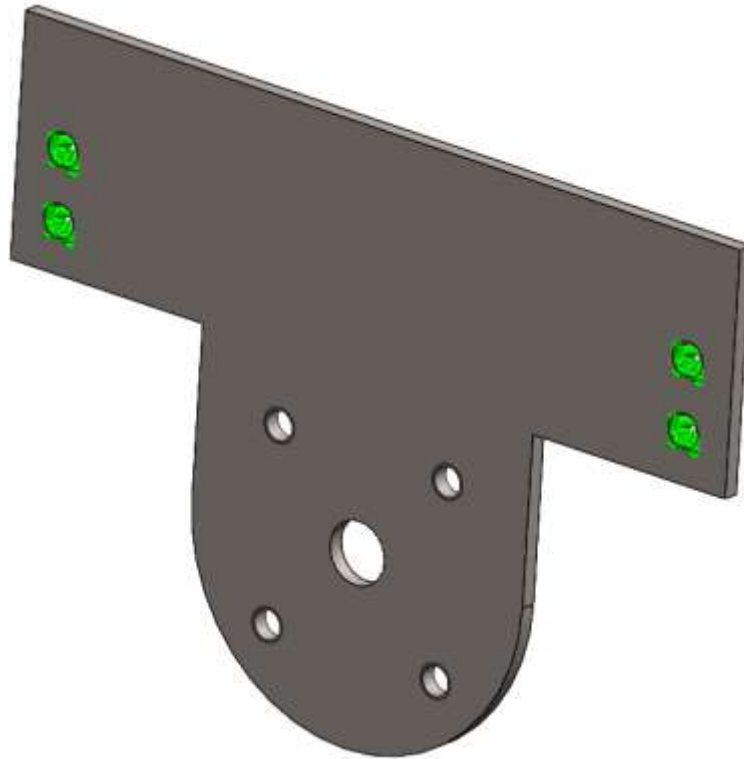


Fuente: autor

En la figura 6-42 se muestra la sujeción fija a la platina inferior que estará sujeta a los ángulos.

Figura 6-43

Geométrica fija platina superior



Fuente: autor

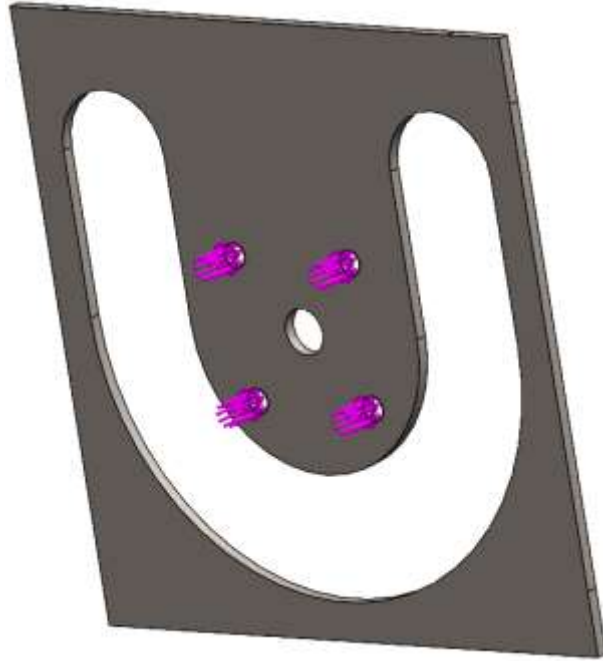
En la figura 6-43 se muestra la sujeción fija de la platina superior que estará sujeta a los ángulos mediante pernos.

6.8.3 Cargas externas

Se aplican cargas externas en los sólidos, platina superior e inferior para determinar el análisis estático, las cargas ejercidas en los sólidos inducen reacciones internas y fuerzas con el fin de llevar al sólido a un estado de equilibrio y tener los resultados de desplazamientos, tensiones y deformaciones sometidas a las cargas externas.

Figura 6-44

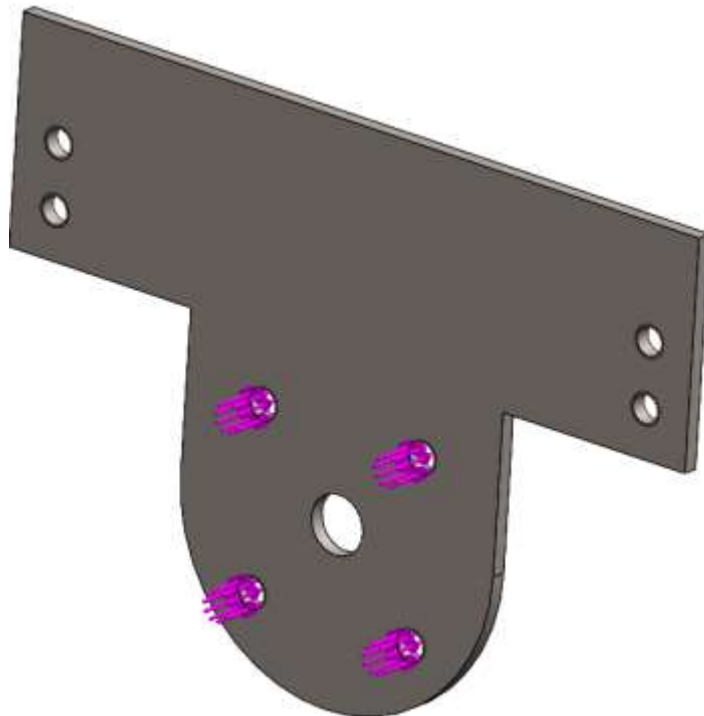
Fuerza ejercida por el agua en el plano x a la platina inferior



Fuente autor

Figura 6-45

Fuerza ejercida por el agua en el plano x a la platina superior

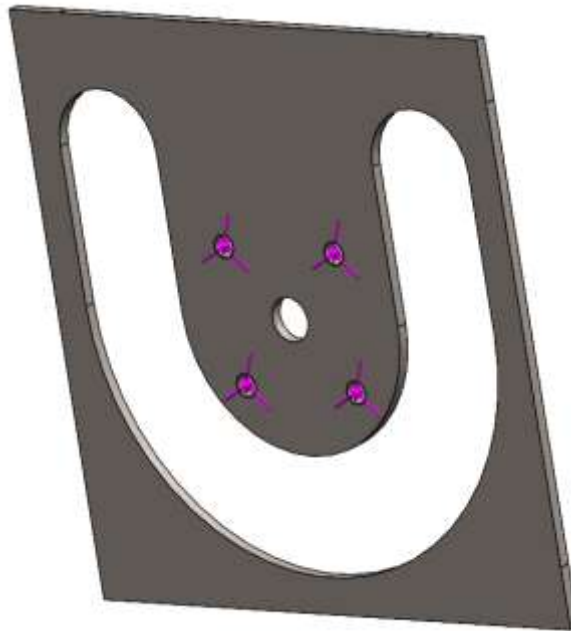


Fuente: Autor

Para las figuras 6-44 y 6-45 se tiene en cuenta la fuerza de empuje que tiene el agua sobre el tornillo en dirección x ver diagrama de cuerpo libre, figura 6-37, $F_x=11.31 \text{ N}$

Figura 6-46

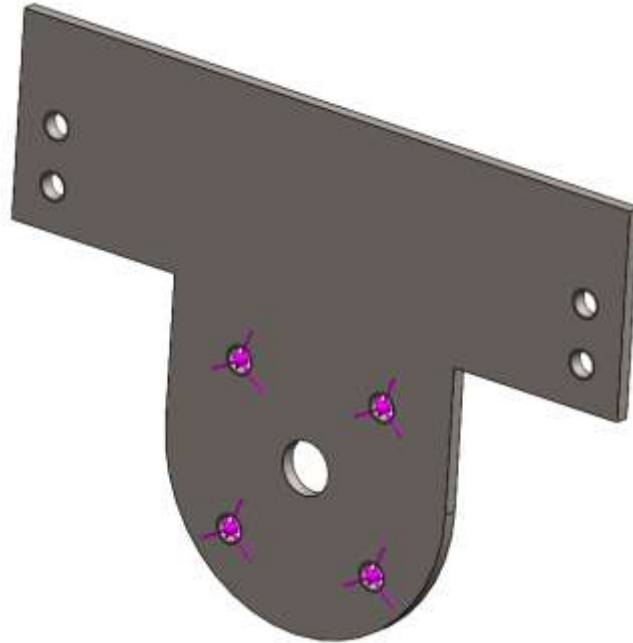
Peso ejercido del hidrotornillo en la platina inferior



Fuente: Autor

Figura 6-47

Peso ejercido del hidrotornillo en la platina superior



Fuente: Autor

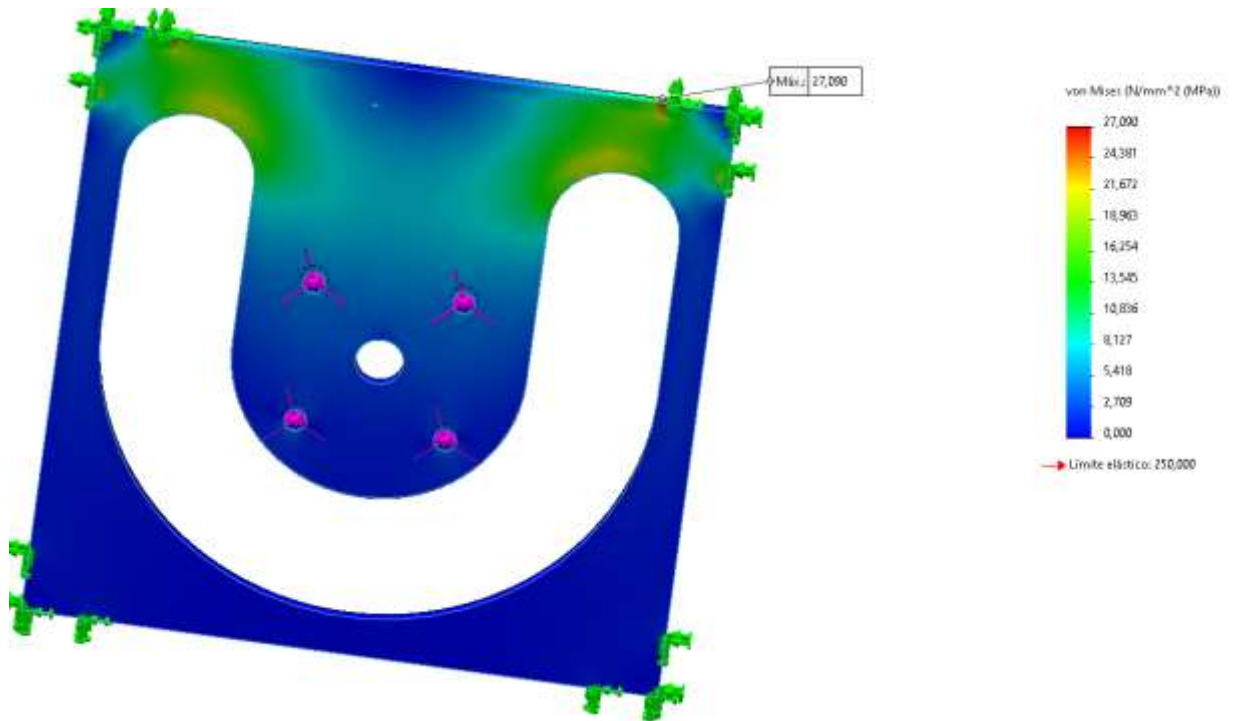
Para las figuras 6-46 y 6-47 se tiene en cuenta el peso del hidrotornillo soportado en cada platina, peso del tornillo 8.45Kg.

6.8.4 Máxima tensión von mises.

En el análisis estático se tiene en cuenta el criterio de von mises “teoría de la energía de distorsión” donde para un material dúctil comienza a ceder mayormente en el límite elástico, se utiliza como límite de tensión para este estudio el acero ASTM A36 tiene un límite elástico de 250 MPa, mediante el estudio realizado en solidworks se obtiene el siguiente resultado figura (6-48 y 6-49)

Figura 6-48

Análisis de tensión platina inferior

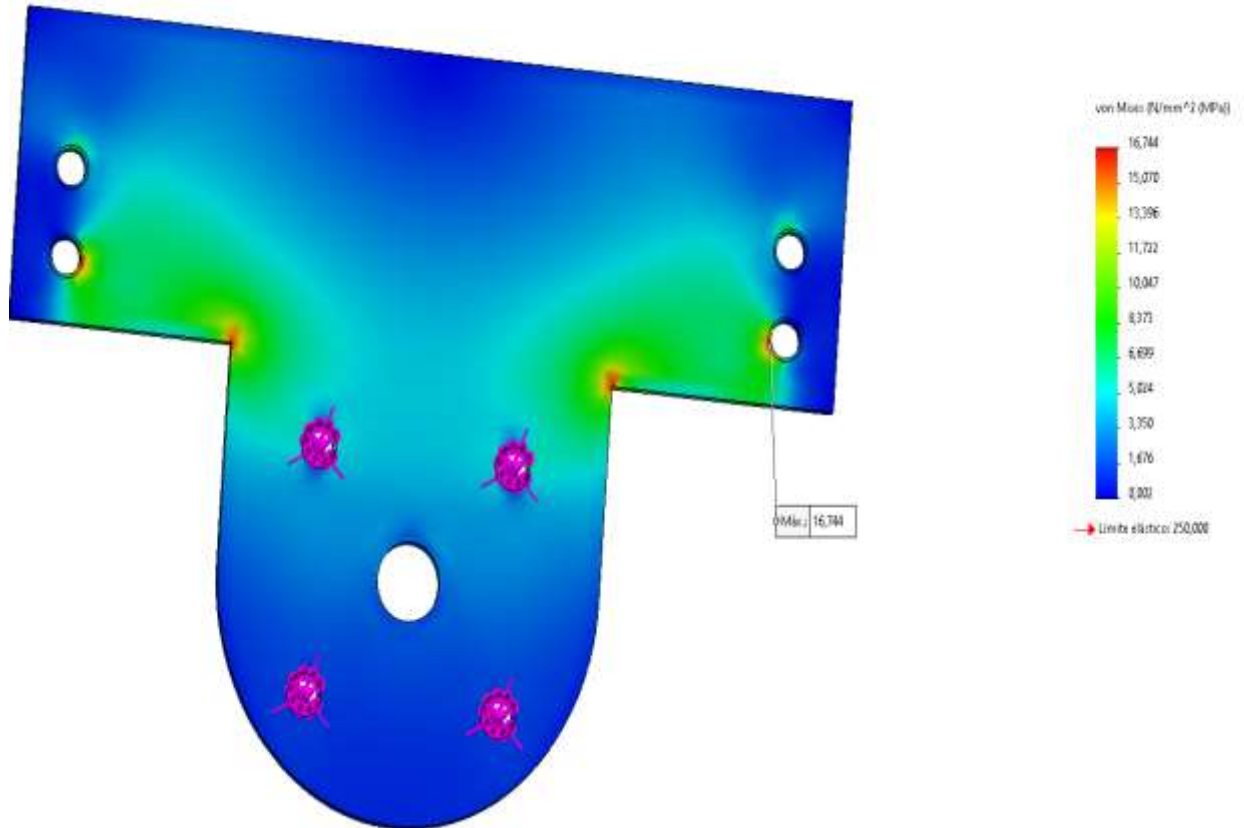


Fuente: autor

En el análisis estático de tensiones se presenta una tensión máxima 27,09N/mm² (MPa) en la platina inferior ubicada en las sujeciones de los ángulos superiores.

Figura 6-49

Análisis de tensión platina superior



Fuente: Autor

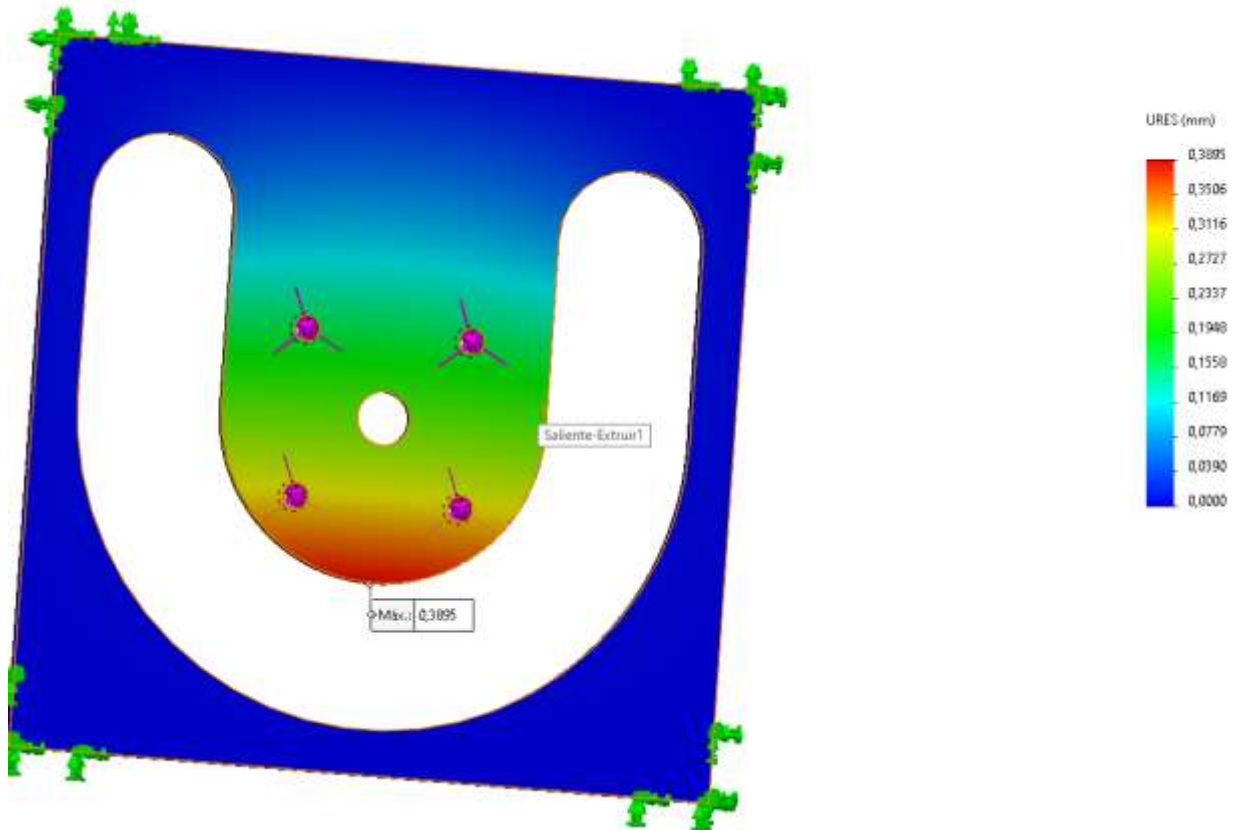
En el análisis estático de tensiones se presenta una tensión máxima $16,74 \text{ N/mm}^2$ (MPa) en la platina superior ubicada en las sujeciones desmontables.

6.8.5 *Análisis de desplazamientos.*

La teoría lineal asume que existen desplazamientos pequeños. También supone que las cargas aplicadas en áreas de contacto no sufren de desplazamientos lineales, por lo cual los desplazamientos para esta estructura estarán mayormente en las platinas que soportan el hidrotornillo.

Figura 6-50

Análisis de desplazamientos platina inferior

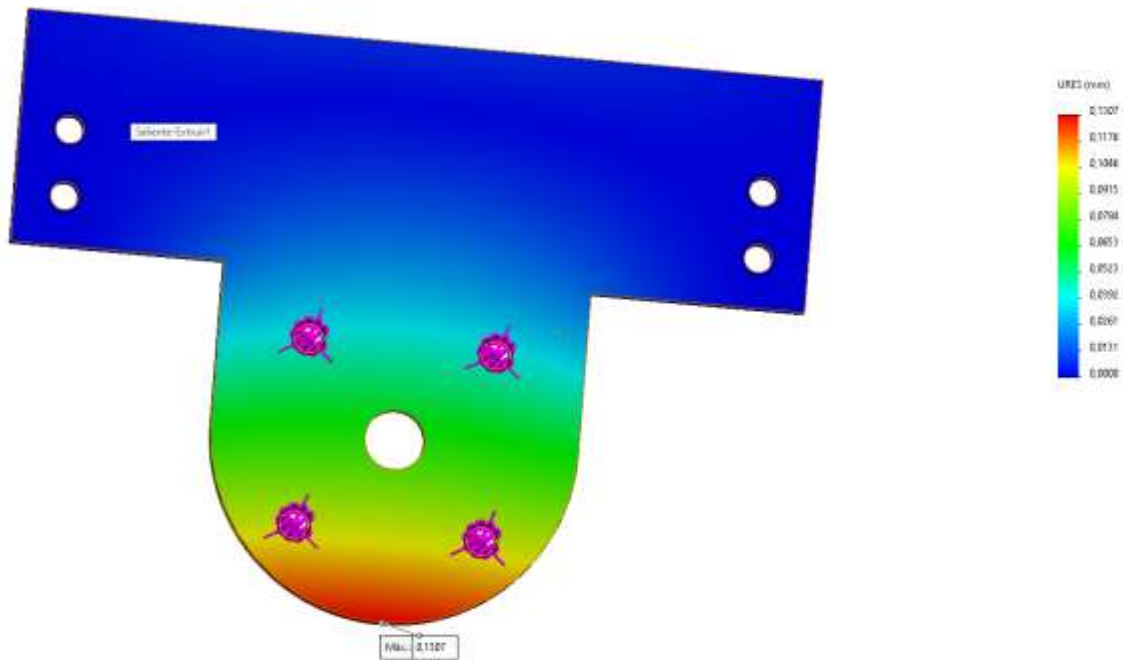


Fuente: Autor

En el análisis estático se refleja un desplazamiento máximo de 0.389 mm en la platina inferior que soporta el hidrotornillo.

Figura 6-51

Análisis de desplazamientos platina inferior



Fuente: Autor

En el análisis estático se refleja un desplazamiento máximo de 0.130 mm en la platina inferior que soporta el hidrotornillo.

En el análisis estático es satisfactorio debido a que las tensiones y desplazamientos no son críticos para el diseño de la estructura.

$$F.S. = \frac{\sigma_{material}}{\sigma_{diseño}} \text{ ecuación (6-45)}$$

F.S.: Factor de diseño.

$\sigma_{material}$: Límite elástico del material.

$\sigma_{diseño}$: Esfuerzo permitido del diseño.

Un factor de diseño seguro debe ser mayor a 1 para saber si el diseño es seguro se reemplaza los valores del material y del diseño en la Ecuación 6-45.

$\sigma_{material}$: 250 MPa

$\sigma_{diseño}$: 27.09 MPa

$$F.S. = \frac{250}{27.09}$$

$$F.S. = 9.22$$

Dado el resultado de factor de seguridad de 9.22, la estructura es confiable bajo las condiciones de carga del hidrotornillo.

7. Sistemas eléctricos del hidrotornillo.

7.1 Selección del generador.

Mediante las dos alternativas que se presentaron en el capítulo 4 sobre las posibles maneras de acoplar el generador al tornillo sinfín, se tiene en cuenta el rango de velocidad que puede llegar a tener el generador, también la variedad de generadores eléctricos que hay en el mercado se hace una selección mediante criterios técnicos y empíricos con base en los costos, obteniendo como resultado un motor síncrono que funciona como generador eléctrico. Se consideró la posibilidad de instalar un generador eléctrico convencional, pero esto aumentaba los costos y, ya que este proyecto está enfocado en el diseño sobre las geometrías del tornillo sinfín y no se hace un estudio profundo acerca de los demás componentes.

Al tener la selección del generador se procede a la verificación del funcionamiento acoplando el motor síncrono a un torno convencional el cual se le pueden hacer cambios de la velocidad de giro teniendo en cuenta que la velocidad de operación que indica el fabricante es de 60 rpm y así entregar una potencia de 18 W a 110 V AC se hacen pruebas de funcionamiento con velocidades de giro que van desde las 31.5 rpm hasta las 140 rpm descritas en las tablas 7- 15 y 7-16 a continuación se muestran los datos del motor síncrono expresados por el fabricante

n: Velocidad de rotación = 60 [rpm]

T: Torque máximo con carga = 1.2 [N · m]

P: potencia = 18 [W]

V: Voltaje = 110 V corriente alterna (AC)

Figura 7-52

Motor síncrono



Fuente: Autor

Al contar con el motor síncrono se procede a realizar pruebas de funcionamiento acoplándolo a un torno convencional para tomar medidas de voltaje con diferentes velocidades de rotación, en la tabla 7-16 se realizan pruebas de funcionamiento en vacío, mientras que en la tabla 7-15 se conecta una carga (lámpara led) de 10 W.

Figura 7-53

Pruebas de velocidad en torno convencional



Fuente: Autor

Para la toma de medidas de tensión es necesario hacer uso de un voltímetro y conectarlo en paralelo a la lámpara de iluminación led, teniendo en cuenta esto a continuación se muestran los resultados con las diferentes variaciones de velocidad de giro que da el torno convencional.

Tabla 7-15.

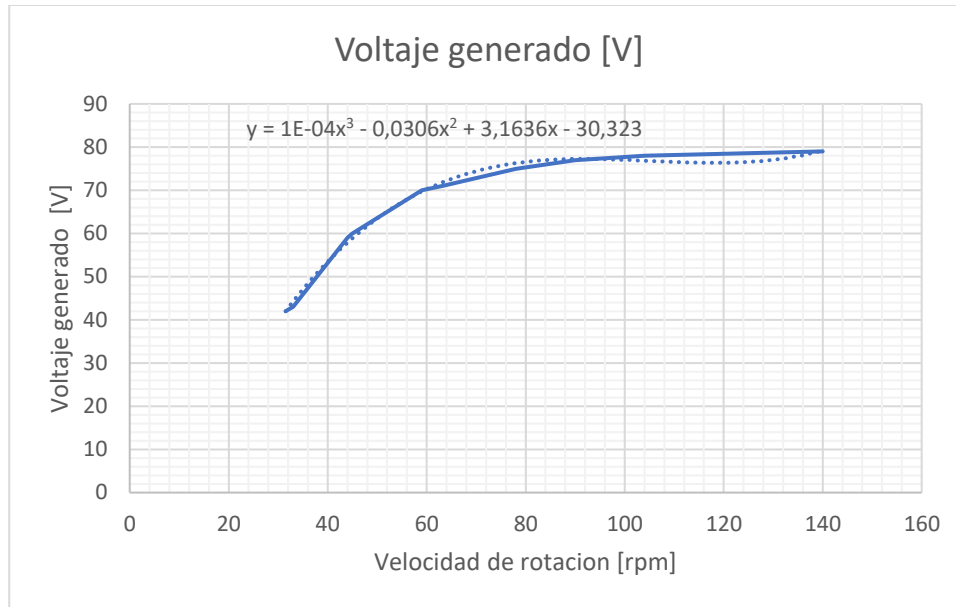
Prueba del generador con carga de 10 W.

Velocidad de rotación [rpm]	Voltaje generado [V]
31,5	42
33	43
44	59
45	60
59	70
63	71
78	75
90	77
104	78
140	79

Fuente: Autor

Figura 7-54

Gráfica de voltaje del generador con carga de 10 W.



Fuente: Autor.

Tabla 7-16.

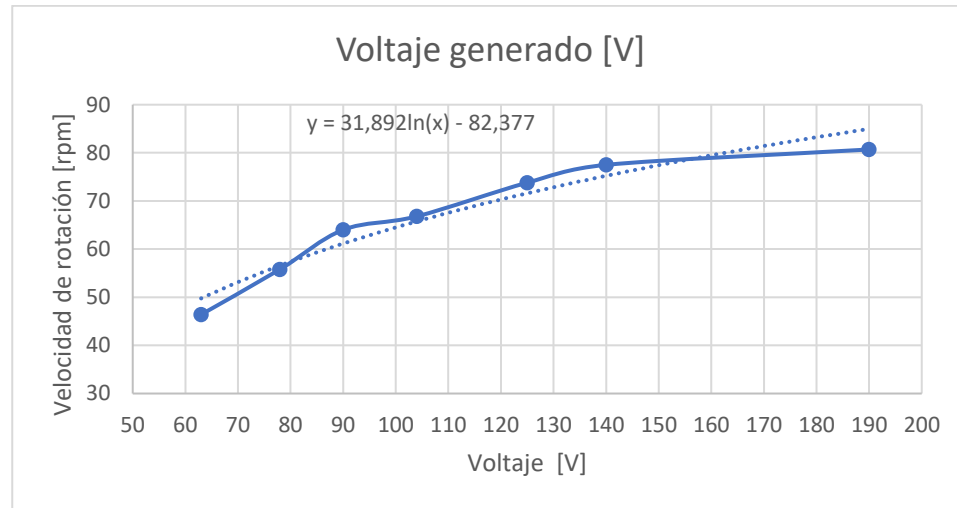
Prueba del generador sin carga.

Velocidad de rotación [rpm]	Voltaje generado [V]
31,5	59
33	65
44	79
45	95
59	102
63	114
78	117
90	117
104	130
140	147

Fuente: Autor

Figura 7-55

Gráfica de voltaje del generador sin carga



Fuente: Autor

Teniendo en cuenta las gráficas ilustradas anteriormente se puede determinar que al momento de conectar la carga (lámpara led 10 W) el voltaje generado disminuye en cuanto al que se genera sin la carga conectada. Se determina que según las características mencionadas por el fabricante acerca del motor síncrono al girar a una velocidad de giro de 60 rpm debe generar 110 V AC lo cual lo cumple sin la carga conectada, mientras que al momento de conectar la lámpara led al motor síncrono como generador y realizar las pruebas a una velocidad de 60 rpm solo genera 70 V AC

Para la fuente de iluminación se planea instalar una lámpara led de 10 W donde será conectada junto a unas protecciones, un interruptor y posteriormente la fuente que en este caso será el motor síncrono de 18 W.

Figura 7-56

Lámpara led de 10 W.



Fuente: Autor

Las principales características de esta lámpara son:

Pl: Potencia=10 W

VI: Voltaje=110 V AC

f: Frecuencia 50-60 Hz

Lumens: 80+-10

7.2 Selección de fusible y conductor eléctrico.

Para el circuito eléctrico se debe utilizar una protección para los componentes utilizados ante sobretensiones o cortocircuitos que puedan llegar a ocurrir, para este caso se usó de un fusible de vidrio de acción rápida, a continuación, se muestra los cálculos que se realizaron para seleccionarlo donde se tiene en cuenta el reglamento electrotécnico para baja tensión²¹.

Paso 1: selección del fusible.

²¹ Reglamento electrotécnico para baja tensión e ITC (Edición actualizada a 16 de marzo de 2022 ed., Vol. 1). (s. f.). Agencia Estatal Boletín Oficial del del Estado.

Para la selección del fusible se tiene en cuenta la carga máxima que se puede llegar a generar con respecto a la corriente, se debe tener en cuenta la potencia para la cual se está diseñando el prototipo (17 W) obtenida del numeral 4.7 y el voltaje máximo que puede llegar a generar el motor síncrono conectado como generador es de 79 V evidenciada en la tabla 7-15 donde se muestra resultados de la comparativa de voltaje y velocidad de giro.

$$I = \frac{P}{V} \text{ (ecuación 7-46)}$$

I= corriente del circuito.

P= potencia generada.

V= voltaje generado.

$$I = \frac{17W}{79V} = 0.21 \text{ A}$$

Para la selección de fusibles se debe tener en cuenta un valor de sobrecarga del 125 %

$$I_p = I \cdot \%s \text{ (ecuación 7-47)}$$

I_p =Corriente de sobrecarga

I= corriente del sistema

$\%s$ =porcentaje de seguridad

$$I_p = 0.21 \cdot 1.25 = 0.26 \text{ A}$$

por tal motivo la corriente de apertura del fusible debe ser de 0.26 A, teniendo en cuenta los elementos a utilizar, la magnitud del prototipo y la tabla 7-17 se empleará un fusible de 0.25 A ya que este fusible es el inmediatamente más cercano a la sobrecarga.

Tabla 7-17.

Referencia de fusibles presentes en el mercado.

Amper	Código Internacional	Código DELTA CHILE
0,25	F250mAL250V	TL11-0A25H250
0,315	F315mAL250V	TL 11-0A315H250
0,4	F400mAL250V	TL11-0A4H250
0,5	F500mAL250V	TL11-0A5H250
0,63	F630mAL250V	TL11-0A63H250
0,8	F800mAL250V	TL11-0A8H250
1	F1AL250V	TL11-1H250
1,6	F1.6AL250V	TL11-1A6H250
2,5	F2.5AL250V	TL11-2A5H250
3,15	F3.15AL250V	TL11-3A15H250
4	F4AL250V	TL11-4H250
5	F5AL250V	TL11-5H250
6,3	F6.3AL250V	TL11-6A3H250
8	F8AL250V	TL11-8H250
10	F10AL250V	TL11-10H250

Fuente: Schurter Electronics (india) pvt. Ltd. (2015, 11 mayo). TABLA DE CÓDIGOS FUSIBLES DE VIDRIO PROCEDENCIA ASIÁTICA. <https://fusibles.cl/>.

<https://fusibles.cl/catalogos/sheets/TABLA%20DE%20C%C3%93DIGOS%20FUSIBLES%20DE%20VIDRIO%20TAMA%C3%91O%205%20x%2020%20mm%20FUSI%C3%93N%20R%C3%81PIDA%20250VAC.pdf>

Paso 2: Selección del cable conductor.

Tabla 7-18.

Referencia de conductores según la instalación.

A		Conductores aislados en tubos empotrados en paredes aislantes		3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR					
A2		Cables multiconductores en tubos empotrados en paredes aislantes	3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR						
B		Conductores aislados en tubos en montaje superficial o empotrados en obra				3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR			
B2		Cables multiconductores en tubos en montaje superficial o empotrados en obra			3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR				
C		Cables multiconductores directamente sobre la pared ¹⁾					3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR		
E		Cables multiconductores al aire libre ²⁾ Distancia a la pared no inferior a 0,3D ³⁾						3x PVC	2x PVC	3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR		
F		Cables unipolares en contacto mutuo ⁴⁾ Distancia a la pared no inferior a D ⁵⁾						3x PVC			3x XLPE o EPR ⁶⁾		
G		Cables unipolares separados mínimo D ⁶⁾								3x PVC ⁷⁾			3x XLPE o EPR
		mm ²	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Cobre		1,5	11	11,5	13	13,5	15	16	-	18	21	24	-
		2,5	15	16	17,5	18,5	21	22	-	25	29	33	-
		4	20	21	23	24	27	30	-	34	38	45	-
		6	25	27	30	32	36	37	-	44	49	57	-
		10	34	37	40	44	50	52	-	60	68	76	-
		16	45	49	54	59	66	70	-	80	91	105	-
		25	59	64	70	77	84	88	96	106	116	123	166
		35		77	86	96	104	110	119	131	144	154	206
		50		94	103	117	125	133	145	159	175	188	250
		70				149	160	171	188	202	224	244	321
		95				180	194	207	230	245	271	296	391
		120				208	225	240	267	284	314	348	455
		150				236	260	278	310	338	363	404	525
	185				268	297	317	354	386	415	464	601	
	240				315	350	374	419	455	490	552	711	
	300				360	404	423	484	524	565	640	821	

Fuente: Intensidades admisibles (A) al aire 40 °C. N.º de conductores con carga y naturaleza del aislamiento. (s. f.). [Grafico]. En *Reglamento electrotécnico para baja tensión e ITC* (Edición actualizada a 16 de marzo de 2022 ed., p. 123).

Teniendo en cuenta la tabla 7-18 se utiliza un cable multiconductor que estará expuesto al aire libre de filamentos internos y cuenta con un recubrimiento de PVC, se selecciona un conductor de cobre de 1.5 mm² donde su intensidad admisible es de 16 A, comercialmente se consigue un cable marca centelsa cal 18 el cual cumple con estas especificaciones y es el que se propone instalar.

Para realizar las conexiones eléctricas que se indican en el circuito eléctrico de la figura 7-55 se tiene en cuenta indicaciones dadas en la norma RETIE resolución 9 0708 de agosto de 30 de

2013²² donde los conectores, terminales y empalmes para conductores eléctricos se deben hacer con conectores y uniones a presión donde estas terminales deben ser del mismo material garantizando que el empalme no se vea afectado por los cambios de temperatura debido al paso de corriente; los elementos utilizados deben estar debidamente rotulados y garantizar que al realizar el cableado no queden partes energizadas que puedan entrar en contacto con las personas, los elementos deben estar protegidos con recubrimientos a prueba de lluvia y si se requiere un empalme en el exterior se debe garantizar la hermeticidad entre los conductores mediante el uso de fundas termo encogibles las cuales hacen la función de aislantes eléctricos.

Por otra parte, se debe tener en cuenta que los elementos eléctricos utilizados pueden llegar a estar en contacto con salpicaduras de agua, polvo y expuestos al aire libre por un lapso de tiempo de pruebas, por tal motivo se recomienda que estos elementos cumplan con la normatividad IP65 la cual indica que el equipo es hermético al polvo y protegido contra el agua proyectada.

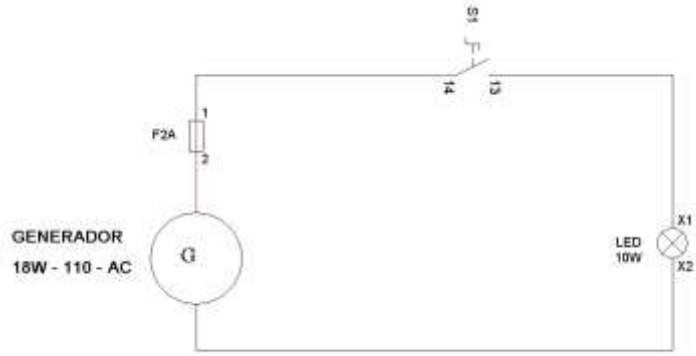
7.3 Circuito eléctrico.

Adicional al generador, lámpara led, y el fusible, se propone instalar un interruptor para tener un control del paso de corriente a la lámpara A continuación se enuncia el plano de conexión de estos elementos.

Figura 7-57

Plano circuito eléctrico

²² Reglamento técnico de instalaciones eléctricas - RETIE. (2022). Minenergía. <https://www.minenergia.gov.co>



Fuente: Autor.

8. Resultados finales

8.1 Construcción del prototipo

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos de las geometrías se procede a la construcción del prototipo teniendo en cuenta los planos realizados ver anexos i y anexos ii, la estructura junto con el tornillo se hizo con acero ATSM A36 y se le aplicó pintura electroestática.

Figura 8-58

Tornillo sinfín y estructura.



Fuente: Autor

Para mejor presentación de la estructura y teniendo en cuenta que parte de ella estará sumergida en el agua se le realizó un procedimiento de pintura electrostática.

Figura 8-59

Construcción de la estructura



Fuente: Autor

Para la fabricación de la estructura se hizo uso de ángulo de 1 in x 1/8 in en el proceso de soldadura por arco teniendo en cuenta los planos realizados ver anexos i y anexos ii.

Figura 8-60

Construcción del tornillo sinfín



Fuente: Autor

Para el desarrollo del tornillo sinfín se tiene en cuenta un eje hueco de un tubo SCH 40 de diámetro de 4 in al cual se le realizó un mecanizado para obtener el diámetro exterior necesario para el tornillo sinfín, las hélices se cortaron con láser ver anexos I y anexos II donde se detalla el proceso de fabricación.

8.2 Puesta en marcha

Para la respectiva puesta en funcionamiento del hidrotornillo se llevó a cabo una pequeña intervención, para ello se emplearon lonas para posteriormente llenarlas de tierra e instalarlas en el lugar que se destinó para realizar el represamiento, se instalaron 2 estacas a las lonas para tener una mejor estabilidad y posteriormente realizar las pruebas de funcionamiento al prototipo, se ubicó la estructura en el lugar donde se realizó el previo estudio de caudal dejándola en la parte central del cauce del riachuelo, las lonas se colocaron en los dos lados hasta represar el agua al nivel de entrada del hidrotornillo evitando la mayor cantidad de fugas posibles por los bordes de la estructura y las uniones de las lonas, al haber realizado la instalación descrita anteriormente se comprueba que el nivel de llenado de agua en hidrotornillo ocupa el 50% y genera movimiento rotacional lo que permite realizar las respectivas pruebas.

Como resultado de las pruebas de funcionamiento se obtuvo los siguientes datos: Voltaje generado 75 V, una corriente de 0.19 A y así una potencia generada de 14.25 W, para la verificación de la velocidad de rotación se hace uso de las pruebas realizadas al generador que se mencionaron en el numeral 7, de manera indirecta se obtuvo un resultado de 77 rpm, teniendo en cuenta el voltaje generado por el motor síncrono a distintas velocidades dadas por el torno donde se instaló.

Al momento de terminar las pruebas se retiraron las lonas y estacas utilizadas para la intervención para así no afectar las condiciones ambientales del lugar y que se generaran alteraciones al cauce del riachuelo en épocas donde se presenten crecientes por lluvias presentadas en el sector.

Figura 8-61

Verificación de giro del hidrotornillo



Fuente: Autor

Hecho la instalación del hidrotornillo en el punto mencionado se verifica su funcionamiento y se procede con las respectivas pruebas y toma de resultados.

Figura 8-62

Voltaje generado



Fuente: Autor

Figura 8-63

Corriente consumida por la lámpara



Fuente: Autor

Para la toma de resultados fue necesario el uso de un multímetro, el cual está instalado en la caja eléctrica del circuito del prototipo, el cual muestra un resultado de 75 V (Figura 8-62), para la toma de medida de corriente AC consumida por la lámpara fue necesario utilizar una pinza amperimétrica, ya que el dispositivo instalado en el circuito eléctrico no indica medidas de

corriente bajas como las que se encuentran en este circuito, la corriente consumida por la lámpara es de 0.19 A (Figura 8-61).

Figura 8-64

Verificación de funcionamiento



Fuente: Autor

Como se muestra en la figura anterior el prototipo funcionando con la carga conectada se obtiene una fuente de iluminación satisfactoria, con los parámetros que se tuvieron en cuenta para llevar a cabo este prototipo se cumplió el objetivo.

9. Conclusiones

- Se toman en cuenta ciertos parámetros de diseño para poder calcular las dimensiones de fabricación del tornillo sinfín, no obstante, los lineamientos sugeridos por las principales fuentes señalan un sistema de iteración para el desarrollo de las dimensiones principales del tornillo. Para el desarrollo de estas geometrías utilizadas de este prototipo se enunciaron condiciones iniciales requeridas para el diseño del tornillo como lo fue el caudal disponible el cual se ubicó el riachuelo donde se pudieran hacer las pruebas pertinentes y no se presentarían inconvenientes con las comunidades aledañas, se hace el estudio de condiciones del lugar y se obtiene un caudal presente de 10L/s, una altura de entrada de agua 0.30 m, por los estudios realizados de este tipo de proyectos se toma un ángulo de inclinación de 26° , ya que se evidencia que con esta inclinación se obtiene una mayor eficiencia al tener una cantidad significativa de volumen de agua dentro del tornillo con respecto a ángulos mayores, también se tuvo en cuenta que los ángulos de diseño de estos sistemas de generación van desde los 25° hasta los 36° .
- Al poner en funcionamiento el hidrotornillo junto a la estructura se debe garantizar la correcta alineación entre los componentes para así poder disminuir las pérdidas que se pueden presentar y pueden afectar directamente la eficiencia del hidrotornillo. No obstante, se presentan diferencias entre los cálculos de tipo teórico con respecto a los de tipo práctico, la mayor diferencia se encuentra en la velocidad de giro para la que fue diseñada el

hidrotornillo, la cual es de 250 rpm y al momento de hacer las prácticas y con los valores obtenidos se determina una velocidad de giro de 77 rpm con carga, esta diferencia está ligada a los planteamientos que no se tienen en cuenta para el desarrollo y la construcción del prototipo como lo son: Fricción que presentan los rodamientos con respecto al eje, el flujo turbulento que puede llegar a presentar el agua y el desfase en la alineación por ser un sistema diseñado con piezas desarmables para hacer el respectivo mantenimiento.

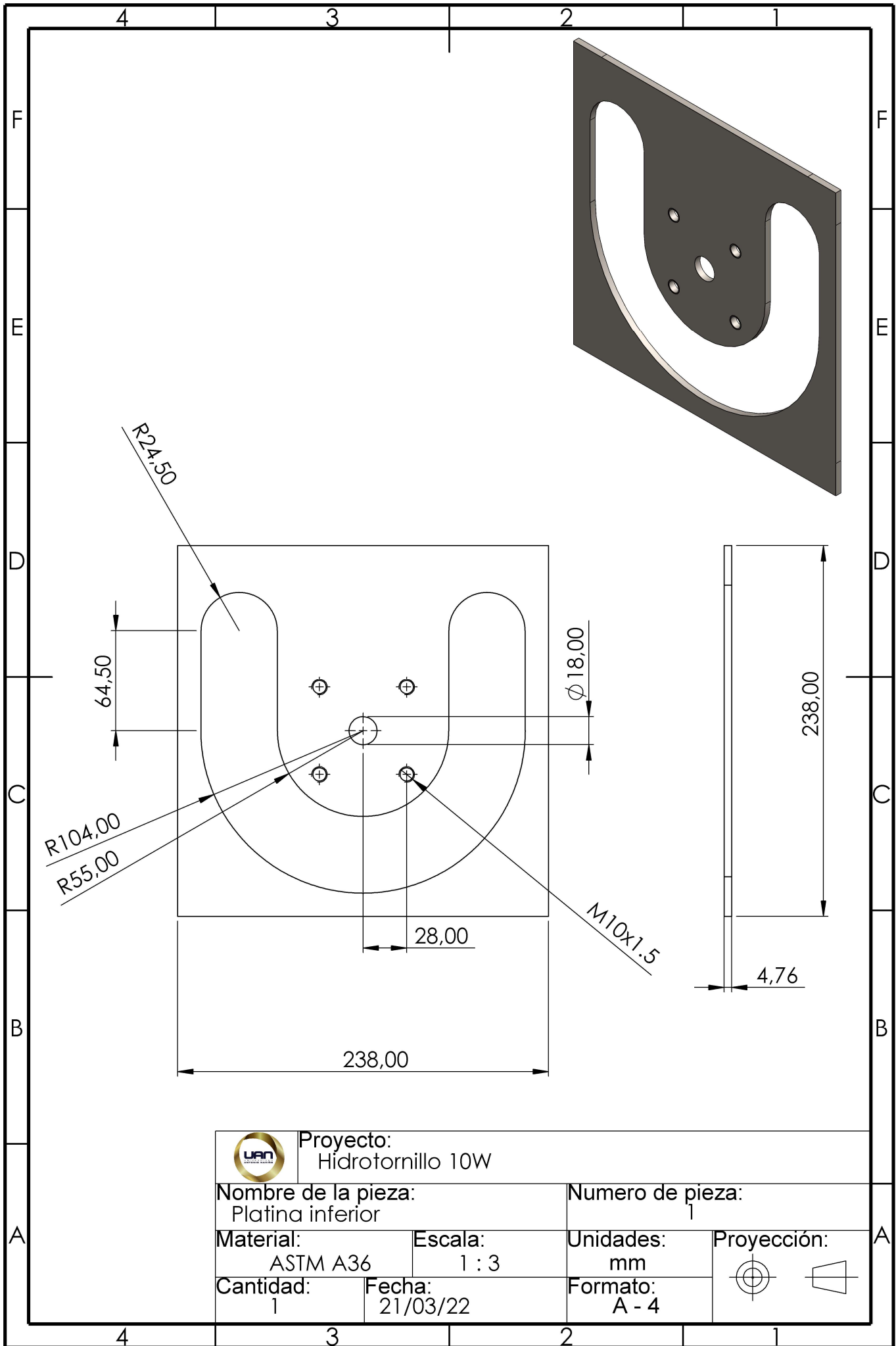
- Con los datos obtenidos de las geometrías del hidrotornillo se seleccionó un motor síncrono que fue utilizado como generador, teniendo en cuenta que su torque fuera menor a 2,32 N·mm que es el torque producido por el tornillo sinfín con las condiciones descritas. Según los cálculos hechos en el capítulo 6 también se tuvo en cuenta la velocidad de giro de este motor síncrono para que no fuera necesario hacer uso de un multiplicador de velocidad, posteriormente se hizo la respectiva conexión eléctrica y se tomó medida de la corriente y el voltaje generado teniendo como resultado 75 V y 0,19 A. Para determinar la velocidad de giro a la cual estaba generando los 14.25W se realizó una determinación de manera indirecta junto con la gráfica que se obtuvo de las pruebas realizadas al generador dando como resultado 77 rpm.
- Al momento de poner en funcionamiento el prototipo con el circuito eléctrico dando paso de corriente a la lámpara led se logra evidenciar que si el caudal de agua que pasa por el tornillo sinfín no es de 10 L/s de forma constante se genera una oscilación en las mediciones, ya que varía en un rango de 74 a 76 voltios y 0.17 0 a 0.19 A de forma rápida y una intermitencia en la visibilidad de la luz. Esto se evidencia si hay fugas de agua por los lados de la estructura o por las lonas que hacen la función de represamiento.

- Los componentes eléctricos están instalados bajo estándares de normatividad IP65 y RETIE, ya que se cuentan con constantes salpicaduras de agua y expuestas a la intemperie, al momento de que una pequeña cantidad de agua haga cortocircuito o contacto con algún componente el fusible hace la tarea de abrir el circuito y proteger los componentes. El generador síncrono está protegido, un sellamiento hermético por una caja especial.

Anexos

Anexos I

Planos de diseño:



Proyecto:
Hidrotornillo 10W

Nombre de la pieza:
Platina inferior

Numero de pieza:
1

Material:
ASTM A36

Escala:
1 : 3

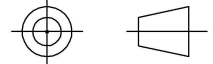
Unidades:
mm

Proyección:

Cantidad:
1

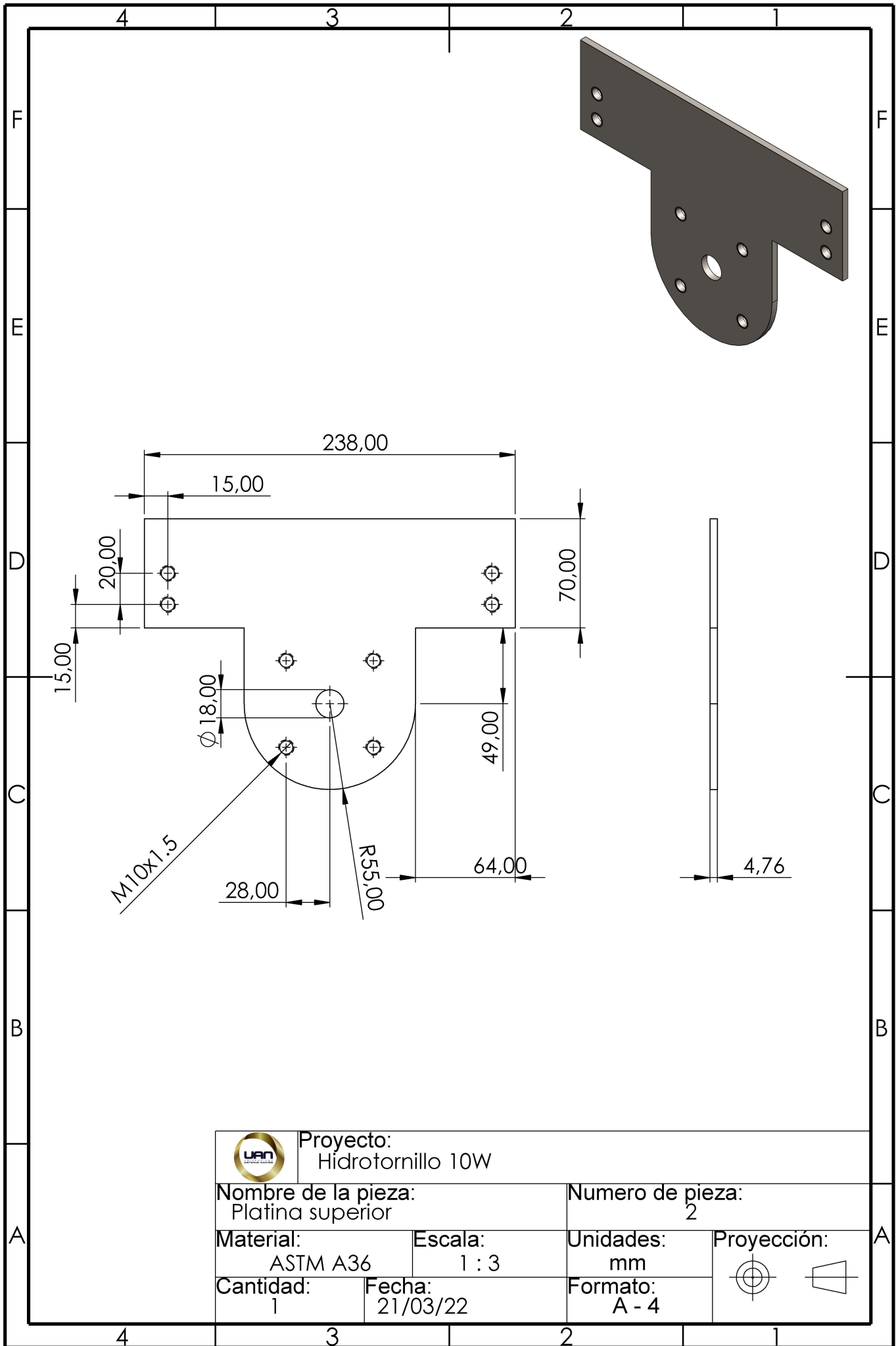
Fecha:
21/03/22

Formato:
A - 4



A

A



Proyecto:
Hidrotornillo 10W

Nombre de la pieza:
Platina superior

Numero de pieza:
2

Material:
ASTM A36

Escala:
1 : 3

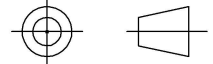
Unidades:
mm

Proyección:

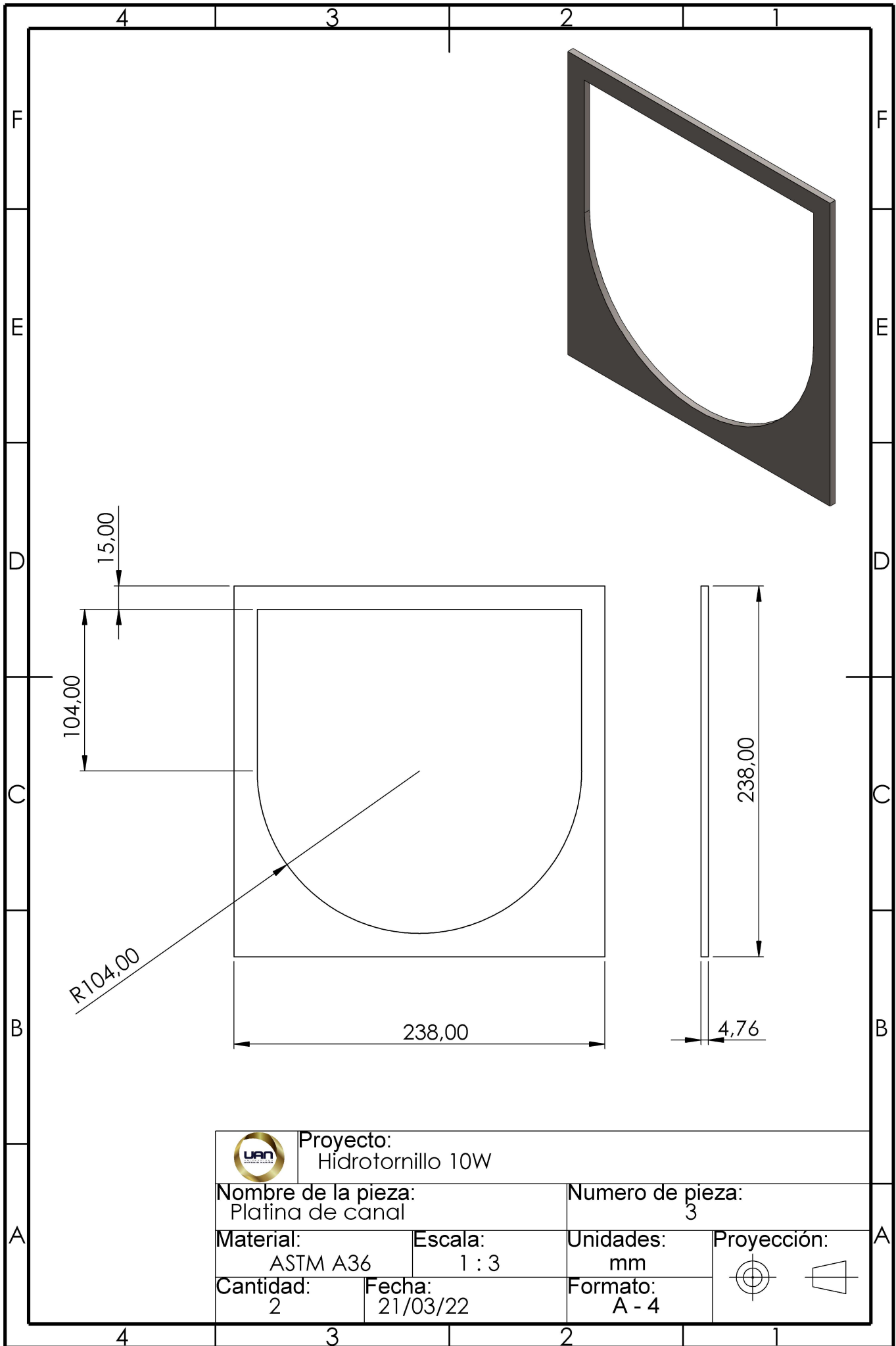
Cantidad:
1

Fecha:
21/03/22

Formato:
A - 4



A



Proyecto:
Hidrotornillo 10W

Nombre de la pieza:
Platina de canal

Numero de pieza:
3

Material:
ASTM A36

Escala:
1 : 3

Unidades:
mm

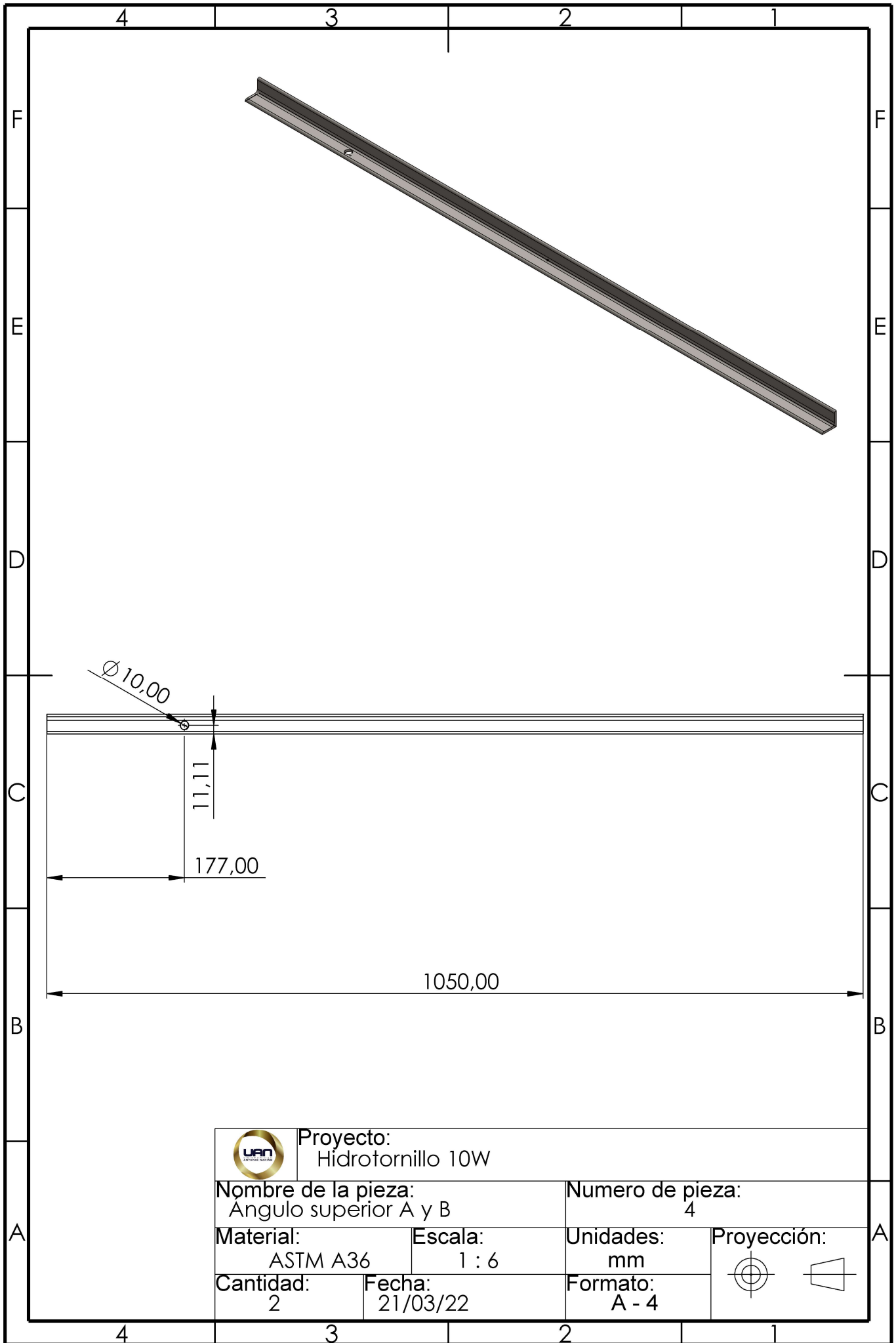
Proyección:

Cantidad:
2

Fecha:
21/03/22

Formato:
A - 4





Proyecto:
Hidrotornillo 10W

Nombre de la pieza:
Angulo superior A y B

Numero de pieza:
4

Material:
ASTM A36

Escala:
1 : 6

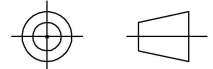
Unidades:
mm

Proyección:

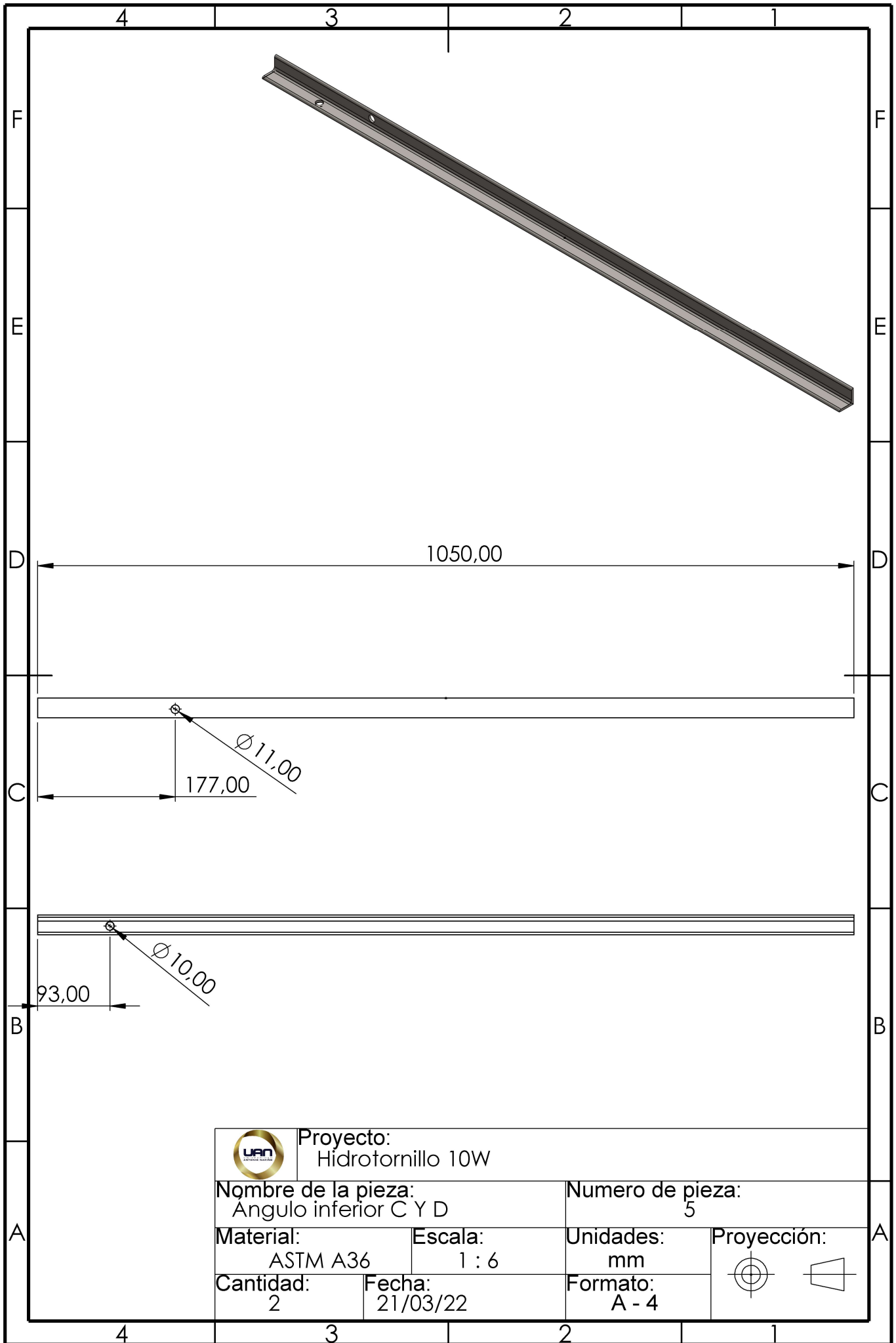
Cantidad:
2

Fecha:
21/03/22

Formato:
A - 4



A



Proyecto:
Hidrotornillo 10W

Nombre de la pieza:
Angulo inferior C Y D

Numero de pieza:
5

Material:
ASTM A36

Escala:
1 : 6

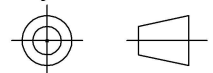
Unidades:
mm

Proyección:

Cantidad:
2

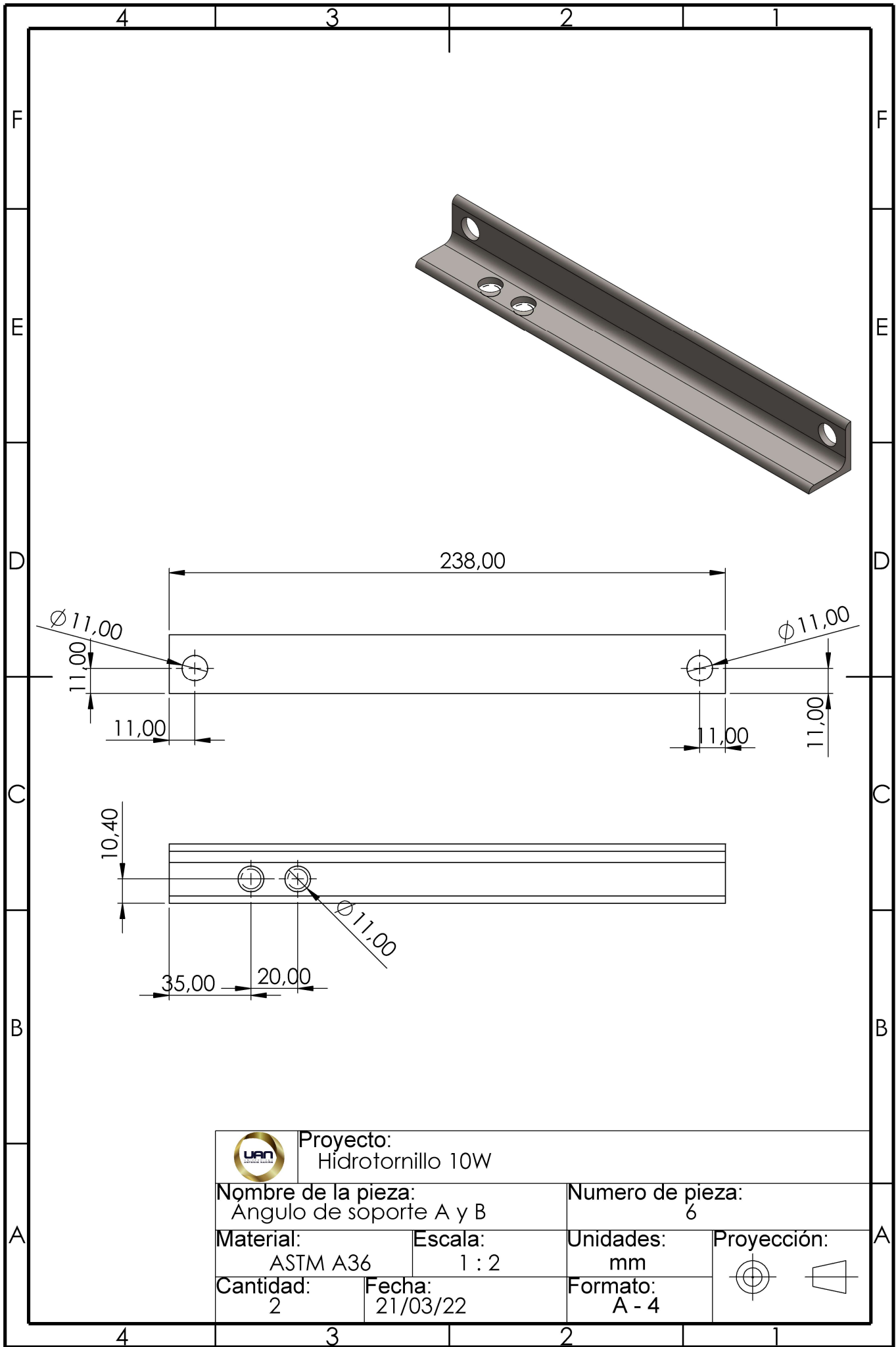
Fecha:
21/03/22

Formato:
A - 4



A

A



Proyecto:
Hidrotornillo 10W

Nombre de la pieza:
Angulo de soporte A y B

Numero de pieza:
6

Material:
ASTM A36

Escala:
1 : 2

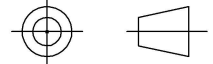
Unidades:
mm

Proyección:

Cantidad:
2

Fecha:
21/03/22

Formato:
A - 4



4

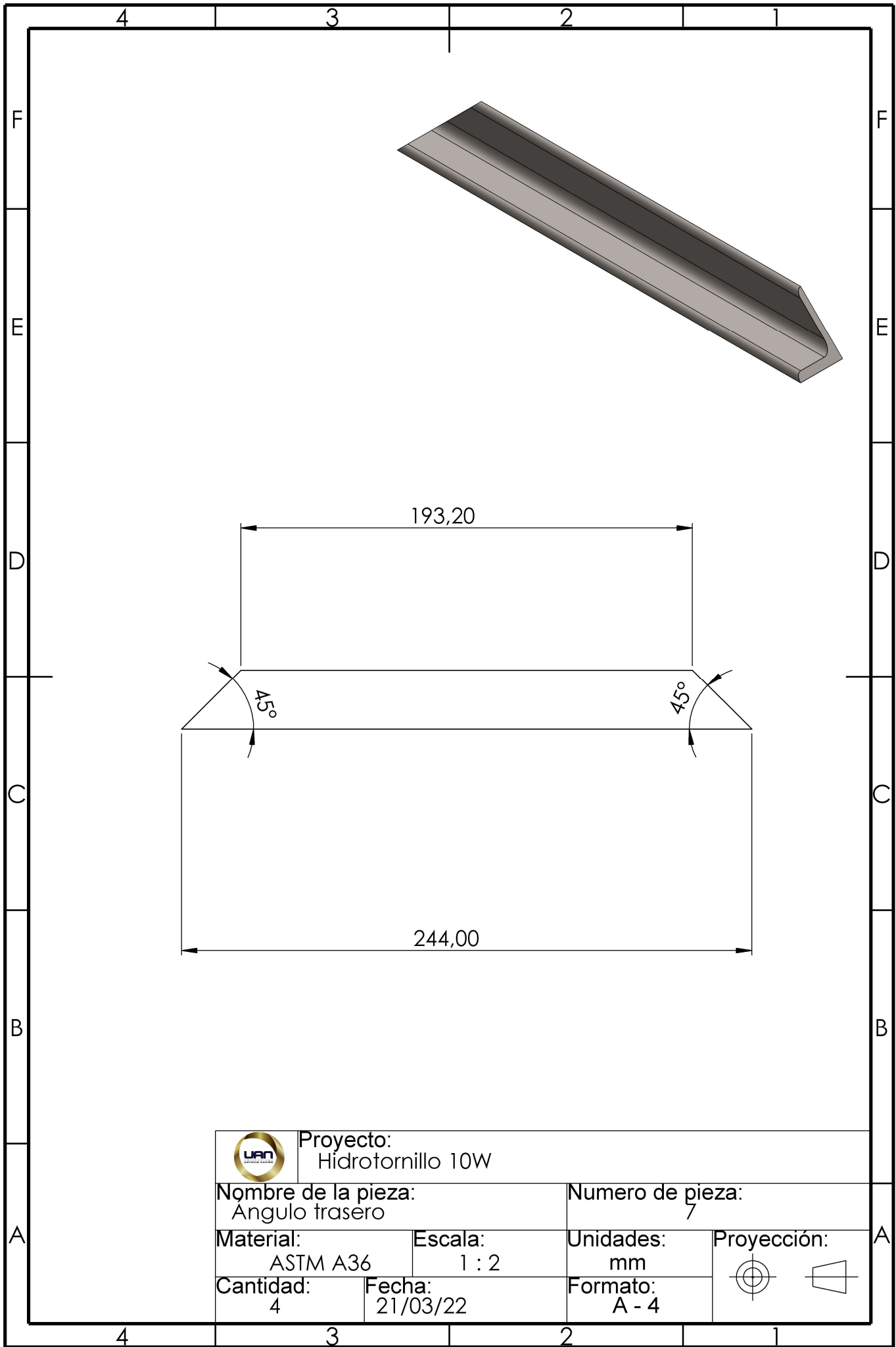
3

2

1

A

A



Proyecto:
Hidrotornillo 10W

Nombre de la pieza:
Angulo trasero

Numero de pieza:
7

Material:
ASTM A36

Escala:
1 : 2

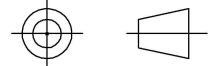
Unidades:
mm

Proyección:

Cantidad:
4

Fecha:
21/03/22

Formato:
A - 4



A

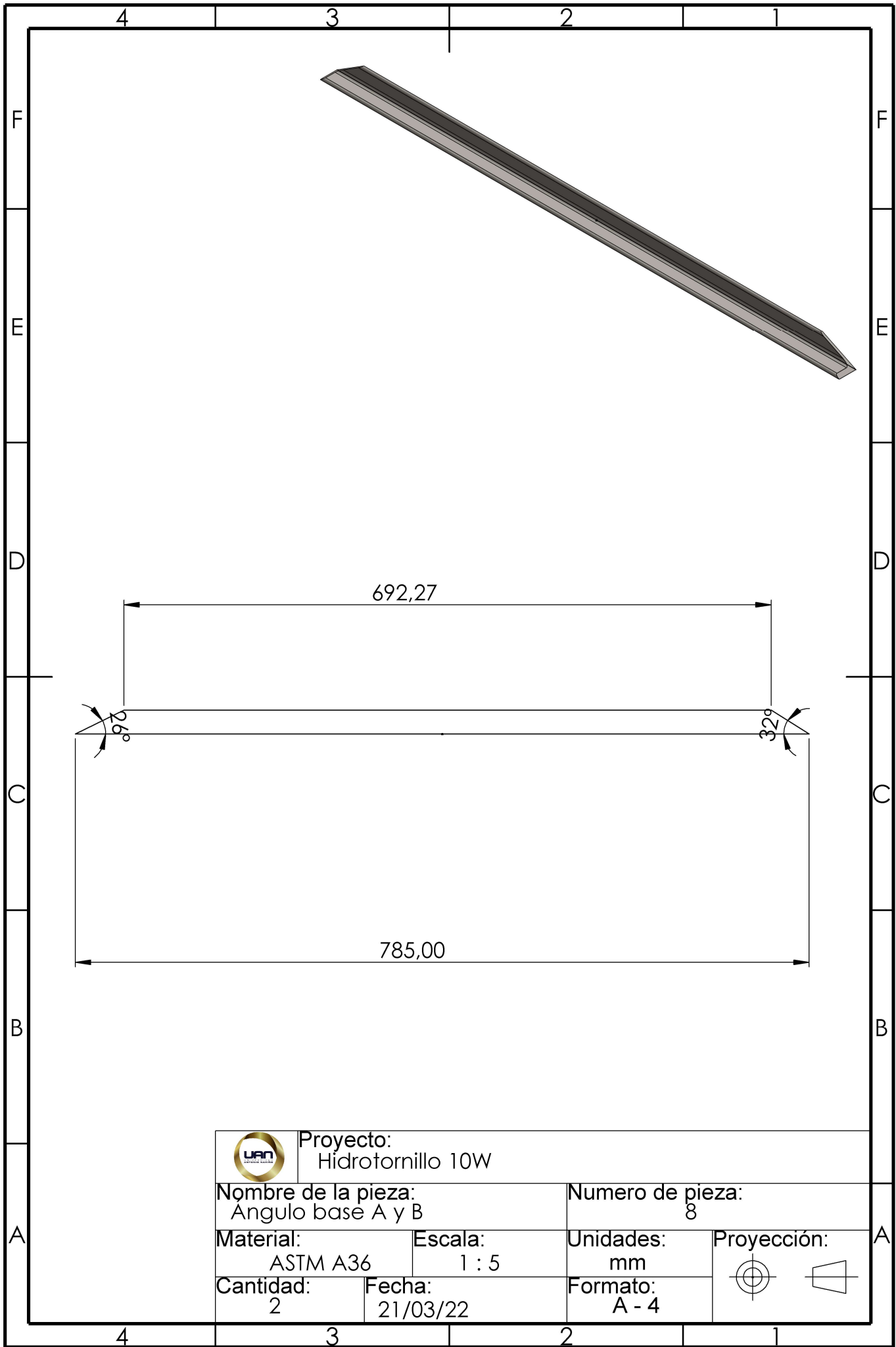
A

4

3

2

1



Proyecto:
Hidrotornillo 10W

Nombre de la pieza:
Angulo base A y B

Numero de pieza:
8

Material:
ASTM A36

Escala:
1 : 5

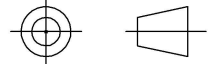
Unidades:
mm

Proyección:

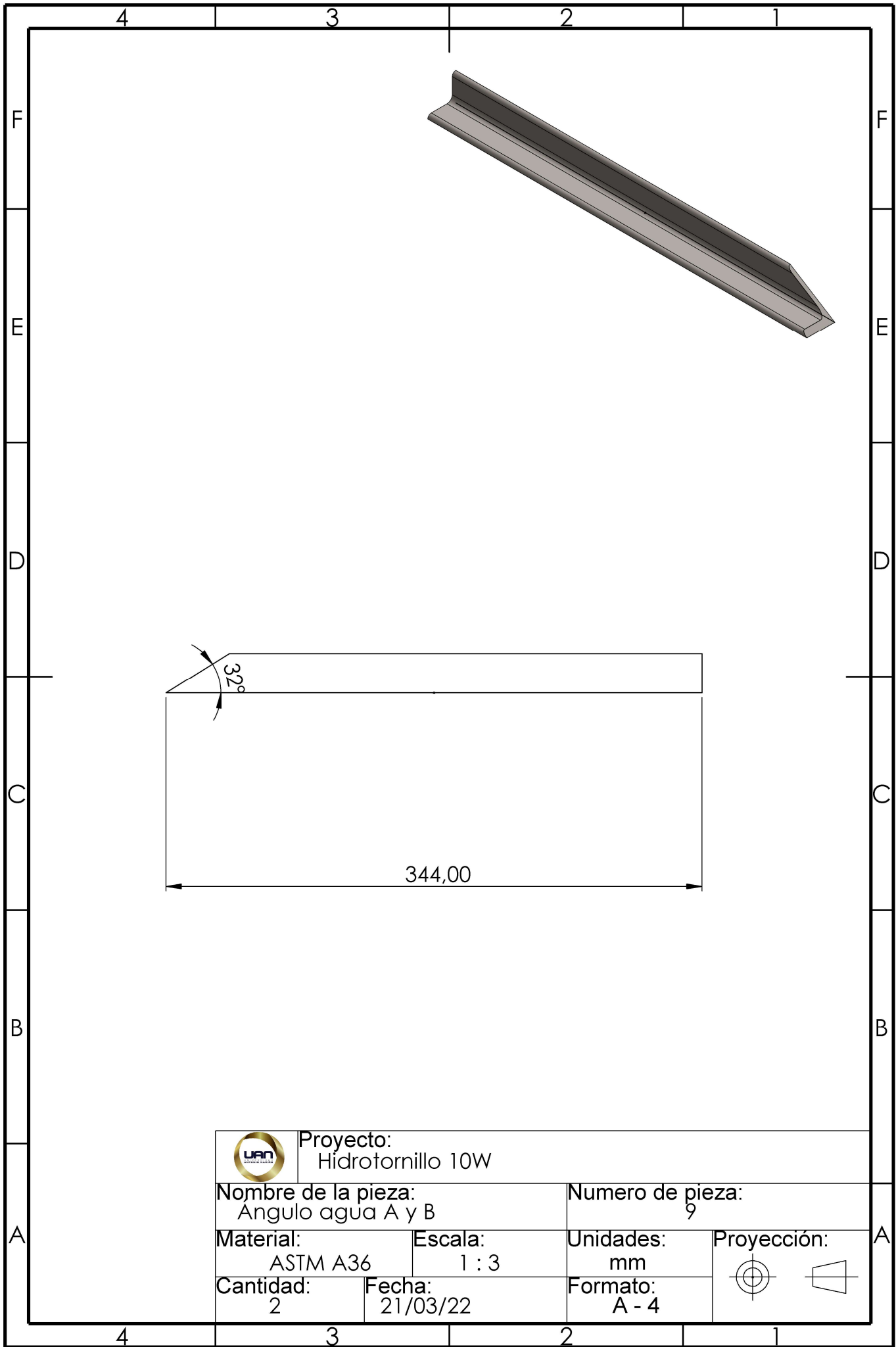
Cantidad:
2

Fecha:
21/03/22

Formato:
A - 4



A



Proyecto:
Hidrotornillo 10W

Nombre de la pieza:
Angulo agua A y B

Numero de pieza:
9

Material:
ASTM A36

Escala:
1 : 3

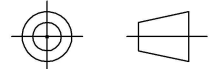
Unidades:
mm

Proyección:

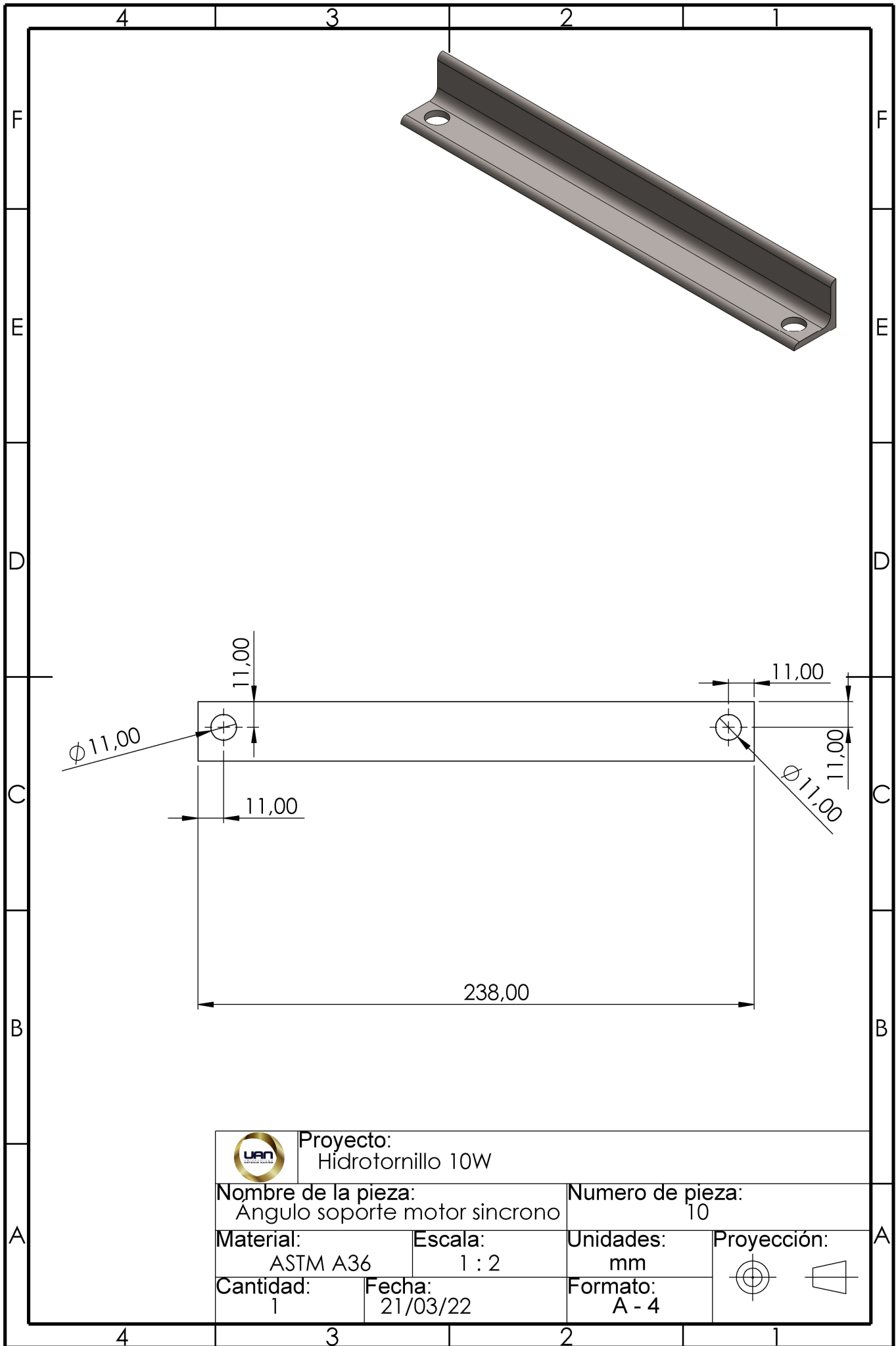
Cantidad:
2

Fecha:
21/03/22

Formato:
A - 4



A



Proyecto:
Hidrotornillo 10W

Nombre de la pieza:
Angulo soporte motor sincrónico

Numero de pieza:
10

Material:
ASTM A36

Escala:
1 : 2

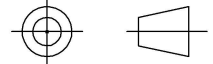
Unidades:
mm

Proyección:

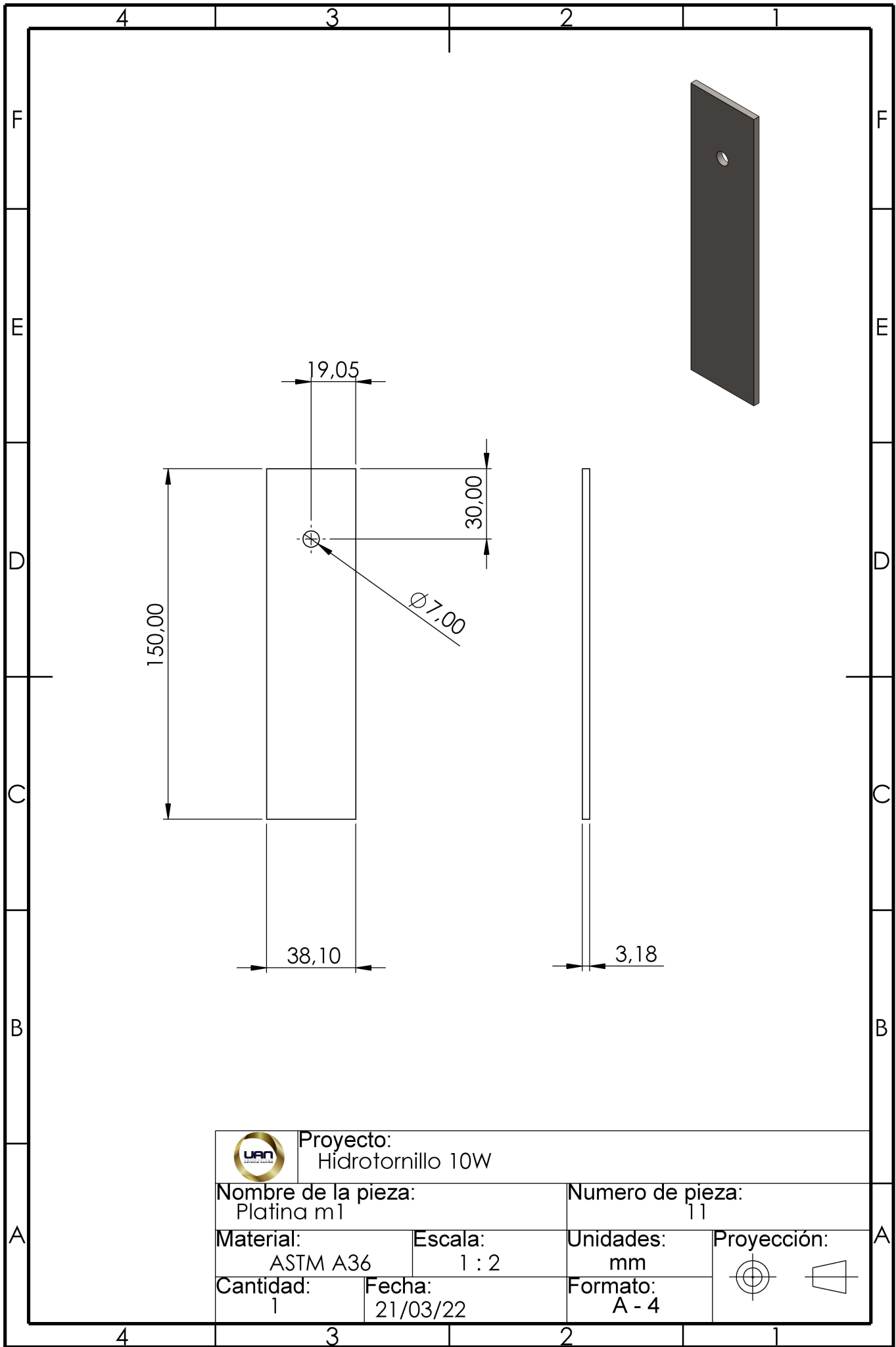
Cantidad:
1




Fecha:
21/03/22

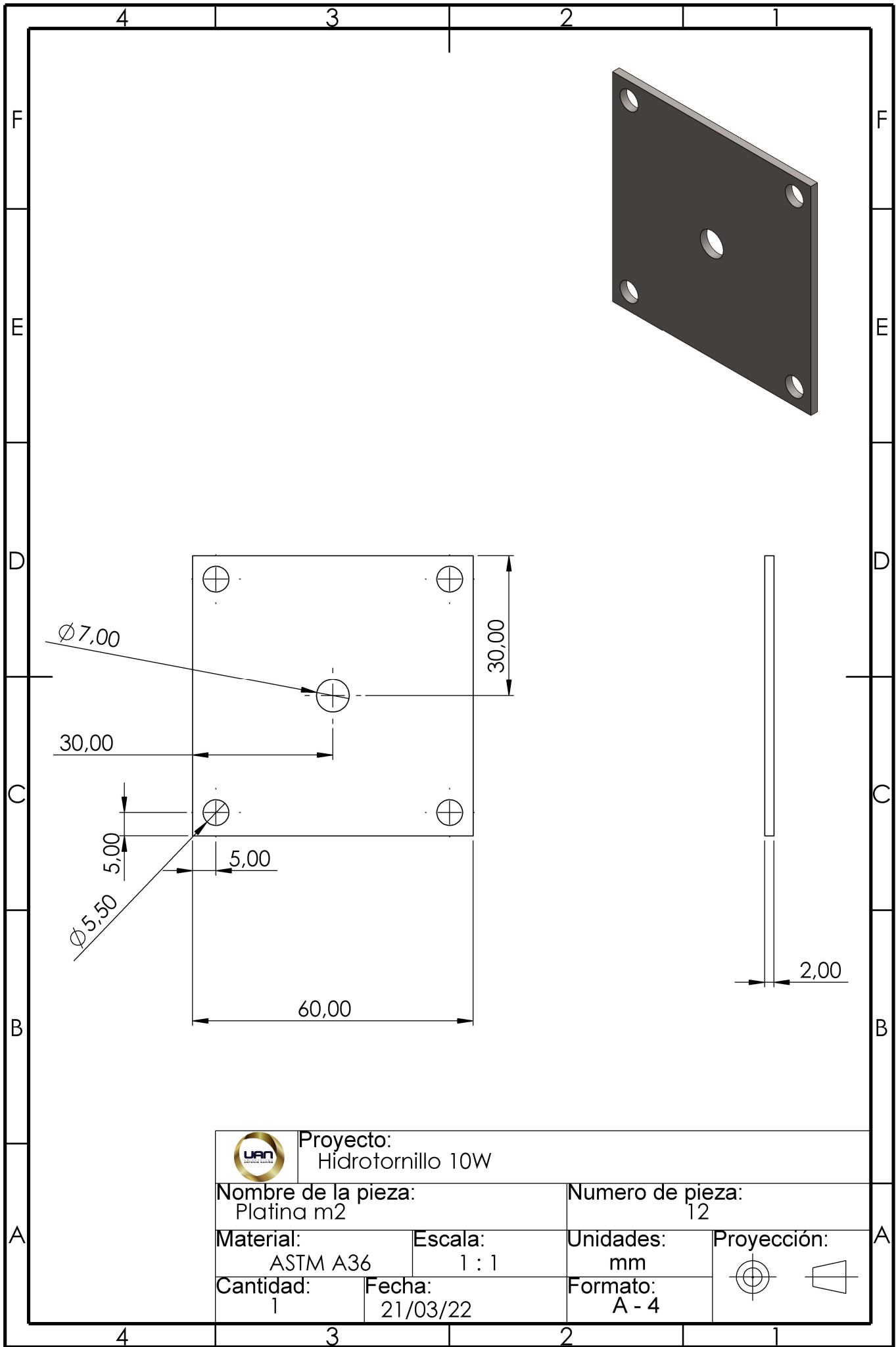
Formato:
A - 4



A



		Proyecto: Hidrotornillo 10W	
Nombre de la pieza: Platina m1		Numero de pieza: 11	
Material: ASTM A36	Escala: 1 : 2	Unidades: mm	Proyección:  
Cantidad: 1	Fecha: 21/03/22	Formato: A - 4	



Proyecto:
Hidrotornillo 10W

Nombre de la pieza:
Platina m2

Numero de pieza:
12

Material:
ASTM A36

Escala:
1 : 1

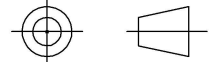
Unidades:
mm

Proyección:

Cantidad:
1

Fecha:
21/03/22

Formato:
A - 4



F

F

E

E

D

D

C

C

B

B

A

A

4

3

2

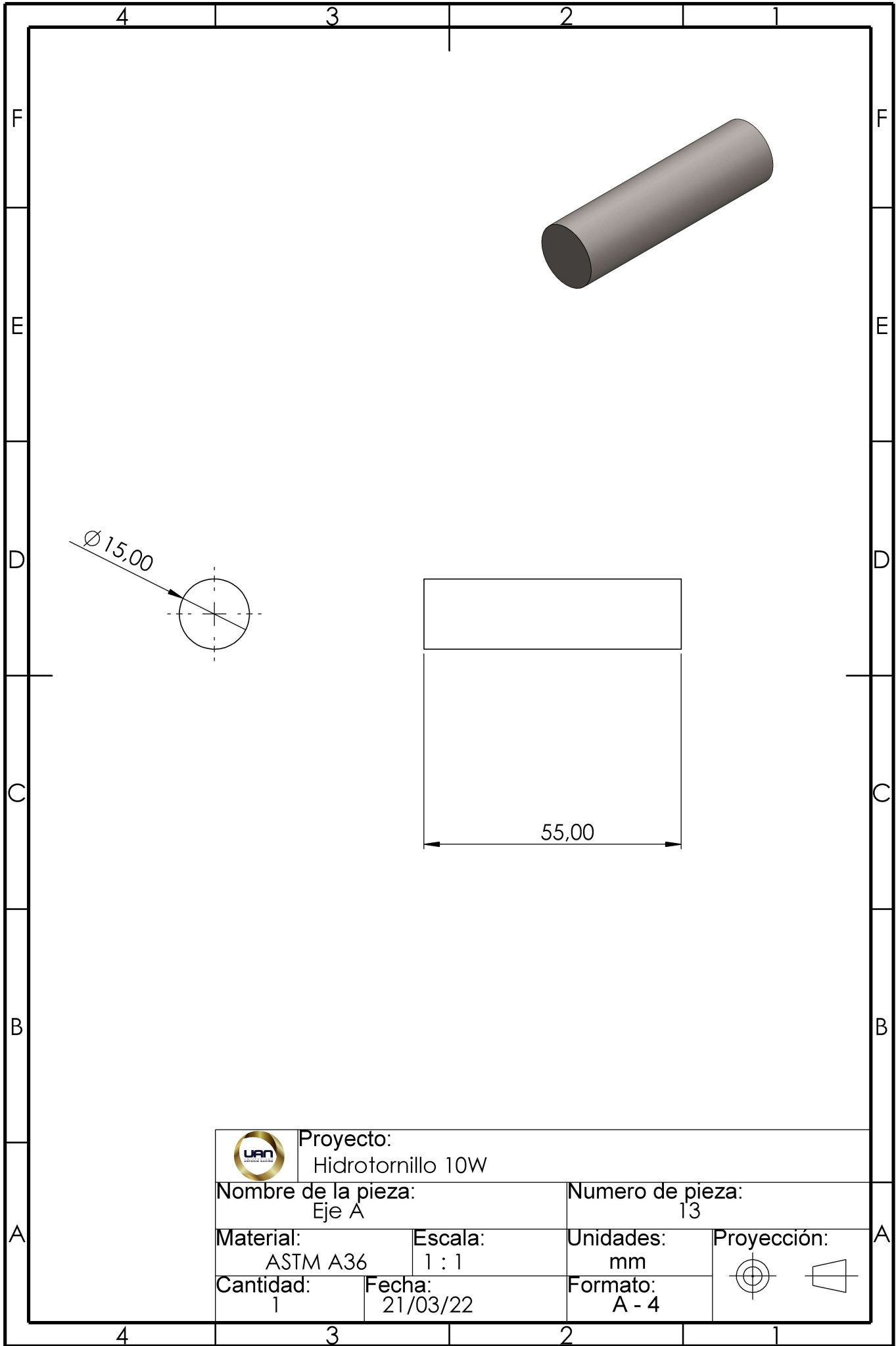
1

4

3

2

1



Proyecto:
Hidrotornillo 10W

Nombre de la pieza:
Eje A

Numero de pieza:
13

Material:
ASTM A36

Escala:
1 : 1

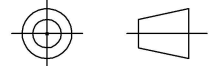
Unidades:
mm

Proyección:

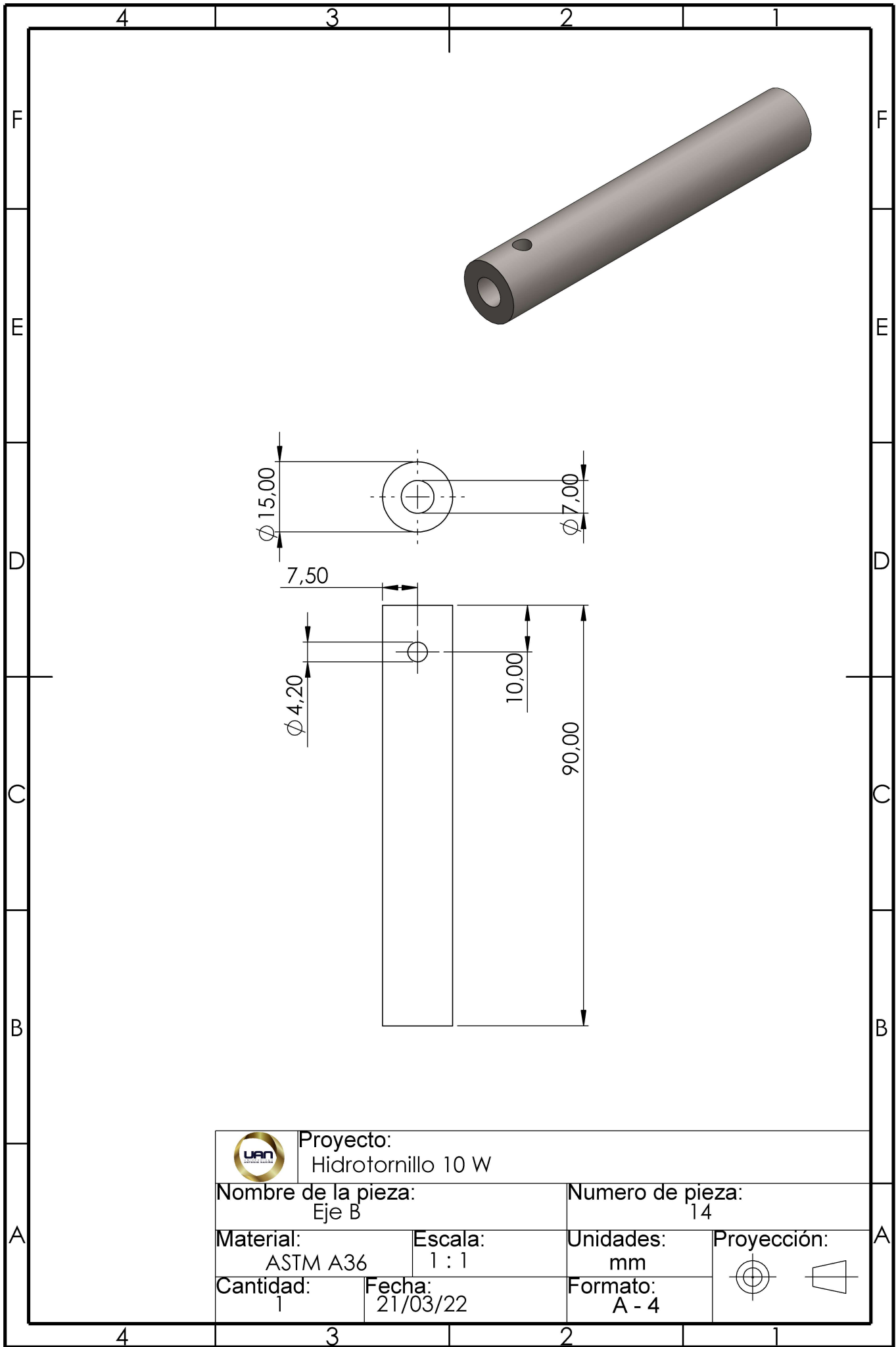
Cantidad:
1

Fecha:
21/03/22

Formato:
A - 4



A



Proyecto:
Hidrotornillo 10 W

Nombre de la pieza:
Eje B

Numero de pieza:
14

Material:
ASTM A36

Escala:
1 : 1

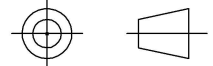
Unidades:
mm

Proyección:

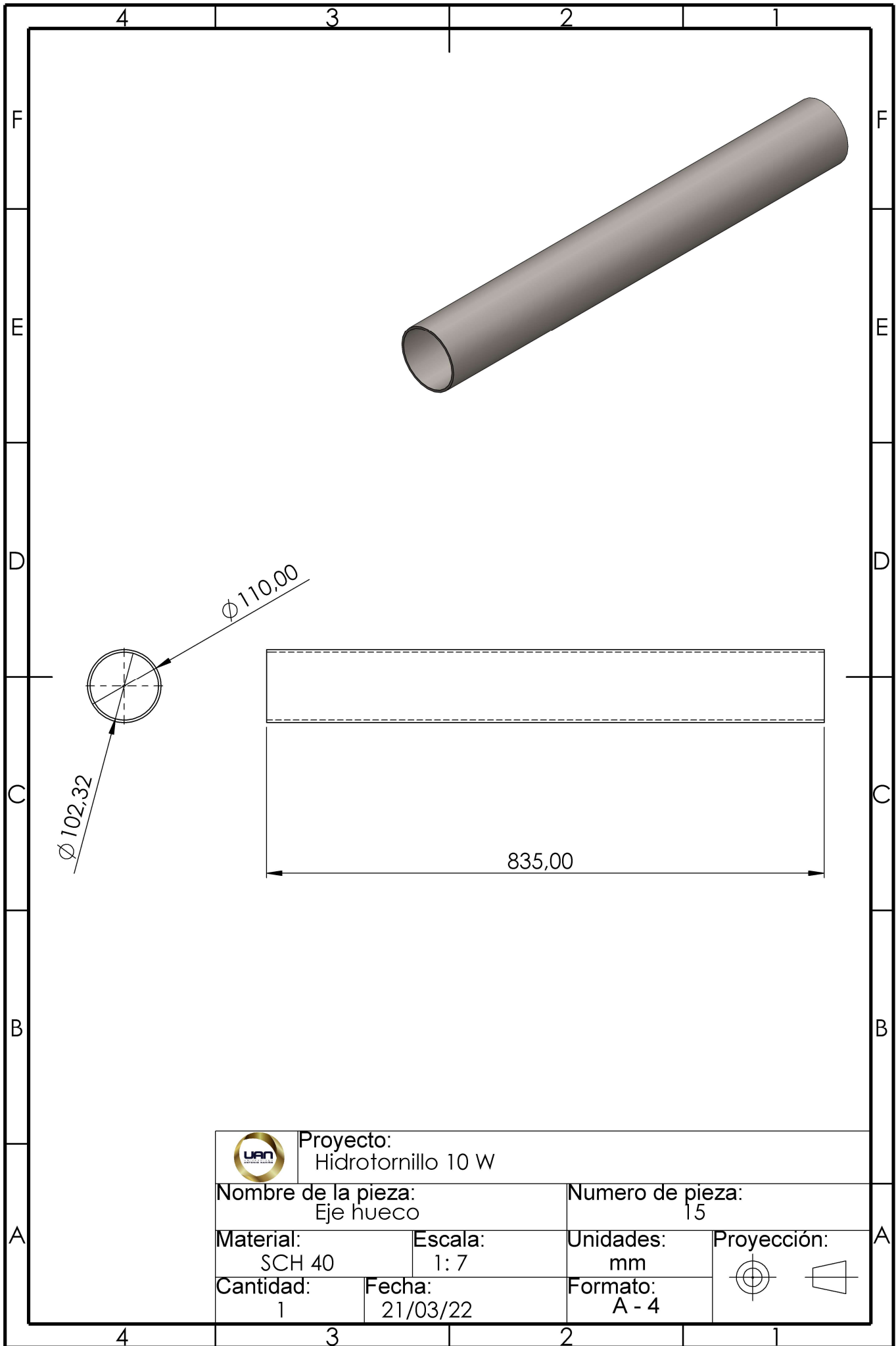
Cantidad:
1

Fecha:
21/03/22

Formato:
A - 4



A



Proyecto:
Hidrotornillo 10 W

Nombre de la pieza:
Eje hueco

Numero de pieza:
15

Material:
SCH 40

Escala:
1: 7

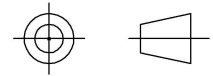
Unidades:
mm

Proyección:

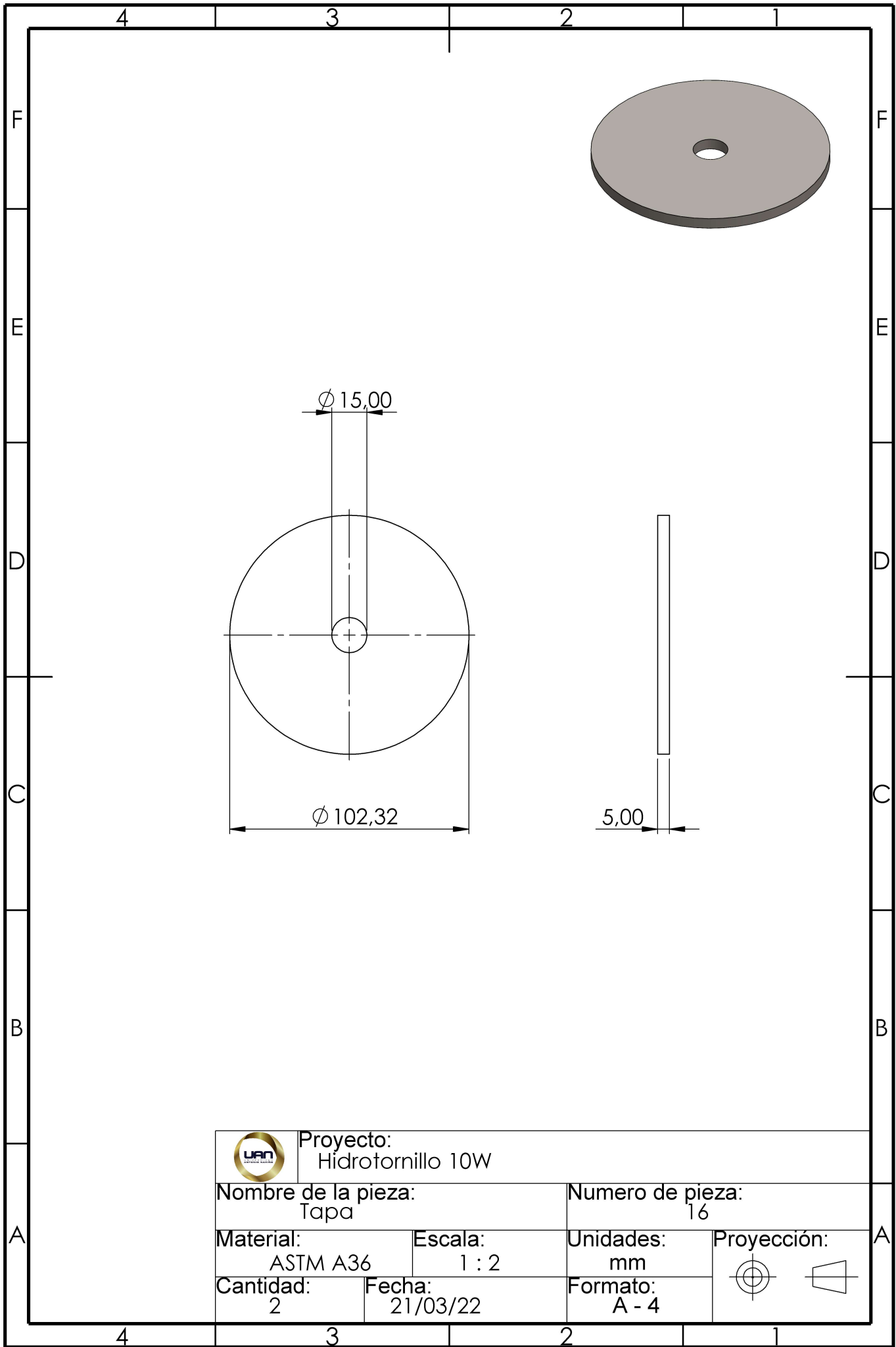
Cantidad:
1

Fecha:
21/03/22

Formato:
A - 4



A



Proyecto:
Hidrotornillo 10W

Nombre de la pieza:
Tapa

Numero de pieza:
16

Material:
ASTM A36

Escala:
1 : 2

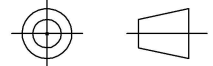
Unidades:
mm

Proyección:

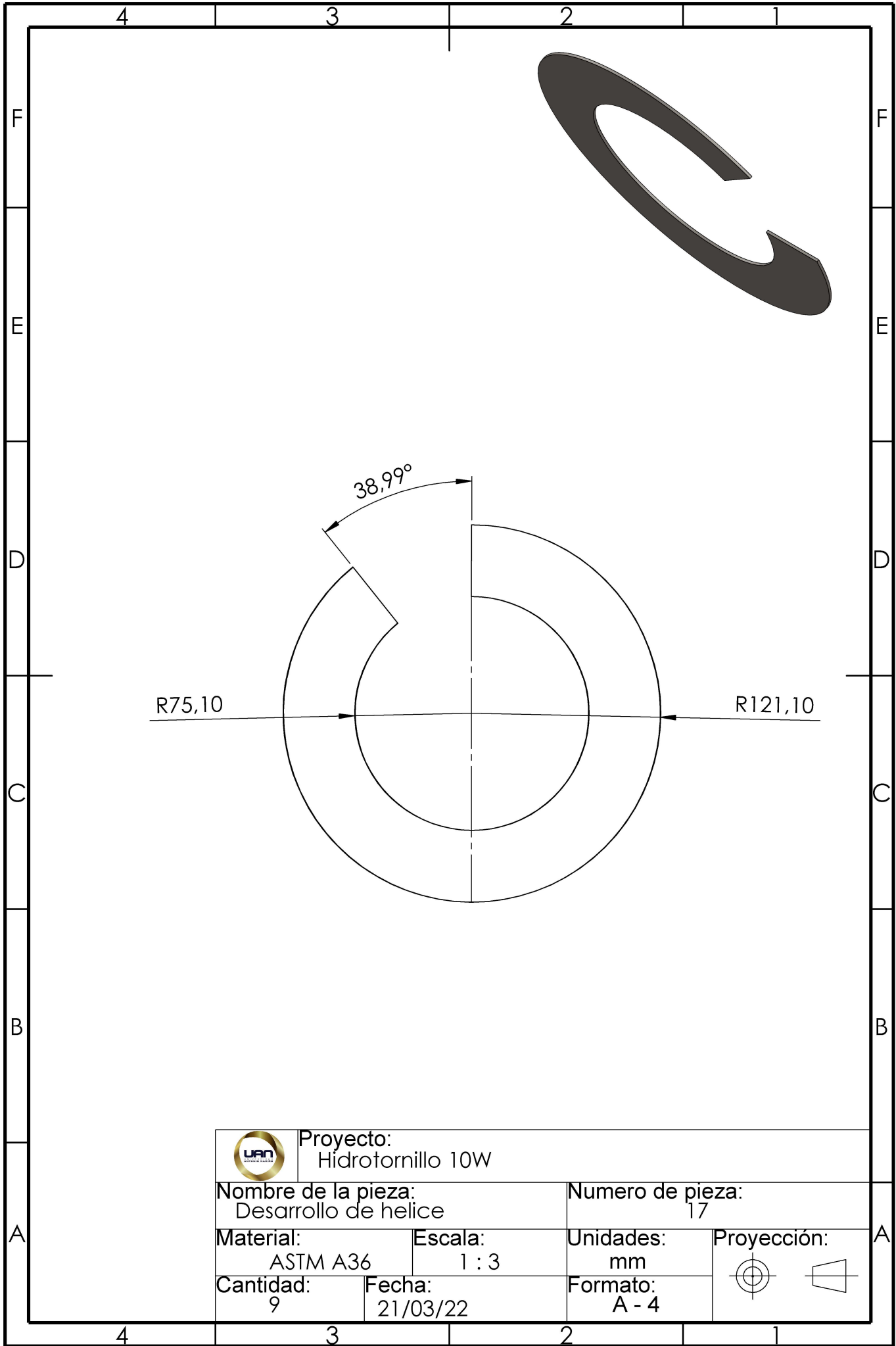
Cantidad:
2

Fecha:
21/03/22

Formato:
A - 4



A



Proyecto:
Hidrotornillo 10W

Nombre de la pieza:
Desarrollo de helice

Numero de pieza:
17

Material:
ASTM A36

Escala:
1 : 3

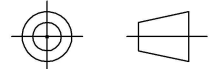
Unidades:
mm

Proyección:

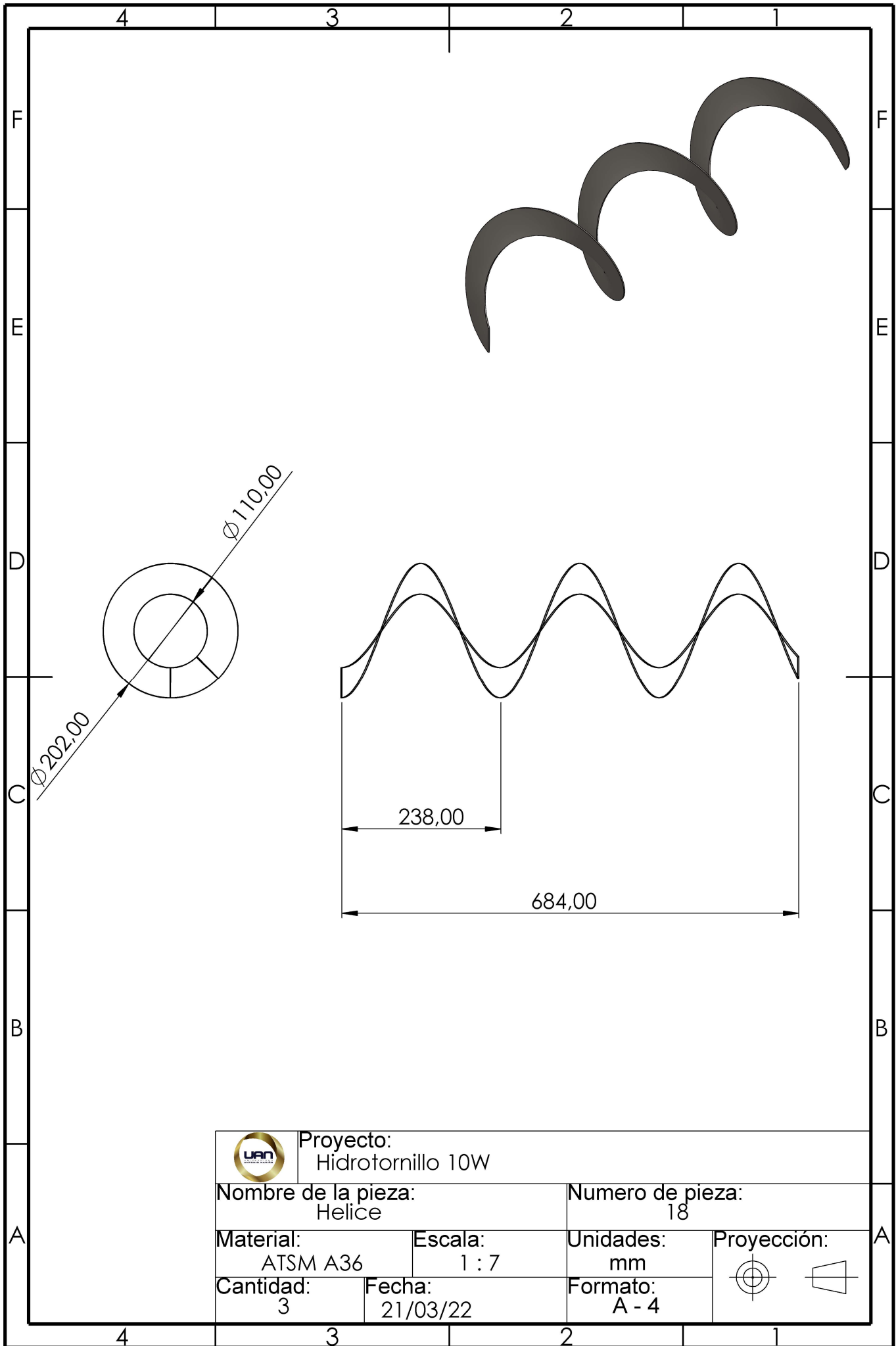
Cantidad:
9

Fecha:
21/03/22

Formato:
A - 4



A



Proyecto:
Hidrotornillo 10W

Nombre de la pieza:
Helice

Numero de pieza:
18

Material:
ATSM A36

Escala:
1 : 7

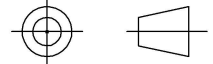
Unidades:
mm

Proyección:

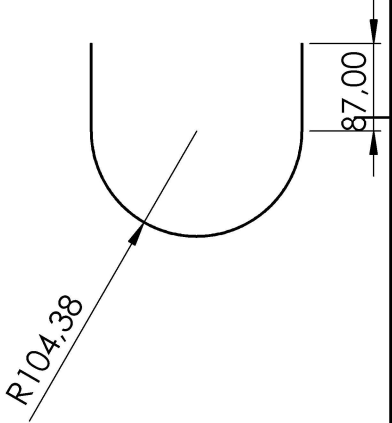
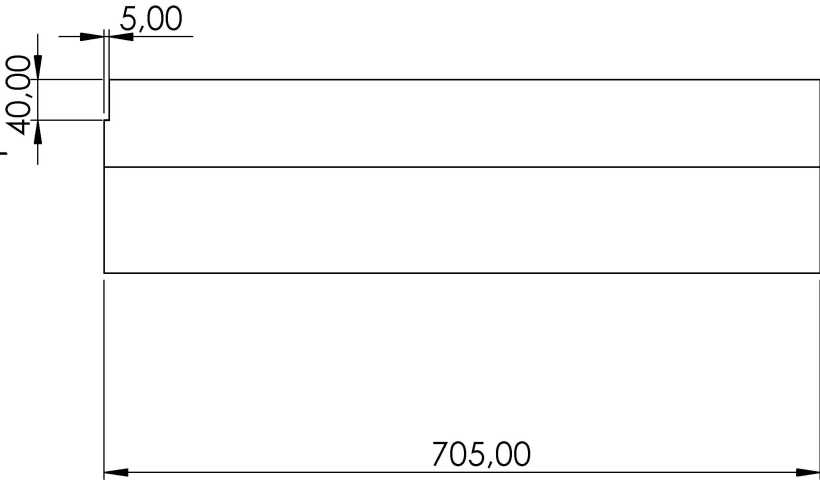
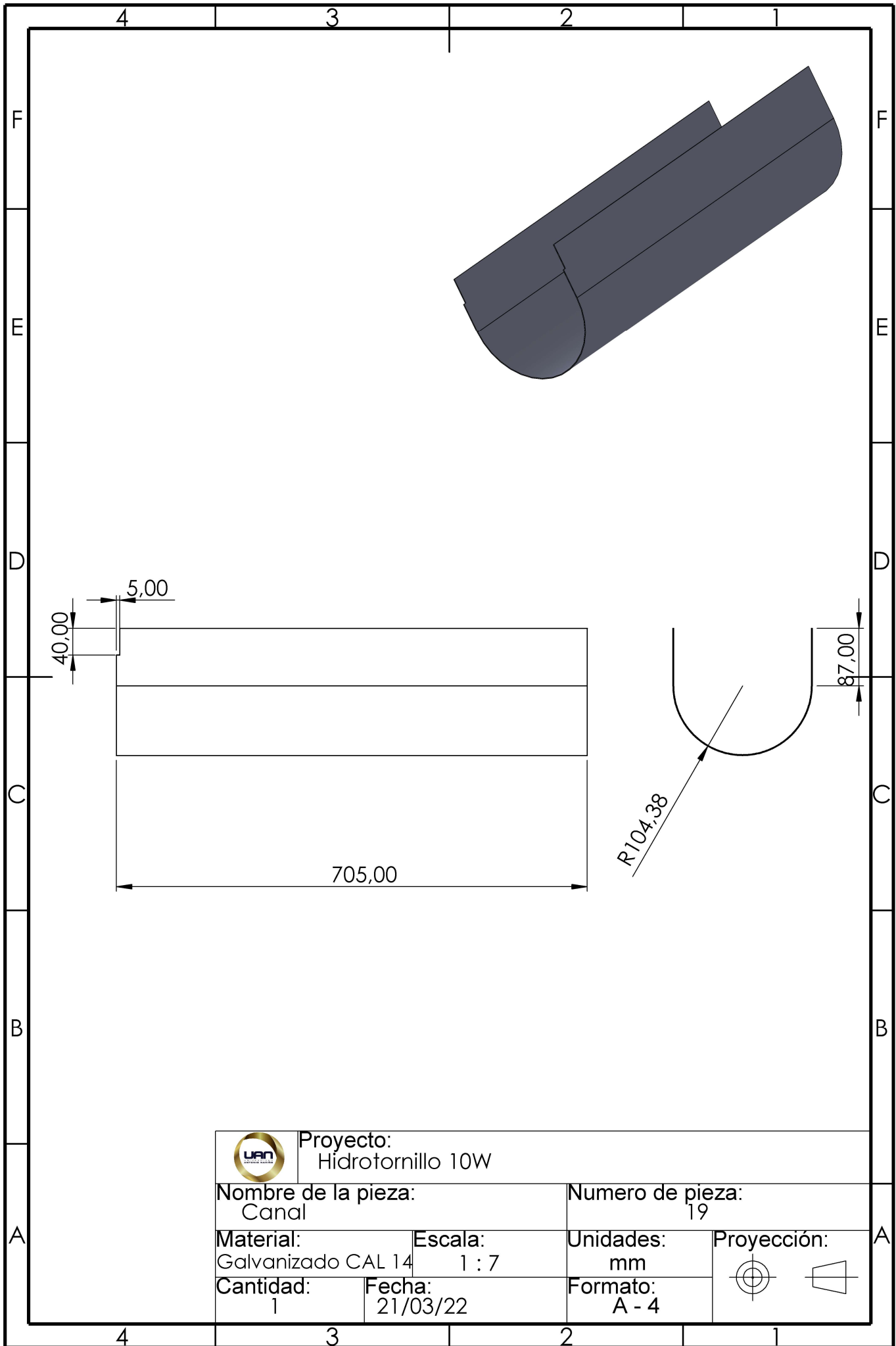
Cantidad:
3




Fecha:
21/03/22

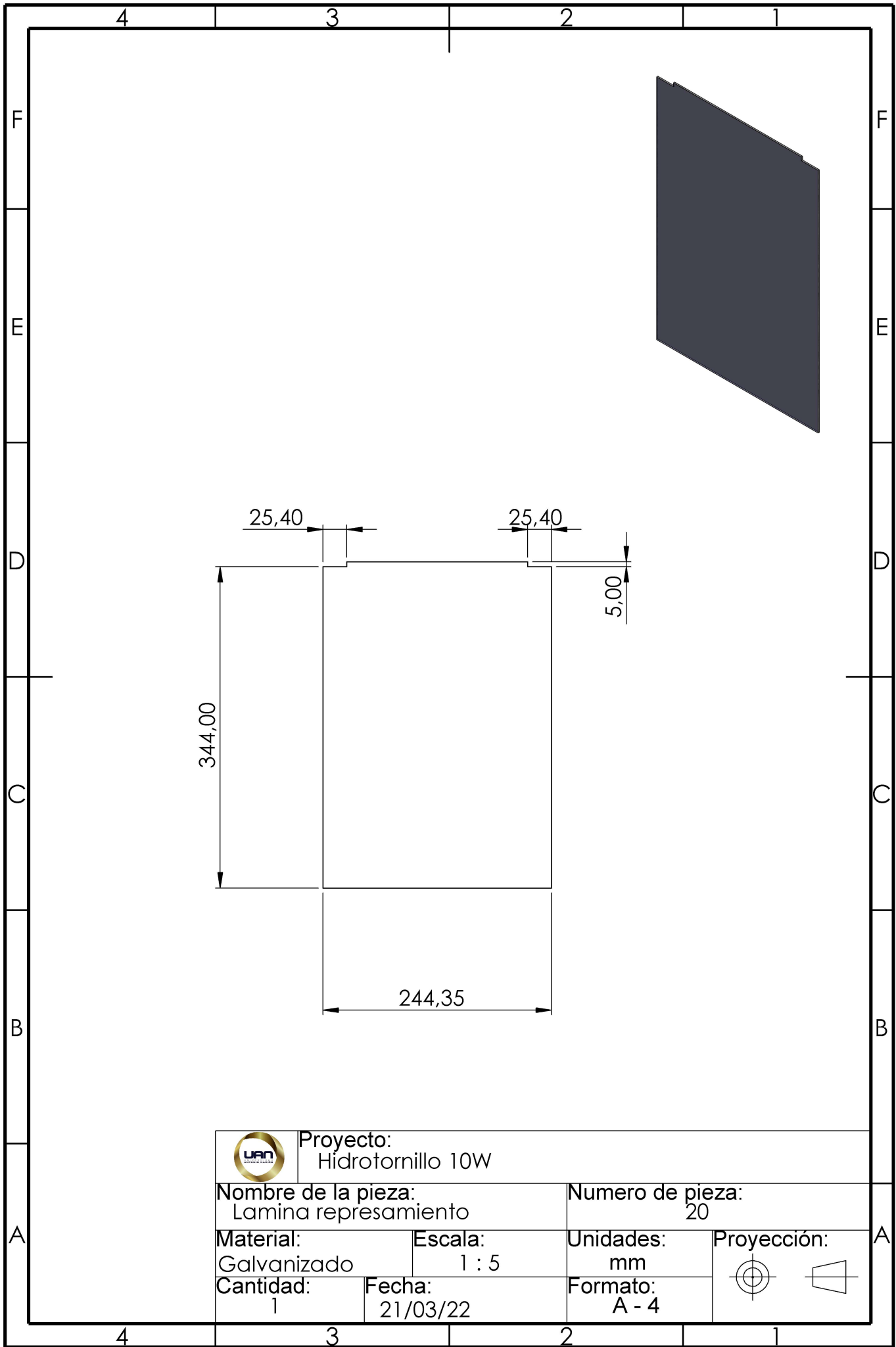
Formato:
A - 4



A



		Proyecto: Hidrotornillo 10W	
Nombre de la pieza: Canal		Numero de pieza: 19	
Material: Galvanizado CAL 14	Escala: 1 : 7	Unidades: mm	Proyección:  
Cantidad: 1	Fecha: 21/03/22	Formato: A - 4	



Proyecto:
Hidrotornillo 10W

Nombre de la pieza:
Lamina represamiento

Numero de pieza:
20

Material:
Galvanizado

Escala:
1 : 5

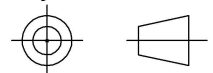
Unidades:
mm

Proyección:

Cantidad:
1

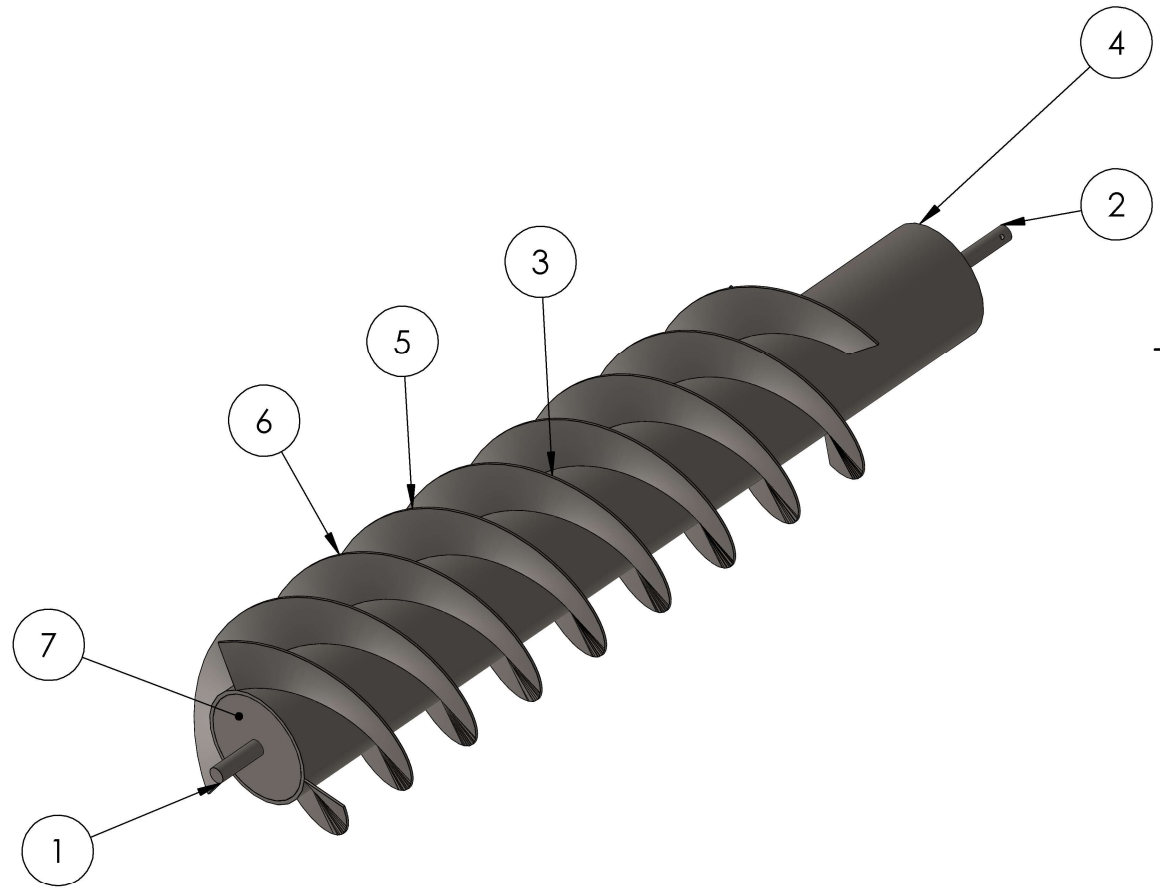
Fecha:
21/03/22




Formato:
A - 4

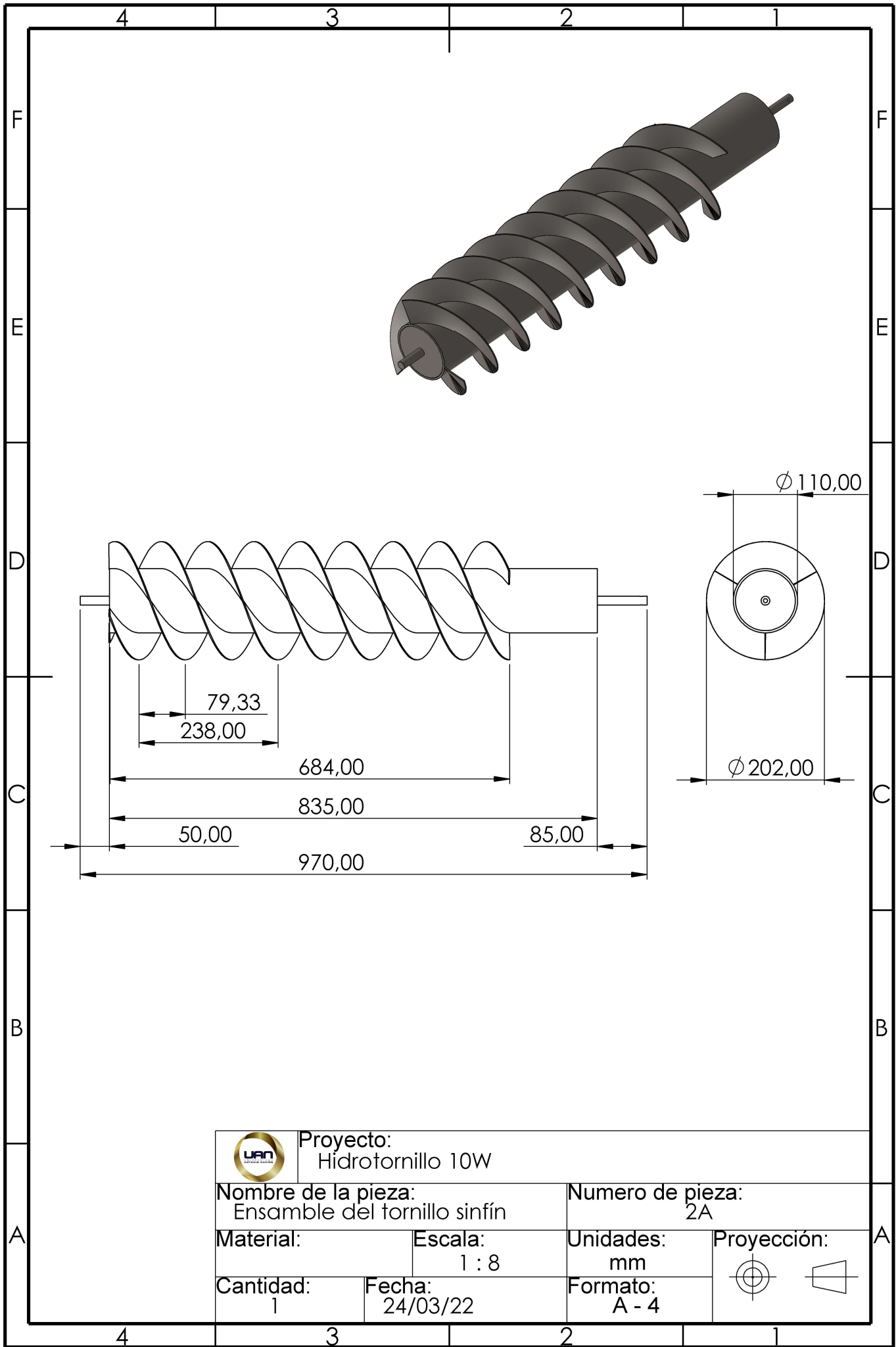


A

N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Eje A	ASTM A36 Plano 13	1
2	Eje B	ASTM A36 Plano 14	1
3	Helice 2	Lamina CAL 14 ASTM A36 Plano 18	1
4	Eje hueco	SCH 40 Plano 15	1
5	Helice 3	Lamina CAL 14 ASTM A36 Plano 18	1
6	Helice 1	Lamina CAL 14 ASTM A36 Plano 18	1
7	Tapa	Platina 3/16 ASTM A36 Plano 16	2



 Proyecto: Hidrotornillo 10W			
Nombre de la pieza: Partes del tornillo sinfín		Numero de pieza: 1A	
Material:		Escala: 1 : 6	
Cantidad: 1		Unidades: mm	
Fecha: 24/03/22		Proyección:  	
Formato: A - 4			



Proyecto:
Hidrotornillo 10W

Nombre de la pieza:
Ensamble del tornillo sinfín

Numero de pieza:
2A

Material:

Escala:
1 : 8

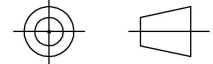
Unidades:
mm

Proyección:

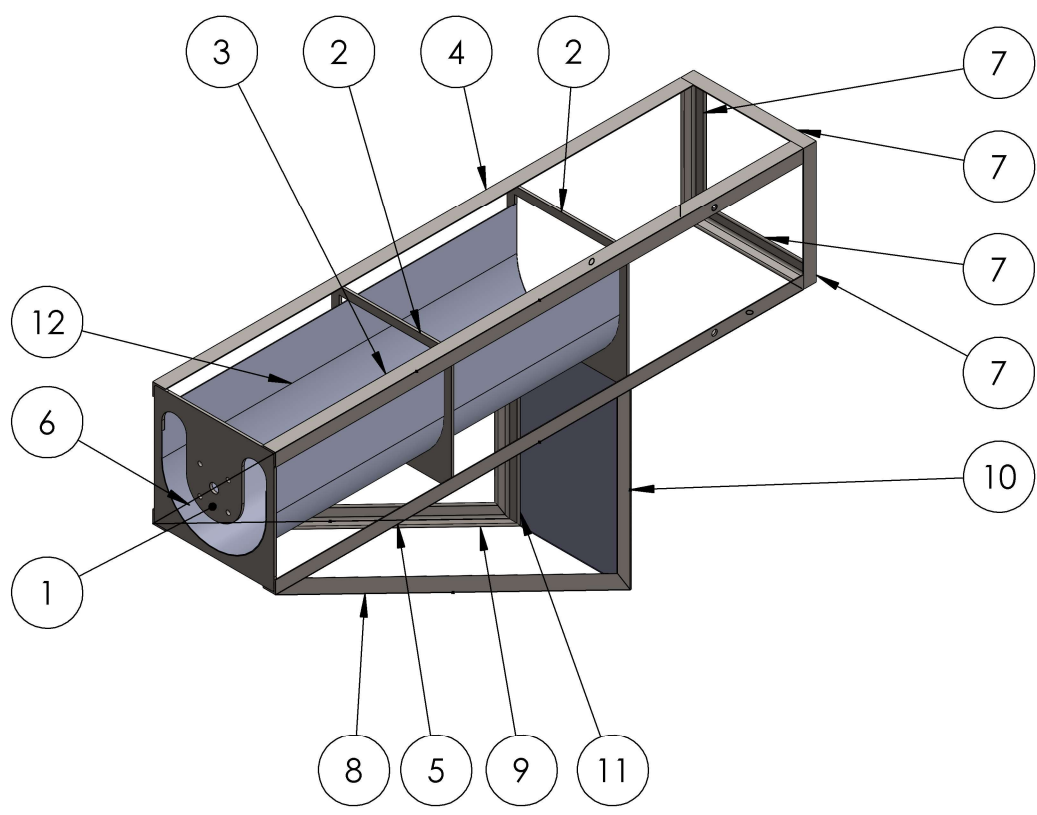
Cantidad:
1




Fecha:
24/03/22

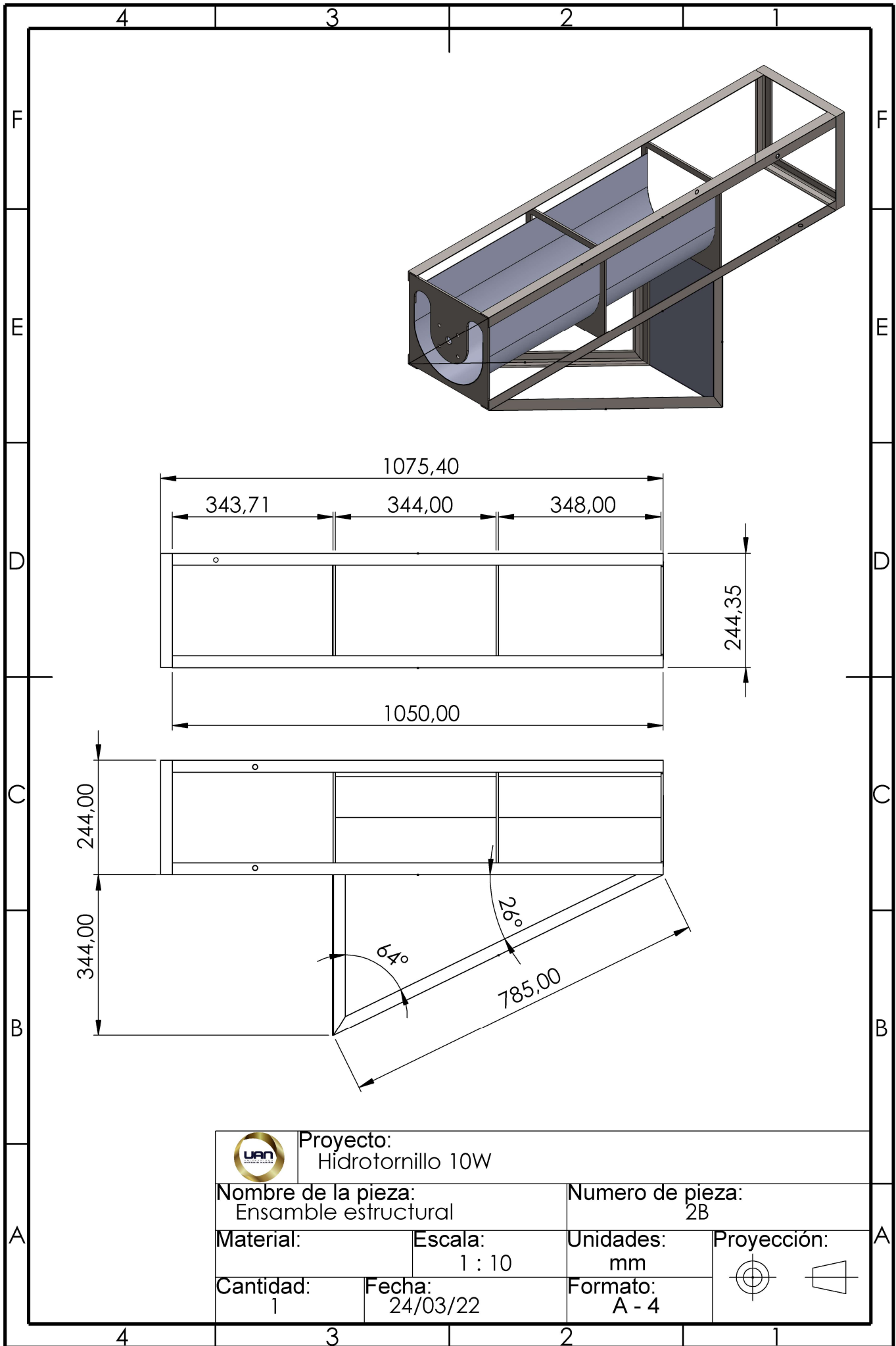
Formato:
A - 4



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Platina inferior	ASTM A36 3/16" Plano 1	1
2	platina de canal	ASTM A36 3/16" Plano 3	2
3	Angulo superior A	ASTM A36 L 1/8 x 1 in Plano 4	1
4	Angulo superior B	ASTM A36 L 1/8 x 1 in Plano 4	1
5	Angulo inferior C	ASTM A36 L 1/8 x 1 in Plano 5	1
6	Angulo inferior D	ASTM A36 L 1/8 x 1 in Plano 5	1
7	Angulo trasero	ASTM A36 L 1/8 x 1 in Plano 7	4
8	Angulo base B	ASTM A36 L 1/8 x 1 in Plano 8	1
9	Angulo base A	ASTM A36 L 1/8 x 1 in Plano 8	1
10	Angulo agua A	ASTM A36 L 1/8 x 1 in Plano 9	1
11	Angulo agua B	ASTM A36 L 1/8 x 1 in Plano 9	1
12	Canal	Galvanizado calibre 12 plano 19	1
13	Lamina represamiento	Galvanizado calibre 12 plano 20	1



 Proyecto: Hidrotornillo 10W			
Nombre de la pieza: Partes de la estructura		Numero de pieza: 1B	
Material:		Escala: 1 : 10	
Cantidad: 1		Unidades: mm	
Fecha: 24/03/22		Proyección:  	
Formato: A - 4			



Proyecto:
Hidrotornillo 10W

Nombre de la pieza:
Ensamble estructural

Numero de pieza:
2B

Material:

Escala:
1 : 10

Unidades:
mm

Proyección:

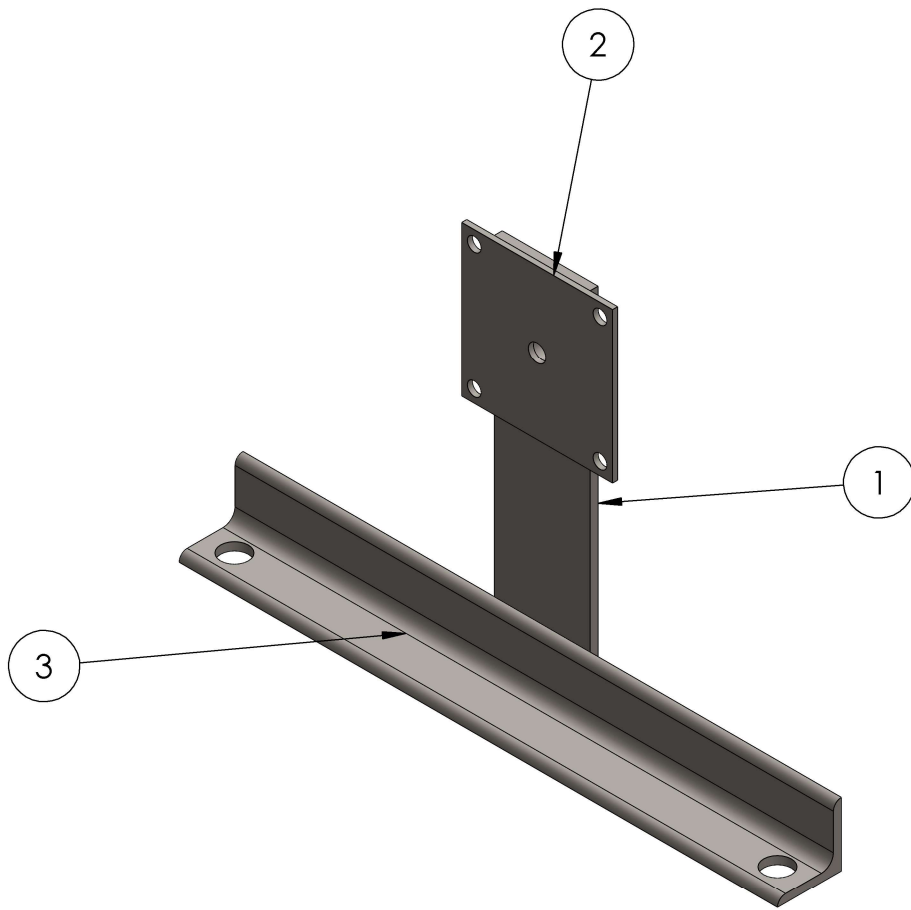
Cantidad:
1




Fecha:
24/03/22

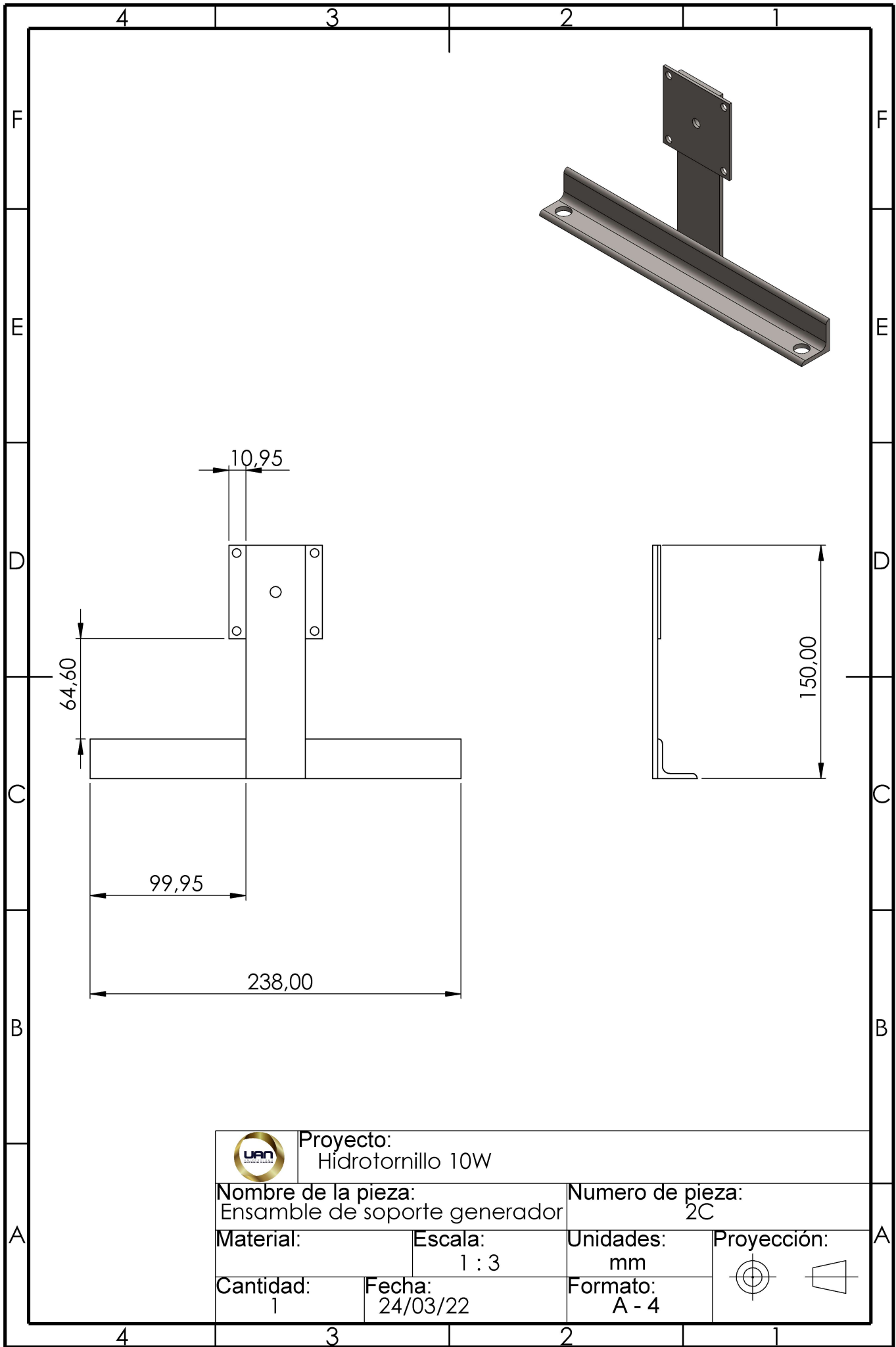
Formato:
A - 4



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
1	Platina m1	Platina 1/8 in ASTM A36 Plano 11	1
2	Platina m2	Platina CAL 14 ASTM A36 Plano 12	1
3	Angulo de soporte G	ASTM A36 L 1/8 x 1in Plano 10	1



		Proyecto: Hidrotornillo 10W	
Nombre de la pieza: Piezas Soporte generador		Numero de pieza: 1C	
Material:	Escala: 1 : 2	Unidades: mm	Proyección:
Cantidad: 1	Fecha: 24/03/22	Formato: A - 4	 



Proyecto:
Hidrotornillo 10W

Nombre de la pieza:
Ensamble de soporte generador

Numero de pieza:
2C

Material:

Escala:
1 : 3

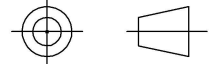
Unidades:
mm

Proyección:

Cantidad:
1

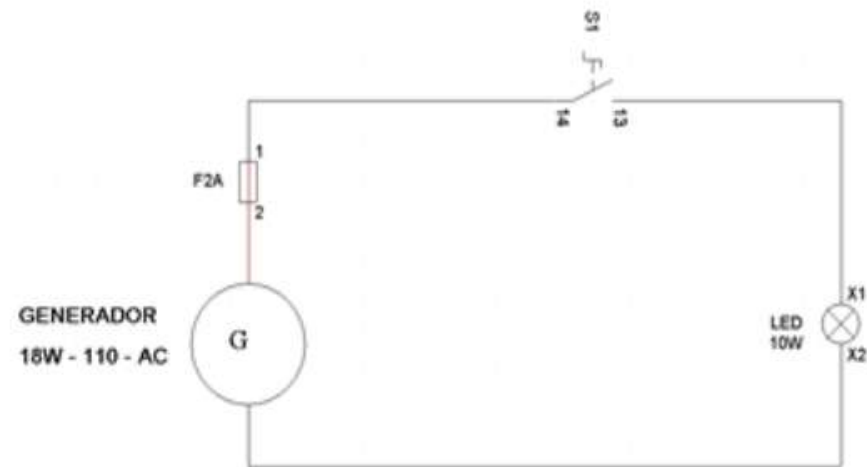
Fecha:
24/03/22

Formato:
A - 4



A


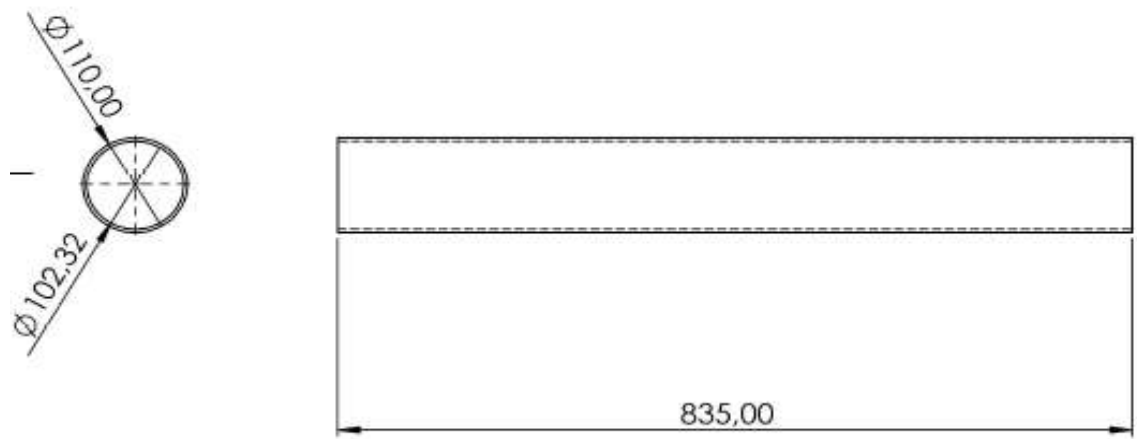
A



	Fecha	Nombre	Firmas	Entidad	Título	Fecha	Núm:
Dibujado	06-ABRIL-2022	FERNEY HIDALGO		UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO	HIDROTORNILLO 10W	26-may.-2022	1 de 1
Comprobado		JULIAN CASTRO				Archivo:	CADe_S1

ANEXOS II

1. Hoja de desarrollo para mecanizado de eje hueco.

	Universidad Antonio Nariño			
	Ingeniería Mecánica			
	Facultad FIMEB			
	Hoja de procesos			
Proyecto	Autores	Pagina		
Hidrotornillo 10W	Ferney Hidalgo, Julián Castro	1		
Piezas	Material	Dimensiones en bruto		
Eje hueco	Tubo SCH 40 Ø4"	840 mm		
Maquina		Herramientas		
Tronzadora, Torno convencional		Flexómetro		
		Marcador		
Insumos		Butil en tungsteno		
Disco para tronzadora 355 x 2,77 x 25,4 mm		Calibrador pie de rey		
Butil de tungsteno				
Número de plano	15	Cantidad	1	
				
Nota	Las siguientes operaciones se realizan para las piezas requeridas en los planos especificados en esta hoja de proceso.			


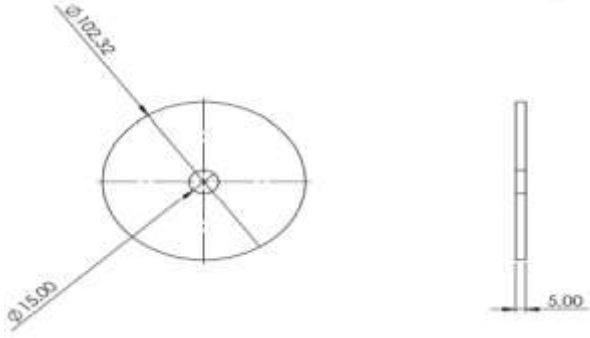
Operación	Descripción	Herramienta	Duración
1	1.1 Medir la longitud según especificaciones del plano.	Flexómetro	1 min
	1.2 Marcar distancias según el plano.	Marcador	
2	2.1 Hacer corte en la demarcación.	Tronzadora	2 min
3	3.1 Montar el tubo al torno convencional, alinearlos con la luneta, refrentar según la longitud especificada por el plano.	Torno convencional	5 min
4	4.1 Alesar parte interna para instalar tapas laterales.	Torno convencional	5 min
5	5.1 Acoplar las tapas al eje hueco.	manualmente	1min
6	6.1 Montar al torno, centrar con la luneta y hacer los respectivos centros en las puntas .	Torno y luneta	5 min
	6.2 Se ajusta el tubo hueco entre copa y punto para cilindrar y dar diámetro exterior según el respectivo plano.	Torno	10 min
7	7.1 Realizar trazado del paso en el exterior del tubo.	Torno	5 min
Nota	Los ítems 5 y 6 se deben hacer luego de tener soldadas las tapas laterales al eje hueco, hoja de procesos 4.		

2. Hoja de desarrollo para mecanizado de ejes de las tapas.

	Universidad Antonio Nariño			
	Ingeniería Mecánica			
	Facultad FIMEB			
	Hoja de procesos			
Proyecto:	Autores:		Pagina:	
Hidrotornillo 10W	Ferney Hidalgo, Julián Castro		2	
Piezas:	Material:		Dimensiones en bruto:	
Ejes para tapas	Barra ASTM A36 Ø 5/8		140 mm	
Maquina:			Herramientas:	
Tronzadora, torno convencional.			Flexómetro	
			Marcador industrial	
Insumos			Buriles de tungsteno	
Disco para tronzadora 355 x 2,77 x 25,4 mm			Calibrador pie de rey	
Plano	14		cantidad	1
Plano	13		cantidad	1
Nota	Las siguientes operaciones se realizan para las piezas requeridas en los planos especificados en esta hoja de proceso.			
Operación	Descripción	Herramienta	Duración	



1	1.1 Medir la longitud según especificaciones del plano.	Flexómetro	1 min
	1.2 Marcar la longitud deseada.	Marcador	
2	2.1 Montar la pieza al torno.	Manualmente	2 min
3	3.1 Centrarlos y refrentar para obtener la longitud especificada.	Torno convencional	3 min
	3.2 Cilindrar para obtener el diámetro deseado.	Torno convencional	

3. Hoja de desarrollo para el mecanizado de las tapas.

	Universidad Antonio Nariño		
	Ingeniería Mecánica		
	Facultad FIMEB		
	Hoja de procesos		
Proyecto	Autores	Pagina	
Hidrotornillo 10W	Ferney Hidalgo, Julián Castro	3	
Piezas	Material	Dimensiones en bruto	
Tapas para eje hueco	Platina 3/8 in ASTM A36	102 x 205mm	
Maquina		Herramientas	
Cortadora de oxicorte y torno convencional		Flexómetro	
		Marcador industrial	
Insumos		Buriles de tungsteno	
Lamina HR 3/8		Calibrador pie de rey	
Oxígeno y gas combustible		Brocas de cobalto hss	
Aceite refrigerante soluble			
Número de plano	16	Cantidad	2
			
Nota	Las siguientes operaciones se realizan para las piezas requeridas en los planos especificados en esta hoja de proceso.		
Operación	Descripción	Herramienta	Duración
1	1.1 Medir el diámetro según especificaciones del plano.	Flexómetro	1 min


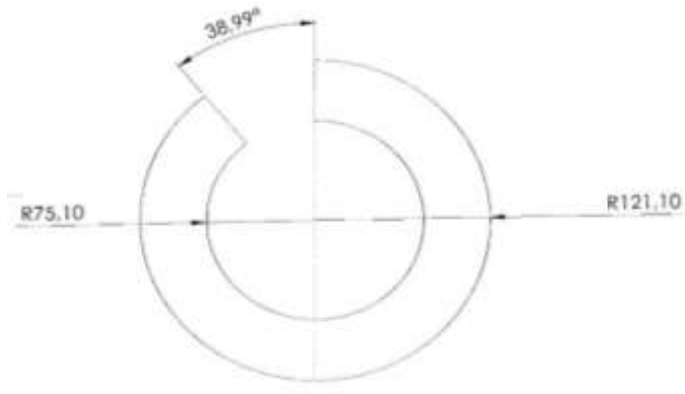
	1.2 Marcar el radio según el diámetro.	Marcador	1 min
2	2.1 Regular la mezcla entre oxígeno y gas.	Regulación de forma manual	2 min
	2.2 Realizar el corte según el radio trazado.	Oxicorte	3 min
3	3.1 Montar al torno para cilindrar al diámetro que se tiene el eje hueco, usar buril de tungsteno y aceite soluble.	Torno	2 min
4	4.1 Realiza perforación en el centro para insertar el eje central, usar broca de cobalto hss y soluble.	Torno	5 min

4. Hoja de desarrollo para soldadura de tapas.

	Universidad Antonio Nariño			
	Ingeniería Mecánica			
	Facultad FIMEB			
	Hoja de procesos			
Proyecto:	Autores:	Página:		
Hidrotornillo 10W	Ferney Hidalgo, Julián Castro	4		
Piezas:	Descripción			
eje hueco	Soldadura de tapas y ejes			
Maquina:		Herramientas:		
Equipo de soldadura		Grata		
		Martillo para soldadura		
Insumos				
Mezcla de gas.				
Soldadura mig				
Plano			cantidad	1
				
Nota	Las siguientes operaciones se realizan para las piezas requeridas en los planos especificados en esta hoja de proceso.			
Operación	Descripción	Herramienta	Duración	
1	1.1 Ensamblar lo ejes en los discos de tapas.	Manualmente	1 min	
	1.2 Calibrar el equipo de soldadura.	Manualmente	1 min	

2	2.1 Aplicar soldadura en la parte interna del disco.	Equipo de soldadura	2 min
3	3.1 Ensamblar las tapas en el eje hueco.	Manualmente	5 min
	3.2 Aplicar soldadura alrededor del tubo y del disco, repetir proceso en las dos caras laterales.	Equipo de soldadura	
4	4.1 Limpiar restos de soldaduras.	Grata y martillo de soldadura	2 min

5. Hoja de desarrollo para corte láser de las hélices.

	Universidad Antonio Nariño			
	Ingeniería Mecánica			
	Facultad FIMEB			
	Hoja de procesos			
Proyecto	Autores	Pagina		
Hidrotornillo 10W	Ferney Hidalgo, Julián Castro	5		
Piezas	Material	Dimensiones en bruto		
hélices	Lamina CAL 14 TSM A36	700 x 760 mm		
Maquina:		Herramientas		
Cortadora láser		Computador y software		
Número de plano	17	Cantidad	9	
				
Operación	Descripción	Herramienta	Duración	
1	1.1 Realizar punto de enfoque.	Cortadora láser	3 min	
	1.2 Calibrar velocidad y potencia para corte.	Cortadora láser		
2	2.1 Importar planos.	Software	5 min	
	2.2 Seleccionar método de trayectoria.	Software		
	2.3 Dimensionar el área de trabajo.	Software		

3	3.1 Posicionar inicio de corte.	Cortadora láser	20 min
	3.2 Proceso de cortado con láser.	Cortadora láser	
Nota	El proceso es llevado acabo solo una vez donde se cortan las 9 piezas según especificaciones del plano.		

6. Hoja de desarrollo para ensamble de tornillo sinfín.

	Universidad Antonio Nariño			
	Ingeniería Mecánica			
	Facultad FIMEB			
	Hoja de procesos			
Proyecto	Autores		Página	
Hidrotornillo 10W	Ferney Hidalgo, Julián Castro		6	
Piezas	Descripción		Dimensiones en bruto	
Tornillo sinfín	Ensamble del tornillo.			
Maquina			Herramientas	
Equipo de soldadura			Flexómetro	
			Marcador industrial	
Insumos			Diferencial de cadena	
Mezcla de gas			Grata metálica	
Soldadura mig			Espátula para soldadura	
Plano	2A		cantidad	1
Nota	Las siguientes operaciones se realizan para los planos mostrados anterior mente seguir especificaciones de ensamble plano 2B			
Operación:	Descripción	Herramienta	Duración	

1	1.1 Tener presente el sentido de giro que tendrá el tornillo sinfín.	Manualmente	1 min
	1.2. Soldar 3 discos en serie para estirarlos y dar el respectivo paso.	Equipo de soldadura	5 min
2	2.1 Estirar los discos con la diferencial hasta que tengan el paso que indica el plano.	Diferencial	5 min
3	3.1. Realizar los pasos 1 y 2 para cada entrada del tornillo.	Manualmente	20 min
	3.2 Soldar las nuevas hélices formadas de los discos al tubo central (cordones de soldadura cortos).	Equipo de soldadura	8 min
4	4.1limpiar sobrantes de soldadura.	Grata metálica, martillo para soldadura	2 min

7. Hoja de desarrollo para platinas de soporte.

	Universidad Antonio Nariño			
	Ingeniería Mecánica			
	Facultad FIMEB			
	Hoja de procesos			
Proyecto	Autores		Página	
Hidrotornillo 10W	Ferney Hidalgo, Julián Castro		7	
Piezas	Material		Dimensiones en bruto	
Platinas de soporte	Platina 3/16 in ATSM A36		750 x 750 mm	
Maquina:			Herramientas	
Cortadora láser			Computador y software	
Número de plano	1		Cantidad	1
Número de plano	2		Cantidad	2

Número de plano	3	Cantidad	1
<p>The drawing shows a U-shaped component. The top horizontal edge is 104.00 units long, with a 15.00 unit offset from the top edge. The bottom horizontal edge is 238.00 units long. The two vertical sides are 238.00 units high. The bottom curve is a semi-circle with a radius of R104.00. A dimension of 4.76 is shown at the bottom right corner.</p>			
Operación	Descripción	Herramienta	Duración
1	1.1 Realizar punto de enfoque.	Cortadora láser	3 min
	1.2 Calibrar velocidad y potencia para corte.	Cortadora láser	
2	2.1 Importar planos.	Software	5 min
	2.2 Seleccionar método de trayectoria.	Software	
	2.3 Dimensionar el área de trabajo.	Software	
3	3.1 Seleccionar punto de inicio.	Cortadora láser	20 min
	3.2 Proceso de cortado con láser.	Cortadora láser	
Nota	El proceso es uno solo donde se cortan los planos según especificaciones.		

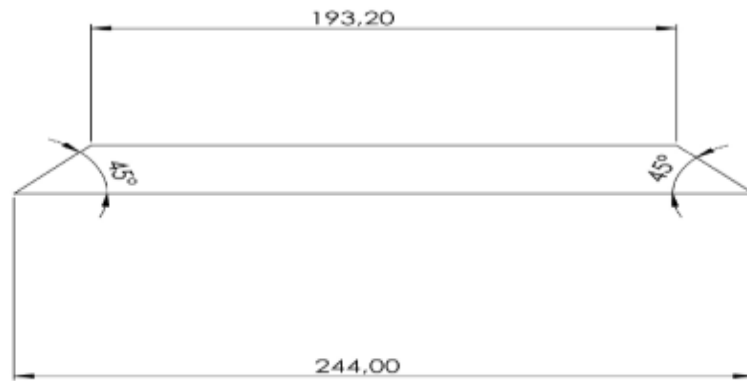
9. Hoja de desarrollo para corte y perforación de ángulos.

	Universidad Antonio Nariño		
	Ingeniería Mecánica		
	Facultad FIMEB		
	Hoja de procesos		
Proyecto	Autores	Pagina	
Hidrotornillo 10W	Ferney hidalgo, Julián castro	8	
Piezas	Material	Dimensiones en bruto	
Ángulos de soporte	Ángulo 1/8 x 1 in ASTM A36	12 m	
Maquina		Herramientas	
Tronzadora, taladro de árbol		Flexómetro	
Insumos		Marcador	
Disco para tronzadora 355 x 2,77 x 25,4 mm		Lima	
		Calibrador pie de rey	
		Brocas hss	
		Escuadra combinada	
Número de plano	5	Cantidad	2
Número de plano	4	Cantidad	2

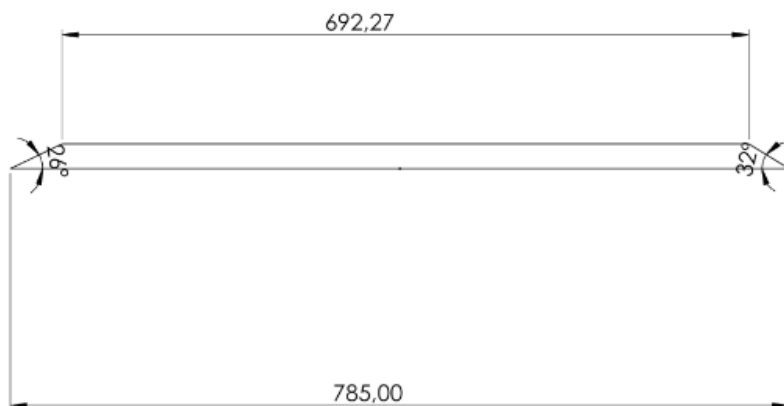
Número de plano	6	Cantidad	2
Número de plano	10	Cantidad	1
Nota	Las siguientes operaciones se realizan para las piezas requeridas en los planos especificados en esta hoja de proceso.		
Operación	Descripción	Herramienta	Duración
1	1.1 Medir la longitud según especificaciones del plano.	Flexómetro	1 min
	1.2 Marcar distancias según el plano.	Marcador	
2	2.1 Hacer la Demarcación de los ángulos.	Escuadra combinada	2 min
3	3.1 realizar cortes en las demarcaciones.	Tronzadora	3 min

	3.2 Eliminar los filos de los cortes.	Lima	1 min
4	4.1 Seleccionar los ángulos que requieren perforación .	Manualmente	1 min
	4.2 Hacer la respectiva marcación según la medida especificada en los planos para las perforaciones.	flexómetro, marcador industrial	2 min
5	5.1 Realizar los respectivos agujeros en el taladro de árbol, como lo indica el plano.	taladro de árbol, brocas	5 min

Número de plano	7	Cantidad	4
------------------------	---	-----------------	---

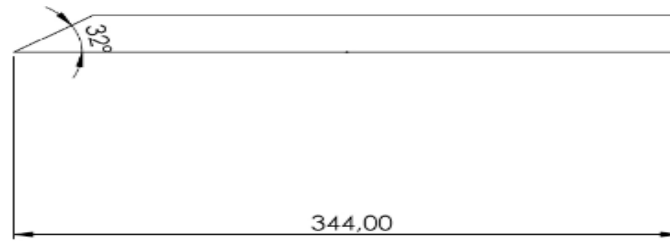


Número de plano	8	Cantidad	2
------------------------	---	-----------------	---




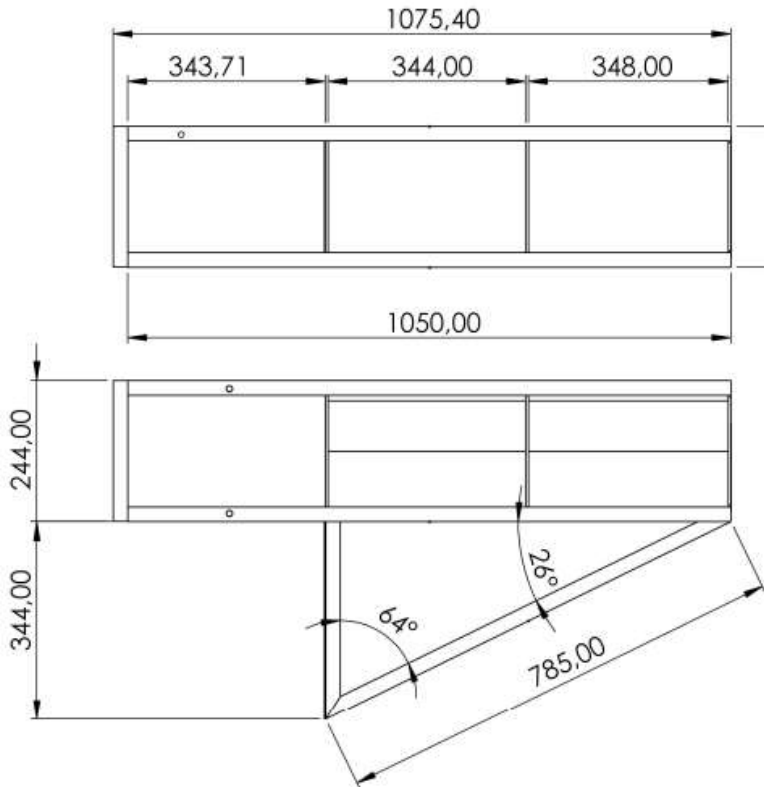
Número de plano	9	Cantidad	2
------------------------	---	-----------------	---

--	--	--	--



Operación	Descripción	Herramienta	Duración
1	1.1 Medir la longitud según especificaciones del plano para dimensionar los cortes.	Metro	3 min
	1.2 Medir Angulo según especificaciones del plano.	Escuadra combinada	1 min
	1.3 Marcar longitud y Angulo según especificaciones del plano.	Marcador	3 min
2	2.1 Hacer cortes en la demarcación.	Tronzadora	3 min
3	3.1 Montar pieza cortada prensa de banco.	Prensa de banco	3min
	3.2 Pulir filos donde se hizo el corte.	Lima	

11. Hoja de desarrollo para el armado de la estructura

	Universidad Antonio Nariño			
	Ingeniería Mecánica			
	Facultad FIMEB			
	Hoja de procesos			
Proyecto	Autores		Pagina	
Hidrotornillo 10W	Ferney Hidalgo, Julián Castro		9	
Piezas	Descripción		Dimensiones en bruto	
estructura de soporte	Ensamble estructural.			
Maquina			Herramientas	
Equipo de soldadura,			Flexómetro	
			Marcador	
Insumos			Escuadra combinada	
Mezcla de gas			Grata metálica	
Soldadura mig			Espátula para soldadura	
Plano	1A	cantidad	1	
				

Nota	Las siguientes operaciones se realizan para los planos mostrados anterior mente seguir especificaciones de ensamble plano 2A		
Operación:	Descripción	Herramienta	Duración
1	1.1 Verificar que los ángulos tengan la medida correcta.	Manualmente	1 min
	1.2. Seleccionar los ángulos que dan la inclinación y los rectos.	Equipo de soldadura	3 min
2	2.1 Soldar los ángulos junto con la platina delantera de soporte.	Equipo de soldadura	5 min
3	3.1. Soldar ángulos a las demás platinas de soporte.	Equipo de soldadura	5 min
	3.2 Soldar los demás puntos de unión de los ángulos de la estructura.	Equipo de soldadura	8 min
4	4.1 Soldar la canal a la estructura.	Equipo de soldadura	2 min
5	5.1 Limpiar restos de soldadura	Grata metálica, martillo de soldadura	2 min

Anexo III

Fotos desarrollo hidrotornillo

Desarrollo de la hélice



Tapas y ejes mecanizado



Mecanizado eje hueco



Desarrollo del hidrotornillo



Hidrotornillo terminado



Fotos desarrollo de la estructura

Platinas





Corte de ángulos



Desarrollo de la estructura





Ángulos de soporte



Estructura terminada



Hidrotornillo puesto en funcionamiento.



Voltaje y corriente del hidrotornillo en funcionamiento.

