

**ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la  
Producción**

**“Diseño y Construcción de un Prototipo de Sistema de  
Conversión de Energía Oscilo-Undimotriz”**

**PROYECTO INTEGRADOR**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Mecánico**

Presentado por:

Medardo Alexander Cabrera Quimiz

Johnny Eduardo Puente Muñoz

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

Año: 2020

## DEDICATORIA

Dedico este proyecto a mis padres Medardo Cabrera Vélez y Rosalía Quimiz Figueroa, sin el apoyo incondicional de ellos este logro no hubiese sido posible.

A mi hermana por la gran ayuda y apoyo que ha significado para mí durante todos estos años en el transcurso de la carrera universitaria y a la persona favorita que me dio la universidad Marina Ordoñez Bermeo quien durante gran parte de este proceso estuvo junto a mí.

*Medardo Alexander Cabrera Quimiz*

# AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por ser mi luz de sabiduría y conocimiento.

A mis padres, Jonny y Teresa, por la motivación y fortaleza que me brindaron durante mi formación como Ingeniero.

A mi mamita Estrella y a mis hermanos, Bryant, Romina por el apoyo incondicional y sentirse siempre orgullosos de mí.

A mis amigos, por la confianza depositada en mí, por acompañarme, y alentarme durante esta etapa de mi vida.

*Johnny Eduardo Puente Muñoz*

## **AGRADECIMIENTO**

Nuestros sinceros agradecimientos al Ph.D. Ángel Ramirez, y M.Sc Daniela Benites por su ayuda, y por compartir su conocimiento durante el desarrollo del proyecto.

*Medardo Cabrera y Johnny Puente*

## DECLARACIÓN EXPRESA

“Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Medardo Alexander Cabrera Quimiz* y *Johnny Eduardo Puente Muñoz* damos nuestro consentimiento para que la ESPOL realice la comunicación pública de la obra por cualquier medio con el fin de promover la consulta, difusión y uso público de la producción intelectual”.



---

Medardo Cabrera Quimiz



---

Johnny Puente Muñoz

## EVALUADORES



.....  
**Ph.D Ángel Ramírez**

PROFESOR DE LA MATERIA



.....  
**MSc. Daniela Benites**

PROFESOR TUTOR

## RESUMEN

En un mundo que se encuentra dependiente de combustibles fósiles es necesaria la transición hacia nuevos modelos de generación de energía. En Ecuador el 39% de la estructura de generación eléctrica proviene de fuentes no renovables, donde según datos de CNEL EP en la región costa existen personas que no cuentan con servicio de energía eléctrica. En este contexto se plantea como objetivo el desarrollo de un prototipo de conversión de energía oscilo – undimotriz por principio de columna oscilante de agua (OWC).

La investigación comprendió el estudio de sistemas OWC, y todos los elementos que componen. Tomando los requerimientos de diseño se seleccionó la mejor alternativa que comprendió un sistema de captación de energía de la ola, una turbina de aire y un sistema de transmisión de potencia. Donde, mediante simulación se validó la funcionalidad del prototipo en condiciones previamente establecidas.

Se diseñó un prototipo innovador que demuestra el funcionamiento de un sistema OWC, del que se obtuvo una eficiencia energética de 24% cuando opera a 1150 [rpm]. El rango óptimo de operación se encontró entre 1150 – 1450 [rpm].

El aprovechamiento de un sistema OWC, es directamente proporcional a la variación de altura de agua. La manufactura aditiva permite diseñar un prototipo didáctico que garantiza el estudio de un nuevo modelo de energía sostenible.

**Palabras Clave:** Energía Undimotriz, Columna de Agua Oscilante, Turbina Wells, OWC.

## **ABSTRACT**

*In a world that is dependent on fossil fuels, a transition to new models of energy generation is necessary. In Ecuador, 39% of the electricity generation structure comes from non-renewable sources, where according to data from CNEL EP in the coastal region there are people who do not have electricity service. In this context, the objective is to develop a prototype for oscillating-wave energy conversion using the Oscillating Water Column (OWC) principle.*

*The research included the study of OWC systems, and all the elements that make up. Taking the design requirements, the best alternative was selected, which comprised a wave energy harvesting system, an air turbine and a power transmission system. Where, through simulation, the functionality of the prototype was validated under previously established conditions.*

*An innovative prototype was designed that demonstrates the operation of an OWC system, with an energy efficiency of 24% when operating at 1150 [rpm]. The optimal operative range was found between 1150-1450 [rpm].*

*The use of an OWC system is directly proportional to the variation in water height. And Through additive manufacturing, a didactic prototype is manufactured that guarantees the study of a new model of sustainable energy.*

**Keywords:** *Wave Energy, Oscillating Water Column, Wells Turbine, OWC.*

# ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i> .....	II
ÍNDICE GENERAL .....	III
ABREVIATURAS.....	VI
SIMBOLOGÍA.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS .....	VIII
ÍNDICE DE GRÁFICAS .....	X
ÍNDICE DE TABLAS.....	XI
ÍNDICE DE PLANOS.....	XII
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Definición del problema .....	1
1.2 Justificación del proyecto .....	2
1.3 Objetivos .....	3
1.3.1 Objetivo General .....	3
1.3.2 Objetivos Específicos.....	3
1.4 Marco teórico.....	3
1.4.1 Situación energética en Ecuador .....	3
1.4.2 Energía Undimotriz .....	5
1.4.3 Potencial energético de olas.....	7
1.4.4 Sistemas de conversión de energía undimotriz .....	8
1.4.5 Turbina Wells .....	11
CAPÍTULO 2.....	13
2. METODOLOGÍA.....	13
2.1 Requerimientos de diseño.....	13
2.2 Descripción general de alternativas.....	13

2.2.1	Selección de Alternativas.....	14
2.3	Método de matriz de decisión.....	16
2.3.1	Criterios de Diseño .....	16
2.3.2	Ponderación de Criterios .....	16
2.3.3	Matriz de Decisión .....	18
2.4	Diseño de forma .....	19
2.4.1	Alternativa Seleccionada: Sistema OWC.....	19
2.4.2	Especificaciones de Diseño .....	20
2.5	Flujo Metodología .....	20
2.5.1	Diseño conceptual y Requerimientos de diseño .....	21
2.5.2	Potencia energética de la ola.....	24
2.5.3	Diseño de Cámara de aire .....	25
2.5.4	Diseño de Turbina Wells.....	26
2.5.5	Diseño de Sistema De Transmisión.....	42
2.5.6	Diseño de estructura de Anclaje .....	59
CAPÍTULO 3.....		61
3.	RESULTADOS Y ANÁLISIS .....	61
3.1	Resultados del desarrollo del proyecto.....	61
3.2	Descripción y Funcionamiento .....	61
3.3	Especificaciones de la turbina .....	62
3.4	Manufactura Aditiva.....	63
3.5	Eficiencia Mecánica.....	67
3.6	Simulación de flujo de aire .....	70
3.6.1	Resultados simulación .....	71
3.7	Análisis Económico .....	76
3.7.1	Costos de materiales .....	76
3.7.2	Costos de manufactura aditiva.....	77

3.7.3	Costos varios .....	77
3.7.4	Costo total del proyecto .....	77
CAPÍTULO 4.....		78
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	78
4.1	Conclusiones.....	78
4.2	Recomendaciones.....	79
BIBLIOGRAFÍA		
APÉNDICE		

## **ABREVIATURAS**

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
OWC	Oscillating Water Column
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
CFD	Computer Fluent Dynamic
BEP	Barril equivalente de petróleo
PTO	Sistema de Toma de Fuerza
MWL	Medium Water Level
ASME	American Society of Mechanical Engineers
ANSI	American National Standards Institute
AGMA	American Gear Manufacturers Association

## SIMBOLOGÍA

m	Metro
mm	Milímetro
pulg	Pulgada
kg	Kilogramo
$V$	Velocidad del aire
$L$	Longitud
$\mu$	Viscosidad cinemática del aire
g	Aceleración de la gravedad

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Energía cinética y potencial de las olas.....	5
Figura 1.2 Generación de olas en la superficie del mar .....	6
Figura 1.3 Parámetros de una ola sinusoidal .....	7
Figura 1.4 Sistema de boya flotante Masuda .....	9
Figura 1.5 Sistema de conversión de energía Wave Dragon .....	10
Figura 1.6 Sistema de conversión Pendular .....	10
Figura 1.7 Sistema Oscillating Water Column .....	11
Figura 1.8 Turbina Wells.....	12
Figura 2.1 Tipos de convertidores OWC .....	14
Figura 2.2 Sistema OWC – Turbina Wells.....	19
Figura 2.3 Diagrama de Flujo de metodología del proyecto .....	21
Figura 2.4 Diseño conceptual canal de generador de olas.....	22
Figura 2.5 Banco generador de olas .....	22
Figura 2.6 Sistema motriz para generación de olas .....	23
Figura 2.7 Espacio físico disponible para sistema de conversión undimotriz .....	23
Figura 2.8 Diseño del rompeolas-convertidor en el Estrecho de Messina.....	25
Figura 2.9 Diseño conceptual de cámara de captación.....	26
Figura 2.10 Caída de presión de turbina Wells en un ducto.....	27
Figura 2.11 Nomenclatura de un perfil NACA.....	29
Figura 2.12 Perfil alar NACA 0021 .....	30
Figura 2.13 Diagrama de velocidades ideales y reales. ....	35
Figura 2.14 Características de un alabe en sustentación.....	40
Figura 2.15 Diagrama de Fuerzas en el alabe de una Turbina Wells.....	40
Figura 2.16 Medidas estándar para el eje de salida .....	52
Figura 2.17 Parámetros de un engrane cónico recto.....	53
Figura 2.18 Relación de transmisión de engranes cónicos rectos.....	55
Figura 2.19 Estructura de anclaje.....	60
Figura 3.1 Sección transversal de turbina Wells.....	62
Figura 3.2 Diseño conceptual de prototipo oscilo-undimotriz .....	63
Figura 3.3 Diagrama del proceso de Manufactura Aditiva .....	64
Figura 3.4 Impresión 3D de cámara de captación .....	65
Figura 3.5 Impresión 3D de turbina a escala y tobera convergente .....	65

Figura 3.6 Impresión 3D elementos de prototipo undimotriz .....	66
Figura 3.7 Prototipo undimotriz en el banco generador de olas .....	66
Figura 3.8 Partes de la simulación Turbina Wells.....	71
Figura 3.9 Distribución de la velocidad de aire (Corte central de la tobera) .....	72
Figura 3.10 Distribución de la velocidad de aire .....	72
Figura 3.11 Velocidad Radial (m/s) del aire en la turbina .....	73
Figura 3.12 Distribución de Presión (Corte central de la tobera) .....	73
Figura 3.13 Distribución de Presión en las hélices de la turbina .....	74
Figura 3.14 Distribución de flujo en la tobera .....	74
Figura 0.1 Banco generador de Olas.....	83
Figura 0.2 Tipo de Análisis .....	84
Figura 0.3 Configuración de los parámetros de rotación .....	84
Figura 0.4 Condiciones iniciales del aire .....	85
Figura 0.5 Condiciones de velocidad de entrada de aire.....	85
Figura 0.6 Condiciones de la Presión atmosférica .....	86

## ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1.1 Generación de energía eléctrica: renovables y no renovables. ....	4
Gráfica 2.1 Relación de teoría de generación aplicada .....	24
Gráfica 2.2 $C_l$ vs $C_d$ [NACA 0021].....	31
Gráfica 2.3 $C_l$ vs $\alpha$ [NACA 0021] .....	32
Gráfica 2.4 $C_l/C_d$ vs $\alpha$ [NACA 0021] .....	32
Gráfica 2.5 $C_d$ vs $\alpha$ [NACA 0021].....	33
Gráfica 2.6 Diagrama de cuerpo libre del eje de la turbina.....	44
Gráfica 2.7 Diagrama de Fuerza Cortante.....	45
Gráfica 2.8 Diagrama de Momento Flector.....	45
Gráfica 3.1 Potencia vs Velocidad angular .....	67
Gráfica 3.2 Torque vs Velocidad angular .....	68
Gráfica 3.3 Torque & Potencia vs Velocidad angular .....	69
Gráfica 3.4 Eficiencia vs Velocidad angular.....	69
Gráfica 3.5 Presión máxima vs Iteraciones de la simulación.....	75
Gráfica 3.6 Torque máximo en el eje "Y" vs Iteraciones de la simulación .....	76

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Ventajas y Desventajas de energía undimotriz.....	7
Tabla 2.1 Carta Morfológica .....	15
Tabla 2.2 Matriz de ponderación .....	17
Tabla 2.3 Matriz de decisión para selección de alternativa .....	18
Tabla 2.4 Relación de perfiles aerodinámicos NACA .....	30
Tabla 2.5 Fuerza y Momento máximo en el eje.....	46
Tabla 2.6 Dimensiones de rodamientos de bolas rígidas .....	57
Tabla 2.7 Dimensiones de rodamientos de bolas rígidas .....	59
Tabla 2.8 Materiales de estructura de anclaje .....	60
Tabla 3.1 Especificaciones de Turbina Wells .....	62
Tabla 3.2 Tabla de Costos de Materiales .....	76
Tabla 3.3 Costos totales de las piezas en Impresión 3D .....	77
Tabla 3.4 Costos variados .....	77
Tabla 3.5 Costo total del prototipo .....	77
Tabla 0.1 Ficha Técnica de Banco generador de Olas.....	83

## ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1 Partes de Prototipo Oscilo-Undimotriz

Plano 2 Prototipo Oscilo-Undimotriz

Plano 3 Cámara de Captación

Plano 4 Tobera Convergente

Plano 5 Ducto de Turbina

Plano 6 Turbina Wells – NACA 0021

Plano 7 Placa Soporte

Plano 8 Eje de Transmisión

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

El auge de la energía renovable undimotriz se remonta al siglo XIX, cuando surge el interés de estudio de sistemas de generación eléctrica alternativos a los de combustible fósil. La falta de estudios, el alto costo de implementación, no ha permitido el desarrollo de sistemas de generación de energía undimotriz alternativos a termoeléctricas, hidroeléctricas, fotovoltaica, eólica.

Ecuador, presenta en la actualidad una demanda de energía eléctrica superior a la que produce, lo que se traduce en una inaccesibilidad de recursos energéticos a determinados lugares de la región costa. Durante la última década la transformación de la matriz energética ha reducido la dependencia de plantas energéticas generadoras de emisiones, dando paso a nuevas tecnologías que han permitido mitigar la aceleración del cambio climático. El desarrollo de este proyecto satisface el objetivo número siete de los objetivos de desarrollo sostenible de la agenda 2030 de las naciones unidas, el cual garantiza el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos.

En este contexto el proyecto se centra en desarrollar un prototipo de planta de generación eléctrica por sistema de conversión oscilo-undimotriz, que permite obtener la energía potencial de las olas y transformarlo en energía mecánica por medio de un sistema de conversión. El estudio es de interés académico y comercial, fomentando el uso de un nuevo tipo de energía limpia, haciendo uso de un recurso abundante en el perfil costanero ecuatoriano, el mar.

### 1.1 Definición del problema

En un mundo que se encuentra dependiente de los combustibles fósiles es necesaria la transición hacia nuevos modelos de generación de energía eléctrica basados en energías renovables y esto tiene que marcar el futuro de las agendas públicas globales. Para así contribuir con la reducción del impacto ambiental. En Ecuador la generación de energía eléctrica no logra cubrir la demanda necesaria para el consumo de la población,

existen 459 000 personas que no cuentan con este servicio básico, donde la mayoría de estos se encuentran en las provincias de la región costa como Esmeraldas con 7.64%, Los Ríos 6.39% y Santa Elena con 7.18% según datos de (CNEL EP, 2017). De acuerdo con las políticas energéticas del Ecuador, se debe fomentar el uso de energías renovables para cubrir la demanda energética, para así garantizar una energía limpia y de calidad que ayude a la conservación del medio ambiente y ayudar a la reducción de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). En este contexto, Ecuador cuenta con 760 km de perfil costero, emplazamiento óptimo para desarrollar tecnología undimotriz. En la actualidad se encuentra en etapa de estudio el potencial de la energía producida por el movimiento del oleaje, por lo que es de interés público, privado la investigación e inversión de nuevos dispositivos que permitan modelar nuevos sistemas de conversión de energía.

## **1.2 Justificación del proyecto**

Cubrir al 100% la necesidad energética que se requiere en el país es de vital importancia, pero no solo cubrir la demanda, sino que esta sea amigable con el medio ambiente, las cuales en la actualidad se las obtiene de energía eólica y solar. En el 2017 en Ecuador se publicaron los resultados de un proyecto interinstitucional del Ministerio de Electricidad y Energía Renovable (MEER) (Rodriguez R, 2017), donde se mostró el potencial que tiene aprovechar la energía undimotriz para la generación de energía eléctrica. Algunas universidades del país que han realizado investigaciones diseñando varios prototipos con diferentes formas de captación de esta energía utilizando prototipos con boyas y sumergidos los cuales no han sido eficientes, de alto grado de dificultad para instalación, mantenimiento y costo de construcción. Por esto en este proyecto se analizará el sistema de columna de agua oscilante para ser instalados en las orillas de los mares que vendría a ser un sector estratégico para la implementación de este sistema de generación de energía.

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

Diseñar y construir un prototipo de sistema de conversión de energía oscilo-undimotriz utilizando el principio de columna de agua oscilante.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

1. Analizar el potencial energético undimotriz por el principio de columna de agua oscilante.
2. Evaluar y desarrollar la mejor alternativa que sirva de estudio de energía undimotriz.
3. Realizar el diseño detallado de todos los componentes mecánicos para el prototipo a escala.
4. Fabricar los componentes del prototipo utilizando impresión 3D.
5. Evaluar la eficiencia energética del prototipo.

## **1.4 Marco teórico**

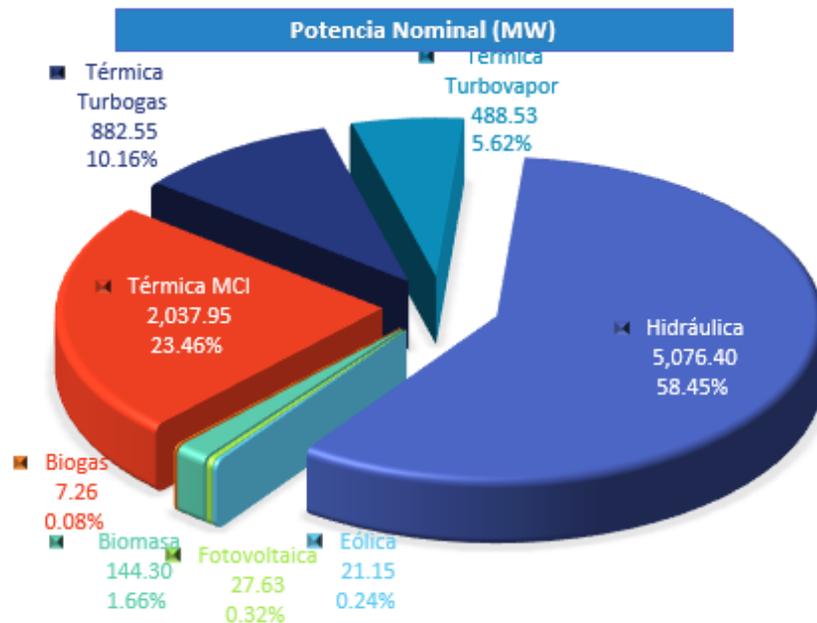
En el siguiente capítulo se revisa la fundamentación teórica del diseño de un prototipo de conversión de energía undimotriz. Se describe la situación nacional energética, potencial energético de olas, tipos de convertidores de energía undimotriz.

### **1.4.1 Situación energética en Ecuador**

El Ecuador cuenta con generación de energía primaria y secundaria, donde esta comprende la producción de petróleo (BEP) y generación de energía eléctrica siendo esta parte fundamental de la generación de ingresos al país y el abastecimiento.

La energía eléctrica producida en el Ecuador según datos de (ARCONEL, 2020) hasta abril del 2020 muestra que 60.75% de la producción de energía eléctrica viene de energías renovables como la de mayor aporte que es energía eléctrica obtenida por hidroeléctricas con un 58.45%, eólica 0.24%, fotovoltaica 0.32%,

Biomasa 1.66% y biogás con 0.08% frente a los obtenidos por energía no renovable que representa el 39.25% obtenidos de térmica con motor combustión interna (MCI) 20.30%, térmica turbogas 9.21%, térmica turbovapor 5.62%. cómo se observa en la gráfica 1.1



**Gráfica 1.1 Generación de energía eléctrica: renovables y no renovables.**

Fuente: [ARCOTEL,2020]

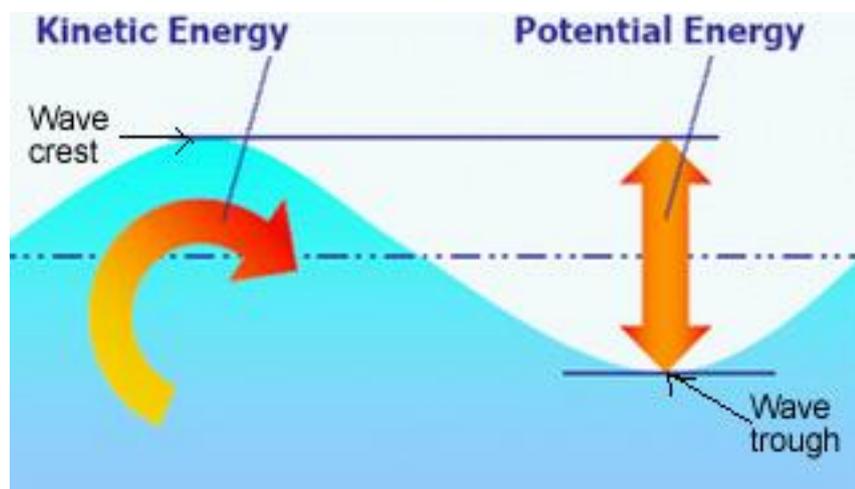
Cabe destacar que el aumento de un 19% de energía renovable crecieron las exportaciones de energía eléctrica a países vecinos (Colombia, Perú), con una venta de 1765 GWh y 60 GWh (Expreso, 2020).

Por esto en la actualidad con la finalidad de cambiar la matriz productiva de energía eléctrica y obtener una energía limpia y de fuentes renovables, se estudian las diferentes formas de generar energía eléctrica proveniente de las olas captando la energía undimotriz, para poder llegar con este servicio básico a la zona costera del país donde se encuentra el 3% de la población que no cuenta con este servicio.

Para esto las universidades están trabajando en diferentes propuestos para poder aprovechar esta energía, y abastecer al 100% de la población.

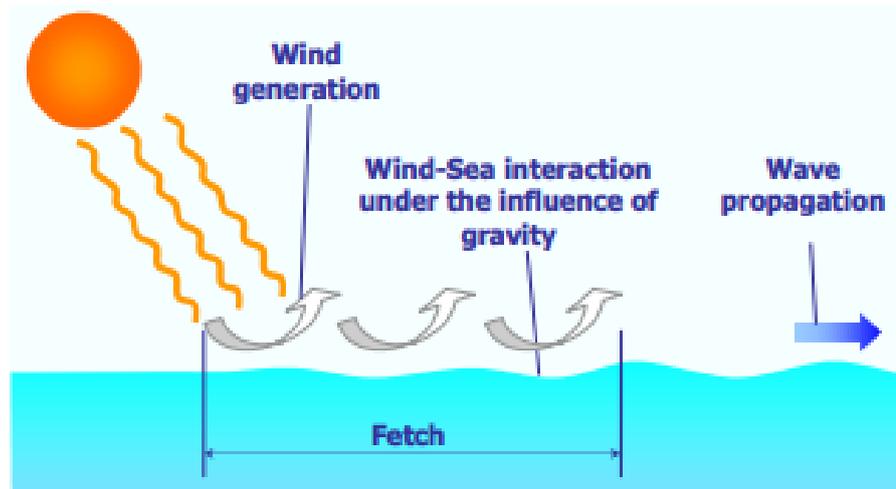
#### 1.4.2 Energía Undimotriz

La energía undimotriz se obtiene de las partículas del agua producidas por el movimiento cinemático de las olas, que describen una trayectoria circular, y la energía potencial de las partículas a una determinada altura de las olas.



**Figura 1.1 Energía cinética y potencial de las olas**  
Fuente: [Centre for Renewable Energy Sources, 2006]

La energía de las olas tiene su origen en la radiación solar incidente sobre la superficie de la tierra, provocando un aumento de temperatura y presión en distintos lugares de la superficie, lo que genera desplazamientos de aire de diferentes intensidades y direcciones en la superficie libre del océano.



**Figura 1.2 Generación de olas en la superficie del mar**

**Fuente: [Centre for Renewable Energy Sources, 2006]**

Los desplazamientos de aire o también conocidos como vientos, se desplazan a lo largo de la superficie del mar transfiriendo su energía al agua y formando las olas. En este contexto, el oleaje actúa como un almacenador y transporte de energía con pérdidas no significativas.

Con más detalle Fernández Chozas explica cómo las partículas tienen mayor libertad de traslación en la superficie del mar, esto debido a que la densidad del aire es menor que la del agua permitiendo que las olas se propaguen a lo largo de miles de kilómetros por la superficie del mar. Además, poseen la capacidad de desplazarse sin presentar pérdidas de energía considerables y, por esta razón la energía almacenada en las olas acaba en el borde continental, de modo que la energía de las olas se concentra en las costas. (Solé, 2014)

A continuación, se presenta una tabla de ventajas y desventajas de la energía undimotriz:

**Tabla 1.1 Ventajas y Desventajas de energía undimotriz**

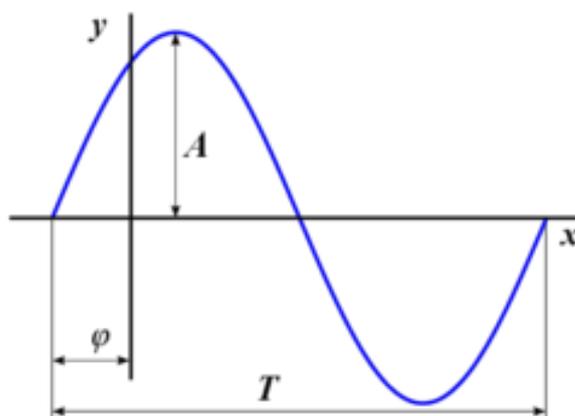
VENTAJAS	DESVENTAJAS
1. Fuente de recurso ilimitado y predecible	1. Dispositivos de baja eficiencia
2. Alta disponibilidad de suministro energético	2. Sujeto a condiciones climáticas adversas
3. Desplazamiento del oleaje sin pérdida de energía	3. Altos costos de instalación y mantenimiento
4. Impulsa el desarrollo de fuentes limpias y renovables de energía	4. Efectos corrosivos en la estructura
5. Dispositivos pequeños y económicos	5. Alto impacto ambiental: Alteración de ecosistemas, flora y fauna marina

Fuente: [Elaboración Propia]

### 1.4.3 Potencial energético de olas

Las olas se caracterizan por su longitud de onda,  $L$ , altura de onda,  $H$ , y el período,  $T$ . La altura de onda es la diferencia en altura entre un pico y un valle, La longitud de onda es la distancia entre dos picos consecutivos, la altura de onda es la diferencia en altura entre un pico y un valle; y el período es el tiempo en segundos que tarda un valle o un pico de la ola en recorrer su longitud de onda. La frecuencia  $f$  de la ola se define como el número de oscilaciones de la superficie de la ola por segundo, visto por un observador fijo, y es el inverso del período. Es decir,  $f=1/T$ . (Falnes, 2010).

El potencial que una ola obtiene depende de la magnitud del flujo de aire sobre la superficie del mar.



**Figura 1.3 Parámetros de una ola sinusoidal**

Fuente: [Caicedo, 2019]

La potencia se encuentra en unidades kW por metro de ancho de ola, contenida en una ola ideal, y puede escribirse según la ecuación 1.1:

$$P = \frac{g^2 H^2 T^2}{32 \pi} \quad (1.1)$$

Donde:

g	Aceleración de la gravedad
H	Es la altura de la ola (m)
T	Es el periodo (s)

#### **1.4.4 Sistemas de conversión de energía undimotriz**

La conversión de energía undimotriz es el resultado de la obtención de la energía del oleaje a través de un sistema oscilatorio, que aprovecha el movimiento de las olas.

Se han desarrollado patentes tecnológicas de aprovechamiento de energía de olas, sin embargo, se encuentran en fase de estudios y no han logrado ser altamente competitivas en términos técnicos y económicos a otros sistemas de obtención de energía. Actualmente existen dispositivos en desarrollo, e implementados a escala comercial en Europa y América del Norte, que apuntan a lograr avances de desarrollo en la capacidad de obtención de energía de las olas, con el objetivo de demostrar la viabilidad de implementación de plantas undimotriz alrededor del mundo. Los principios para la conversión de energía se clasifican según su estructura, y tipo de sistema de conversión de energía.

##### **1.4.4.1 Estructuras flotantes: Aws Archimedes Wave Swing**

El principio de funcionamiento del dispositivo se basa en el principio de Arquímedes para la generación de energía eléctrica. Son dispositivos puntuales de captación de la energía de la ola incidente. Tiene una estructura simétrica,

por lo que opera independiente a la dirección de propagación de la ola. Consta de una cámara flotante semi sumergida con una columna oscilante de agua.

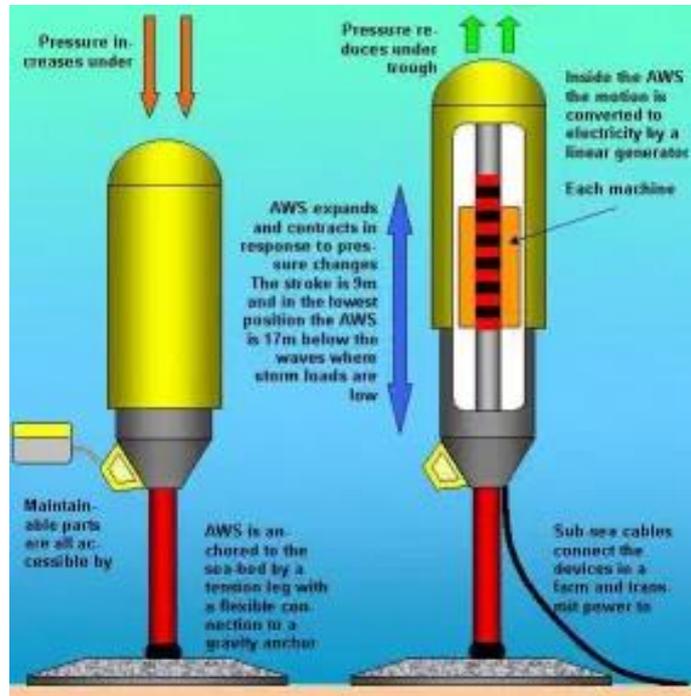


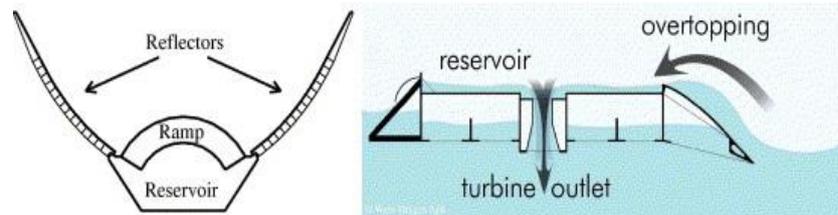
Figura 1.4 Sistema de boya flotante Masuda  
Fuente: [Energíadelmar, 2013]

#### 1.4.4.2 Estructura Amarrado: Wave Dragon

Wave Dragon es una tecnología a gran escala para la generación de electricidad a partir de la energía de las olas del océano. Inventado por Erik Friis-Madsen, ha sido desarrollado con el apoyo financiero de la Unión Europea, la Agencia de Desarrollo de Gales, la Autoridad de Energía de Dinamarca y el Programa PSO de Servicios Públicos de Dinamarca.

El dispositivo consiste en una rampa de doble curva, por la que surgen las olas entrantes (como en una playa). Detrás de la cresta de la rampa se encuentra un depósito que recoge el agua que rebasa la rampa. La energía se extrae a medida que se permite que el agua capturada en el embalse

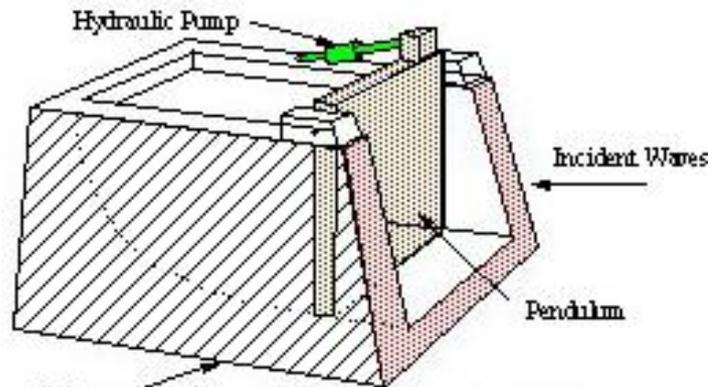
drene de regreso al mar a través de una serie de turbinas hidráulicas de baja carga ubicadas dentro del embalse.



**Figura 1.5 Sistema de conversión de energía Wave Dragon**  
Fuente: [Renewable Energy, 2006]

#### 1.4.4.3 Estructura Fija: Pendular

El pendular es un dispositivo de sistema de conversión de energía undimotriz que consiste en una estructura en forma de cajón, que da soporte a una pala en forma de compuerta que realiza un movimiento de péndulo cuando la fuerza generada por el movimiento de las olas golpea la pala. La pala ejerce una fuerza a un cilindro hidráulico que dirige el movimiento a un rectificador para generar energía eléctrica.

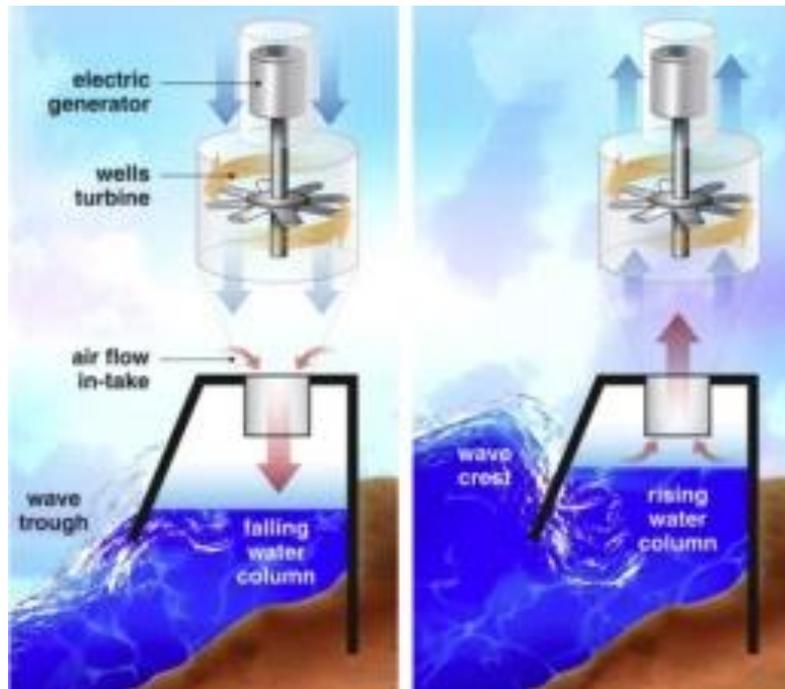


**Figura 1.6 Sistema de conversión Pendular**  
Fuente: [WavePower, 2006]

#### 1.4.4.4 COLUMNA DE AGUA OSCILANTE (OWC)

Un sistema bajo el principio OWC consta de dos elementos clave: una cámara de captación, que toma energía de las olas y la transfiere al aire dentro de una cámara, y un sistema de toma de fuerza (PTO), que convierte la energía

neumática en electricidad o alguna otra forma utilizable. La presión en el colector se presuriza alternativamente a medida que aumenta la columna de agua y se expande a medida que cae la columna de agua impulsando una turbina.

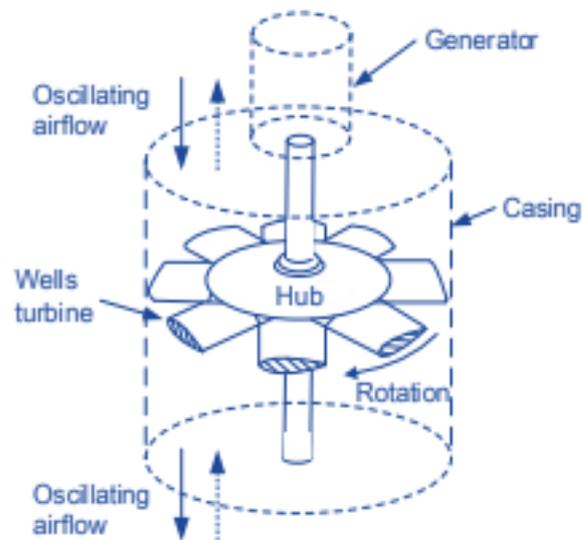


**Figura 1.7 Sistema Oscillating Water Column**  
Fuente: Fuente: [Energiadelmar, 2013]

El concepto de columna de agua oscilante (OWC) es un nuevo concepto de estudio para extraer energía de las olas del océano. Generalmente son estructuras huecas, parcialmente sumergidas, abiertas al lecho marino por debajo de la línea de flotación.

#### 1.4.5 Turbina Wells

La turbina Wells fue desarrollada por Dr. A. A. Wells in 1976, una turbina caracterizada por girar en una sola dirección en un flujo de aire oscilante. Se trata de un tipo de turbina con perfiles alares simétricos con su eje de simetría. De acuerdo con estudios, la turbina de Wells tiene desventajas como: baja eficiencia a alto coeficiente de flujo y alto nivel de ruido.



**Figura 1.8 Turbina Wells**  
Fuente: [Shinya, 2013]

Desarrolladas para plantas de energía undimotriz basadas en OWC, informes han probado que, hasta la fecha, la eficiencia promedio de conversión de energía en plantas undimotriz fueron menores al 30%. Es considerada una turbina simple, y económica para la conversión de energía de las olas.

# CAPÍTULO 2

## 2. METODOLOGÍA

En el presente proyecto se tiene como objetivo diseñar un prototipo de generación de energía oscilo-undimotriz, donde se aprovecha el movimiento oscilatorio de las olas para formar una columna de aire en una cámara de captura y a través de una turbina de aire que se encuentra acoplada a un sistema de transmisión de potencia convertir la energía potencial de las olas en energía mecánica.

El diseño del sistema se encuentra separado en dos secciones:

- Diseño de Turbina
- Diseño de Sistema de Transmisión de Potencia

Para la fabricación del sistema de conversión oscilo-undimotriz se debe tener en consideración las condiciones exteriores e interiores a las que se someterá el dispositivo para pruebas de eficiencia, el costo de materiales, tipo de manufactura para su construcción.

### 2.1 Requerimientos de diseño

El sistema de conversión oscilo-undimotriz será utilizado como instrumento de laboratorio para estudios correspondientes a energía undimotriz, donde se requiere:

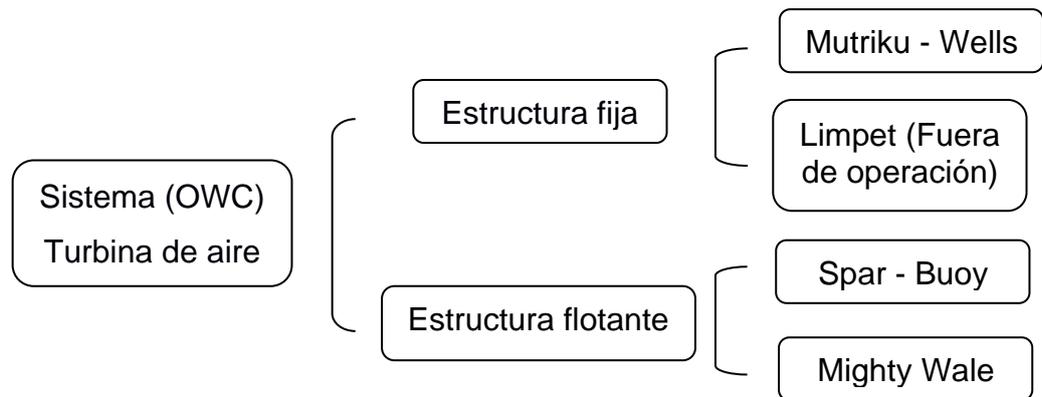
- Diseño económico.
- Diseño eficiente que permita aprovechar la máxima energía posible.
- Diseño seguro que no existan riesgos a la salud para el estudiante.
- Diseño didáctico que garantice el estudio de los conceptos de energía undimotriz.

### 2.2 Descripción general de alternativas

En la selección de posibles alternativas para el diseño del prototipo oscilo-undimotriz, se estudian diferentes patentes para sistemas de conversión de

columna de agua oscilante, generalmente clasificados por estructuras de anclaje, y tipos de turbinas.

El objetivo principal es lograr una configuración adecuada de una turbina que permita desarrollar un prototipo de alta eficiencia, asegurando un sistema funcional, estable y ligero. En la figura 2.1 se muestran los tipos de convertidores de energía undimotriz basados en su estructura de acuerdo a características técnicas y ubicación.



**Figura 2.1 Tipos de convertidores OWC**  
**Fuente: [Elaboración propia]**

En casos preliminares basados en diseño de turbinas eficientes para sistemas (OWC), se encuentran los sistemas de estructura fija con turbinas de tipo axial que si bien son altamente eficientes requieren de dos turbinas lo que representará un alto costo de fabricación.

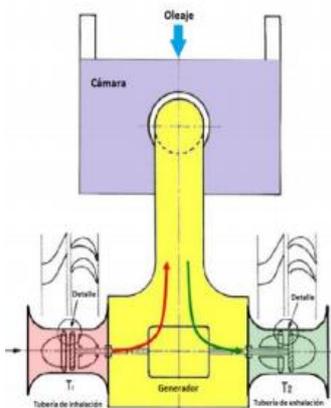
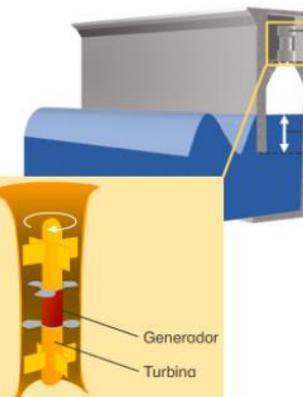
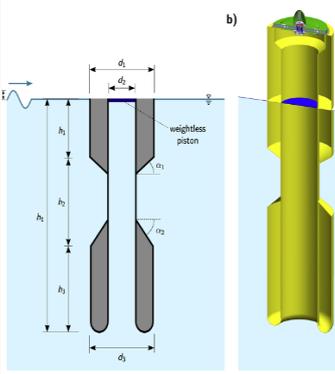
En estructuras fijas OWC se encuentra la convencional turbina Wells, característica por su tipo de operación que gira independiente de la dirección del flujo, lo que permite un mayor aprovechamiento de energía con la desventaja que presenta bajos niveles de eficiencia en comparación a las de tipo axial.

### **2.2.1 Selección de Alternativas**

Basados en criterios técnicos de tipos de turbinas utilizadas en sistemas de columna de agua oscilante (OWC), se han seleccionado

tres alternativas en etapa de estudios e implementadas a escala comercial que se muestran en la siguiente carta morfológica:

**Tabla 2.1 Carta Morfológica**

	ALTERNATIVA A	ALTERNATIVA B	ALTERNATIVA C
<b>TURBINA</b>	<b>Axial</b>	<b>Wells</b>	<b>Wells</b>
<b>ESTRUCTURA</b>	<b>Estructura Fija</b>	<b>Estructura Fija</b>	<b>Estructura Flotante - Amarrado</b>
<b>FIGURA</b>	 <p>Fuente: (Jayanshakar, 2010)</p>	 <p>Fuente: (ZhenLiu, 2014)</p>	 <p>Fuente: (Henriquez, 2016)</p>
<b>DESCRIPCIÓN</b>	<p>Sistema de dos turbinas, donde la cámara de aire se encuentra acoplada a un ducto circular, el cual se bifurca en forma de T, donde se encuentran las turbinas axiales, que funcionan independientemente.</p> <p>Cuando la columna de aire asciende, el cambio de presión dentro de la cámara acciona la turbina de color verde, y cuando la columna desciende acciona la segunda turbina.</p>	<p>Es una turbina de baja presión. Cuenta con perfiles alares, simétricos con el objetivo de generar el movimiento rotacional en una sola dirección.</p> <p>Es utilizado comúnmente en dispositivos de columna de agua oscilante.</p> <p>La eficiencia alcanzada por la turbina Wells es menor a las turbinas convencionales, esto es debido a la posición de los perfiles donde se presenta un coeficiente de arrastre alto.</p>	<p>El dispositivo OWC de conducto coaxial consiste en un sistema de turbina de aire birradial que es impulsada por la diferencia de presión entre la cámara de aire y la atmósfera.</p> <p>Se trata de un dispositivo asimétrico que consiste básicamente en un tubo de cola vertical sumergido, fijado a un flotador asimétrico que oscila.</p> <p>El flujo de aire desplazado por el movimiento del agua dentro del tubo impulsa una turbina de aire autorrectificadora.</p>

Fuente: [Elaboración propia]

## 2.3 Método de matriz de decisión

El método de matriz de decisión es una herramienta cualitativa utilizada para definir criterios de diseño, ponderarlos y sumar adecuadamente los criterios ponderados para dar una clasificación relativa entre las alternativas de diseño, que como resultado permite seleccionar la mejor alternativa.

### 2.3.1 Criterios de Diseño

Los criterios de evaluación para el análisis multicriterio son los siguientes:

- **Costo:** Estima los costos de materiales, fabricación y mano de obra del prototipo.
- **Eficiencia:** Considera el máximo aprovechamiento de la energía de la ola.
- **Factibilidad:** Se refiere a la disponibilidad de los recursos necesarios como: Materiales, Máquinas herramientas, Software para llevar a cabo el desarrollo del prototipo.
- **Seguridad:** Se refiere a los riesgos de operación, condiciones de seguridad a los que pueden exponerse los estudiantes, y profesores.
- **Instalación:** Considera la dificultad de ensamble de los elementos e instalación en la plataforma del banco de pruebas.

### 2.3.2 Ponderación de Criterios

Con el objetivo de establecer la ponderación de los criterios de diseño de acuerdo a la importancia en el proceso de diseño, se genera una matriz de ponderación comparativa entre cada criterio que se muestra en la tabla 2.2

Se compara la importancia del criterio de la columna con el criterio de la fila en un rango de 0,70 – 1,30, donde:

0,70 = El criterio de la fila es menos significativo que el de la columna

1,00 = El criterio de la fila es igual de significativo que el de la columna  
 1,30 = El criterio de la fila es más significativo que el de la columna

**Tabla 2.2 Matriz de ponderación**

MATRIZ DE PONDERACIÓN	COSTO	OPERATIVIDAD	FACTIBILIDAD	SEGURIDAD	INSTALACIÓN	TOTAL	PONDERACIÓN (%)
<b>COSTO</b>	1,00	1,10	1,10	1,40	1,30	<b>5,90</b>	<b>24%</b>
<b>EFICIENCIA</b>	0,90	1,00	1,05	1,20	1,15	<b>5,30</b>	<b>21%</b>
<b>FACTIBILIDAD</b>	0,85	0,90	1,00	1,10	1,10	<b>4,95</b>	<b>20%</b>
<b>SEGURIDAD</b>	0,80	0,85	0,95	1,00	1,05	<b>4,65</b>	<b>19%</b>
<b>INSTALACIÓN</b>	0,70	0,70	0,90	0,90	1,00	<b>4,20</b>	<b>16%</b>
<b>TOTAL</b>						<b>25,0</b>	<b>100%</b>

Fuente: [Elaboración propia]

De esta manera quedan cuantificados las ponderaciones de cada criterio de acuerdo a la importancia de los requerimientos de diseño:

- El **costo** con un 24% representa al criterio con mayor importancia, para la construcción del prototipo por manufactura aditiva se requiere un diseño económico, y con la menor cantidad de piezas posibles.
- El criterio de **eficiencia** representa al 21%, siendo el segundo criterio de mayor importancia debido a la necesidad de diseñar un prototipo eficiente y funcional.
- La **factibilidad** comprende al 20%, donde se prioriza un diseño viable en recursos materiales, e informáticos.
- La **seguridad** representa al 19%, debido a que se requiere un diseño seguro para precautelar la integridad física de los profesores, y estudiantes.
- El criterio de **instalación** con un 16% comprende la facilidad de ensamble e instalación del diseño en el banco de pruebas, donde se prioriza una alternativa que se ajuste a los requerimientos de diseño.

Para la selección de la mejor alternativa, se ha establecido un rango de evaluación del 1 al 10, de la siguiente manera:

- Poco importante = 1
- Medio importante = 5
- Muy importante = 10

Valores que han sido multiplicados con la ponderación específica (%) de cada criterio de diseño.

La alternativa que presenta la puntuación más alta, resulta la opción más viable para el desarrollo del proyecto.

### 2.3.3 Matriz de Decisión

Se genera una matriz de decisión basada en valoraciones relativas de cada alternativa en relación a cada uno de los criterios de diseño:

**Tabla 2.3 Matriz de decisión para selección de alternativa**

MATRIZ DE DECISIÓN		PONDERACIÓN	ALTERNATIVAS					
			ALTERNATIVA I		ALTERNATIVA II		ALTERNATIVA III	
			EVALUACIÓN	POND. EV	EVALUACIÓN	POND. EV	EVALUACIÓN	POND. EV
CRITERIOS	COSTO	24%	3	0,72	5	1,20	4	0,96
	EFICIENCIA	21%	7	1,47	6	1,26	4	0,84
	FACTIBILIDAD	20%	2	0,40	7	1,40	3	0,60
	SEGURIDAD	19%	4	0,76	7	1,33	6	1,14
	INSTALACIÓN	16%	4	0,64	5	0,80	3	0,48
TOTAL		100 %		3,98		6,00		4,02

Fuente: [Elaboración propia]

**Alternativa I:** Alternativa de alto costo de fabricación (dos turbinas axiales), prototipo eficiente, con limitaciones en la obtención de dos turbinas que se ajusten a los requerimientos, medianamente segura y no se ajusta al espacio físico disponible.

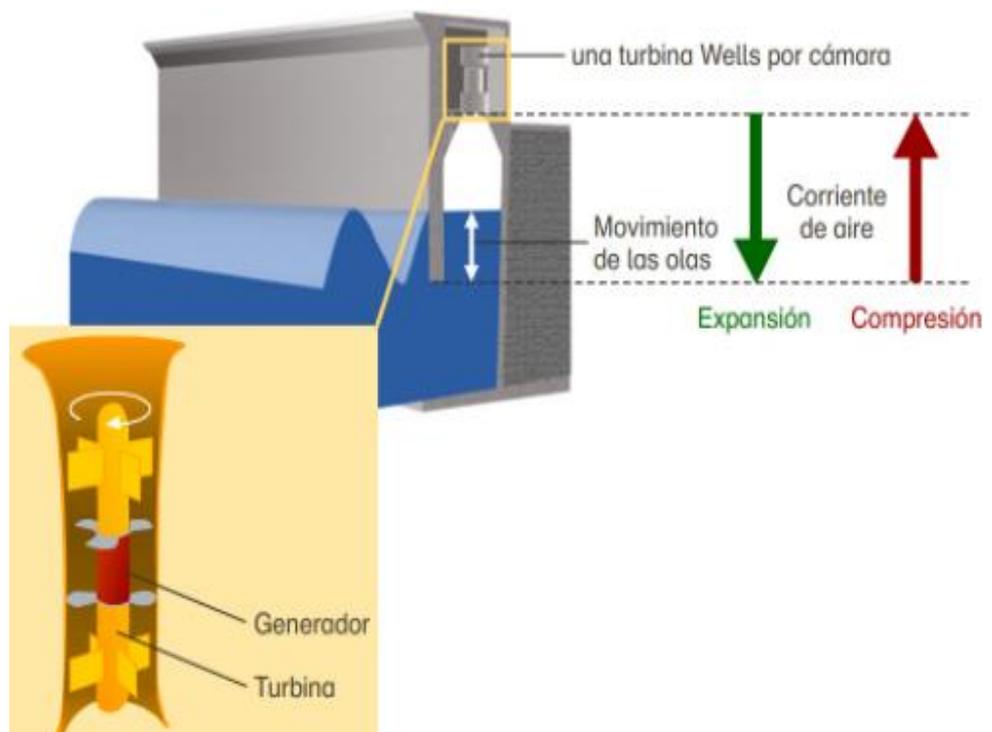
**Alternativa II:** Alternativa de mediano costo de implementación, con baja eficiencia dada por la turbina tipo Wells, prototipo accesible en recursos, permite una segura y fácil operación.

**Alternativa III:** Alternativa de alto costo de fabricación por la estructura flotante, limitado en recursos materiales, y no se ajusta al banco de pruebas.

El análisis multicriterio determina que, basados en las valoraciones asignadas a cada criterio de diseño, la **Alternativa II** es la que mejor corresponde a las expectativas del proyecto.

## 2.4 Diseño de forma

### 2.4.1 Alternativa Seleccionada: Sistema OWC



**Figura 2.2 Sistema OWC – Turbina Wells**  
Fuente: [(ZhenLiu, 2014)]

## **2.4.2 Especificaciones de Diseño**

El sistema de conversión de energía undimotriz está configurado por los siguientes sistemas basados en los requerimientos establecidos:

### **Cámara de aire**

Se capta la energía potencial de una ola por medio de un sistema de columna oscilante de agua, en donde se tiene una cámara de aire formada por el nivel del agua que oscila de acuerdo a la energía de la ola.

### **Sistema de Turbina**

Para máximo aprovechamiento de la energía entregada por la ola, es necesaria una turbina Wells impulsada por el cambio de presión dentro de la cámara de aire, en compresión cuando sube el nivel del agua y expansión cuando baja.

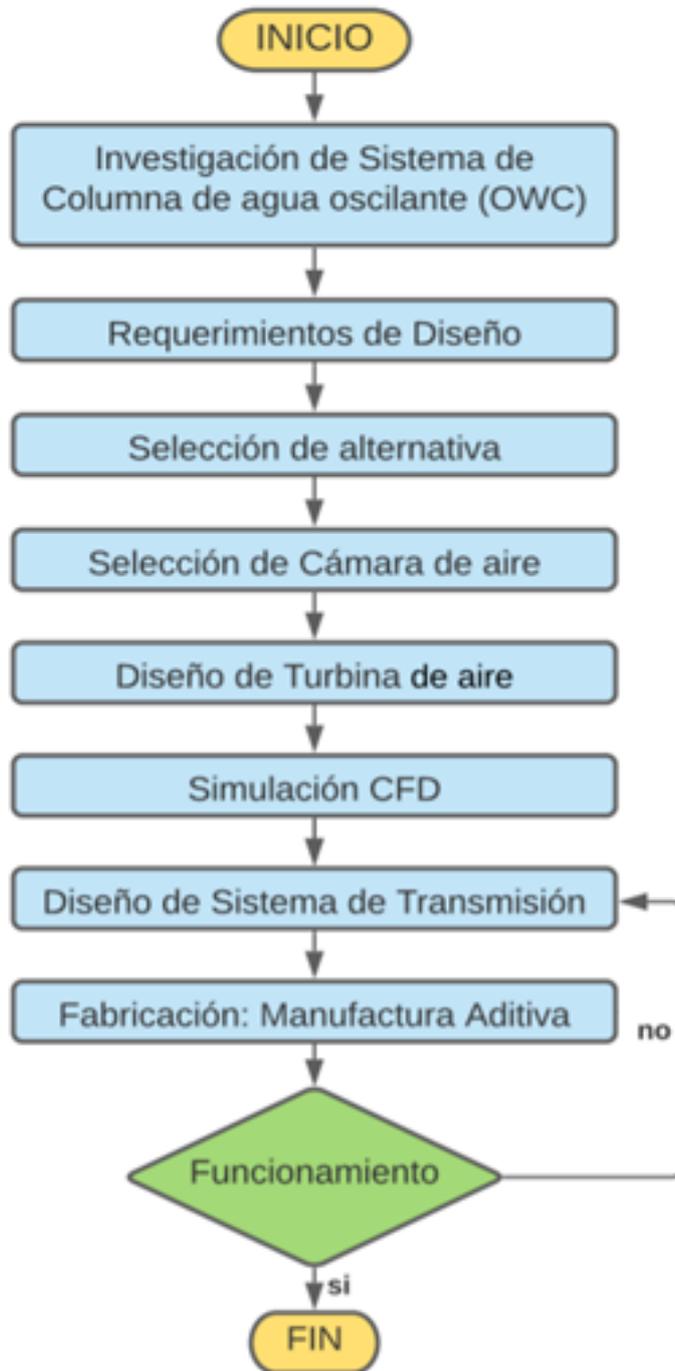
### **Sistema de Transmisión de Potencia**

El movimiento generado por el rotor de la turbina es transmitido por un sistema de engranes cónicos que cambian la dirección del eje de transmisión permitiendo obtener un eje de salida perpendicular a la posición del eje del rotor.

## **2.5 Flujo Metodología**

El sistema de conversión de energía oscilo-undimotriz tiene como bases de partida los requerimientos de prueba del prototipo, donde se tiene un banco de generación de olas de características específicas.

Con los parámetros establecidos, se diseña la cámara de aire con el máximo aprovechamiento de energía. A continuación, se diseña una turbina Wells de alta eficiencia, que se adapte a los requerimientos de espacio físico disponible. Para una correcta transmisión de potencia, se diseña un sistema de engranes que permiten una salida de potencia al sistema por medio de un eje de 8mm de diámetro.

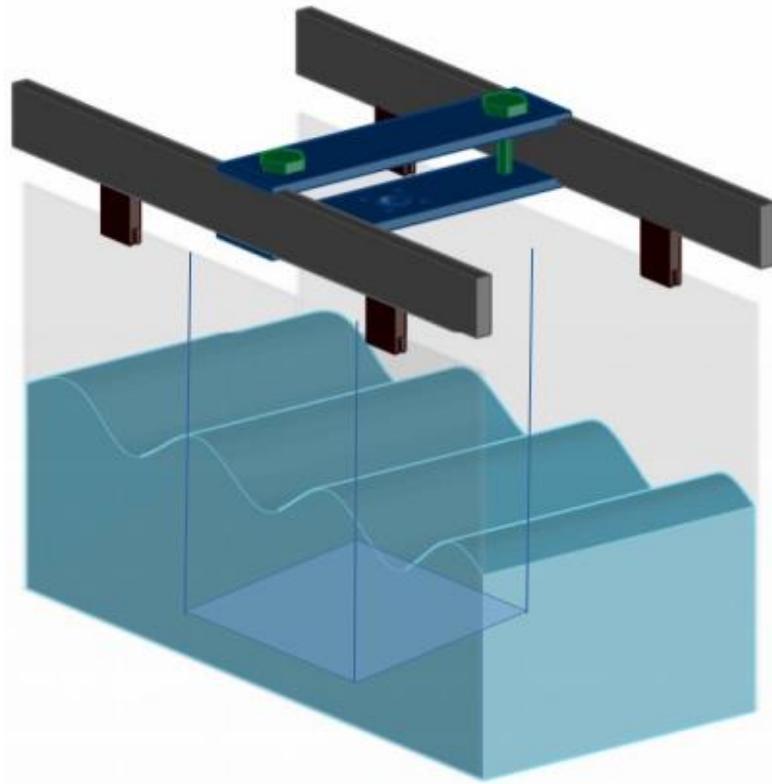


**Figura 2.3 Diagrama de Flujo de metodología del proyecto**  
 Fuente: [Elaboración propia]

### 2.5.1 Diseño conceptual y Requerimientos de diseño

El sistema de conversión de energía es un sistema de captación de energía que basa su funcionamiento en el impulso de una turbina Wells a través de una cámara de aire.

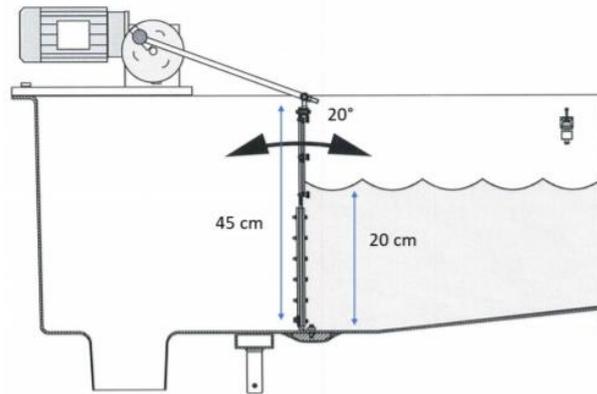
De acuerdo a los requerimientos de diseño, donde se busca desarrollar un prototipo para la conversión de energía undimotriz que permita ser acoplado al canal del banco generador de olas para pruebas de funcionamiento, y medición de eficiencia mecánica como se muestra a continuación:



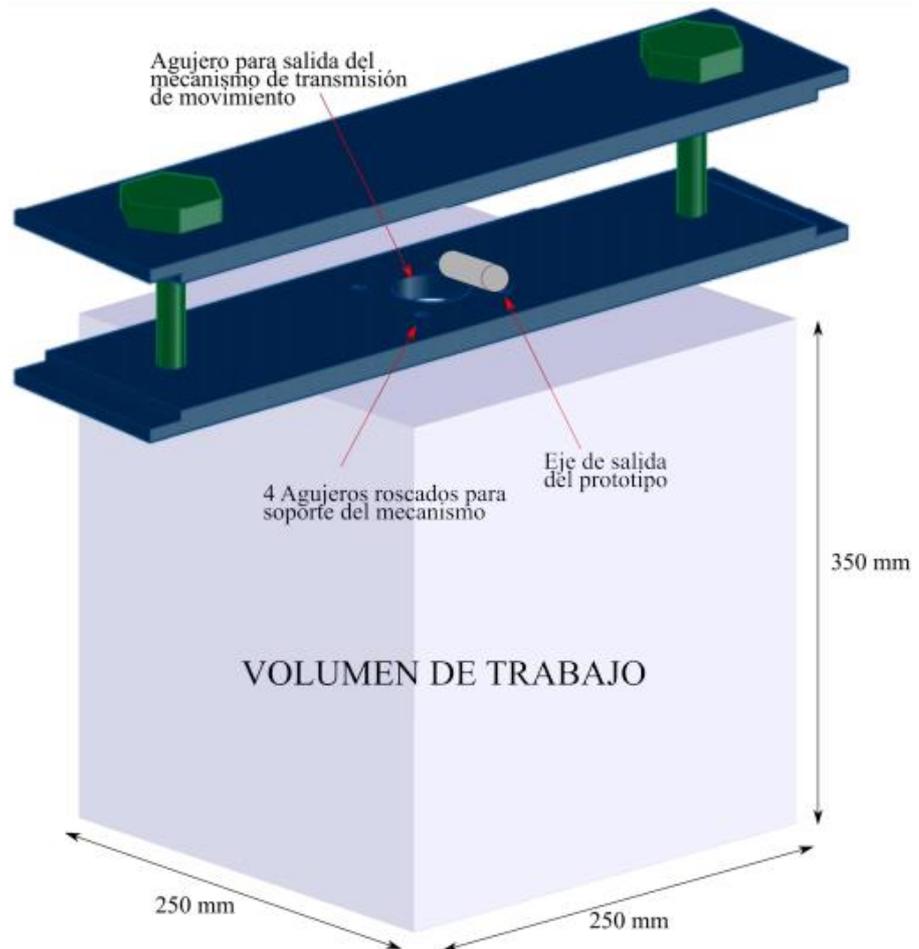
**Figura 2.4 Diseño conceptual canal de generador de olas**  
Fuente: [Parámetros de dispositivos de aprovechamiento undimotriz, ESPOL]



**Figura 2.5 Banco generador de olas**  
Fuente: [Laboratorio de Hidráulica, ESPOL]



**Figura 2.6 Sistema motriz para generación de olas**  
 Fuente: [Parámetros de dispositivos de aprovechamiento undimotriz, ESPOL]

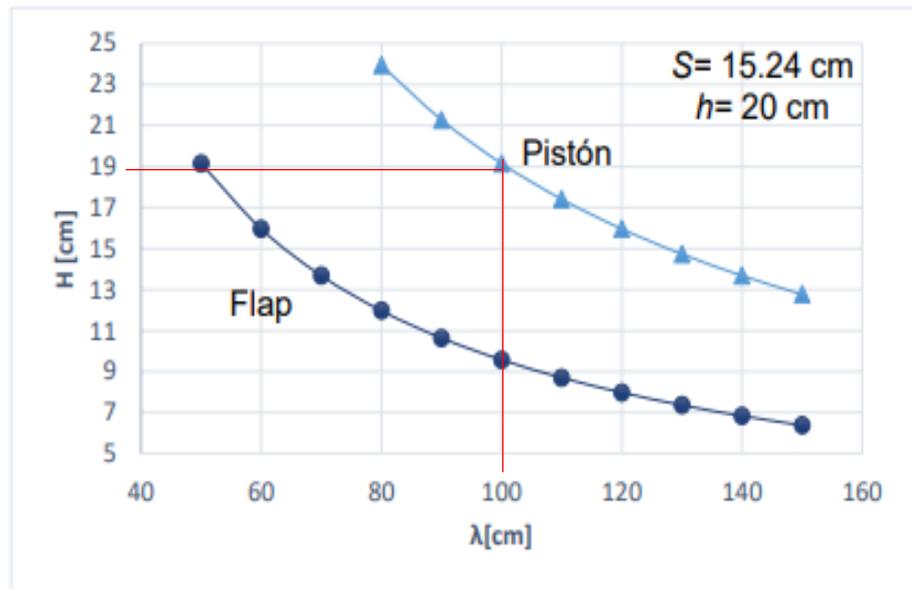


**Figura 2.7 Espacio físico disponible para sistema de conversión undimotriz**  
 Fuente: [Parámetros de dispositivos de aprovechamiento undimotriz, ESPOL]

Se observa el volumen de trabajo donde se acoplará el prototipo, el cual no debe exceder de estos límites: **250 x 250 x 350 mm<sup>3</sup>**

## 2.5.2 Potencia energética de la ola

De acuerdo a la teoría de generación de olas aplicada al diseño del generador de olas (Castillo, 2018), se obtuvo la gráfica de Altura de la ola (H) vs. Longitud de onda (cm) a una profundidad de agua  $h=20\text{cm}$  y frecuencia (f) de 1 Hz.



**Gráfica 2.1 Relación de teoría de generación aplicada**  
Fuente: (Castillo, 2018)

Se ha seleccionado la longitud de onda 100 cm y a una altura (h) 19 cm con una frecuencia de oscilación del pistón de 1Hz.

Para determinar la potencia energética que se puede obtener del movimiento de las olas, primero se determina la potencia de la ola cuando choca con una pared de acuerdo a la ecuación 2.1

$$\frac{P}{m} = \frac{\rho g^2 h^2 T}{32 \pi} \quad (2.1)$$

$$\frac{P}{m} = \frac{(1025 \text{ kg/m}^3) (9.8 \text{ m/s}^2)^2 (0.19\text{m})^2 (1\text{s})}{32 \pi}$$

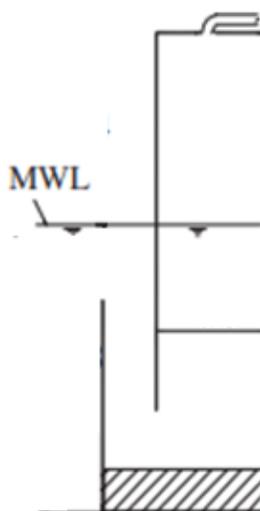
$$\frac{P}{m} = 35.35 \left[ \frac{W}{m} \right]$$

### 2.5.3 Diseño de Cámara de aire

Con la finalidad de dimensionar la cámara de aire basados en el estudio de Caisson breakwaters embodying an OWC with a small opening, donde se realiza un convertidor de rompeolas que puede absorber mucha energía de las olas gracias a una gran amplificación de la altura de las olas. Gracias a esta amplificación, el coeficiente de absorción promedio de todos registros de oleajes fue de alrededor del 60%, y en algunos registros alcanzó el 100%.

Bajo ciertas condiciones del mar, la amplitud de las olas crece con respecto a la amplitud en un rompeolas convencional, a pesar de absorber una gran cantidad de energía.

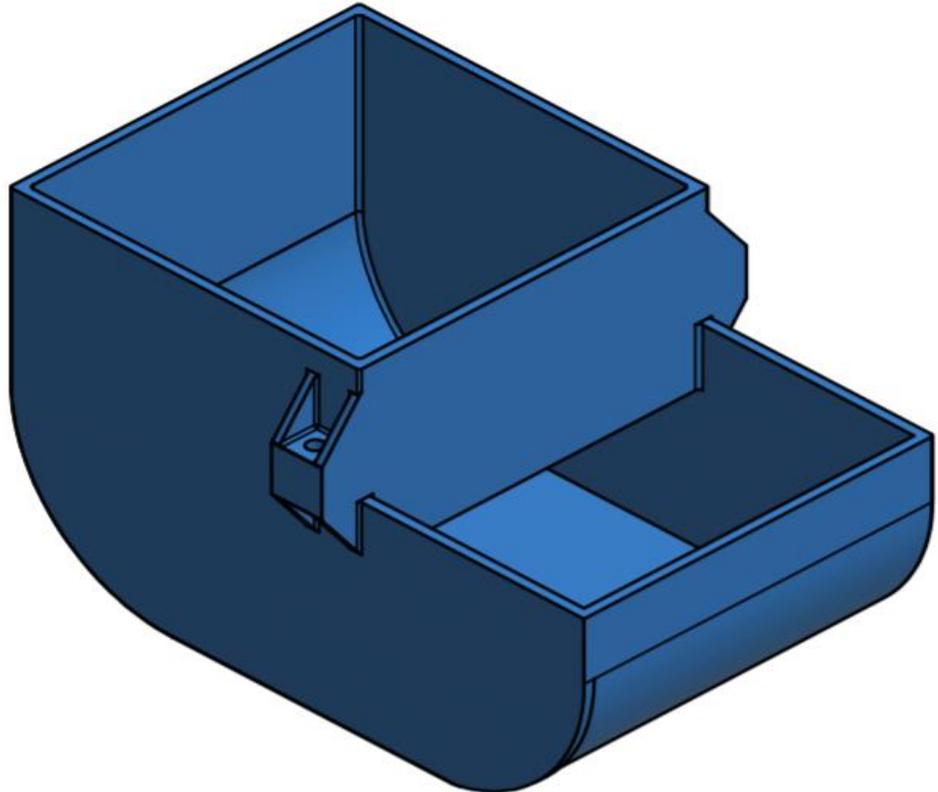
La explicación es que una gran concentración de energía de las olas debería estar confinada dentro de un área que no puede expandirse (o se expande muy lentamente) hacia el mar abierto. (Boccotti, 2006)



**Figura 2.8 Diseño del rompeolas-convertidor en el Estrecho de Messina**  
Fuente: [Boccotti, 2006]

Dado el espacio por debajo del prototipo es aproximadamente 250 mm hasta llegar al contacto con el eje neutro de las olas, y la altura máxima disponible es de 350 mm.

Con el objetivo de direccionar el flujo de agua que entra en la cámara y aprovechar la máxima altura de columna de agua dentro de la misma, se considera como referencia geométrica la cámara de Bocotti (Figura 2.8). Dimensionada la cámara como se muestra en la figura 2.9



**Figura 2.9 Diseño conceptual de cámara de captación**  
Fuente: [Elaboración propia]

#### **2.5.4 Diseño de Turbina Wells**

La turbina Wells, se caracteriza por operar con flujo de aire bidireccional y de bajo caudal generado por el movimiento de las olas. Las características aerodinámicas permiten que gire en una sola dirección, independientemente de la dirección del flujo de aire.

Con el objetivo de desarrollar un prototipo a escala, se estudia el comportamiento de la turbina bajo requisitos de partida. Priorizando el menor costo posible se realizará un prototipo de baja potencia que

permita obtener resultados con números adimensionales. (Xavier Salueña Berna, 2015).



**Figura 2.10 Caída de presión de turbina Wells en un ducto**  
Fuente: (Xavier Salueña Berna, 2015).

Si  $P_1$  y  $P_2$  son las presiones de los puntos situados antes y después de la turbina,  $U_1$  y  $U_2$  las velocidades del aire correspondientes,  $\rho$  la densidad del aire y  $\Delta P$  la caída de presión, el Teorema de Bernoulli establece la siguiente relación (Xavier Salueña Berna, 2015) :

$$P_1 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 + \Delta P \quad (2.2)$$

De donde se obtiene los parámetros necesarios para determinar la potencia total y útil generada por la turbina Wells.

Se determina la potencia total por medio de la ecuación (2.3), siendo  $Q$  el caudal de aire y  $\Delta P$  la caída de presión entre el punto 1 y punto 2.

$$W_{TOTAL} = Q \Delta P [W] \quad (2.3)$$

La potencia útil se expresa mediante la ecuación (2.4), donde  $\omega$  es la velocidad angular y T el par de torsión (W.K.Tease, 2007).

$$W_{\acute{U}TIL} = \omega T [W] \quad (2.4)$$

El rendimiento de una turbina está determinado por la relación entre la potencia útil y la potencia total, como se expresa en la ecuación (2.5).

$$\eta = \frac{W_{\acute{U}TIL}}{W_{TOTAL}} \quad (2.5)$$

$$\eta = \frac{\omega T}{Q \Delta P}$$

#### 2.5.4.1 Diseño de perfil alar

Se realiza un estudio para seleccionar la forma del perfil de las aspas de la turbina de aire y la dimensión del rotor para las condiciones requeridas.

Los perfiles NACA son una serie de perfiles que fueron desarrollados por la National Advisory Committee for Aeronautics para describir la nomenclatura general de un perfil alar, sus diferencias geométricas y su valoración aerodinámica, a fin de resaltar la importancia de los estudios realizados por NACA para el beneficio de la industria aeronáutica. (Pinzon, 2013).

Se clasifican según sus características, a continuación, se presenta la descripción de dicha nomenclatura:



**Figura 2.11 Nomenclatura de un perfil NACA**  
 Fuente: [Pinzón, 2013]

Primer dígito describe la curvatura máxima como porcentaje de la cuerda (%C).

Segundo dígito describe la distancia de máxima curvatura desde el borde de ataque  $3/10$  del porcentaje de la cuerda.

Los últimos dígitos describen el máximo espesor como % de la cuerda.

Los álabes tienen como función extraer la energía que ese encuentra disponible del flujo de aire. La turbina Wells es caracterizada por contar con álabes simétricos con respecto a su eje. Para un ángulo de ataque cero ( $0^\circ$ ), el coeficiente de sustentación es cero debido a la simetría del perfil.

Se pre seleccionan perfiles NACA utilizados usualmente para el diseño de turbinas Wells, perfiles de características simétricas como se muestran en la tabla 2.4 son analizados para obtener el perfil que se ajuste a los requerimientos de diseño.

Para obtener las especificaciones de cada perfil se obtienen las gráficas de coeficiente de sustentación vs coeficiente de arrastre del software Airfoil Tools que permite escoger un perfil aerodinámico, dimensionarlo en base a requerimientos y obtener parámetros del perfil alar.

En la Tabla 2.4 se muestran los valores de coeficientes aerodinámicos obtenidas de (AirfoilTools, 2020) para un  $Re = 1 \times 10^5$ .

**Tabla 2.4 Relación de perfiles aerodinámicos NACA**

ESPECIFICACIONES AERODINÁMICAS DE PERFILES NACA	NACA 0015	NACA 0021	NACA 0024
ÁNGULO DE ATAQUE [ $\alpha$ ]	6,25°	7°	8°
COEFICIENTE DE SUSTENTACIÓN [ $C_L$ ]	0,77	0,9	0,93
COEFICIENTE DE ARRASTRE [ $C_D$ ]	0,033	0,035	0,043
$C_L - C_D$	0,74	0,86	0,89
$\frac{C_L}{C_D}$	24,7	<b>25,2</b>	21,6

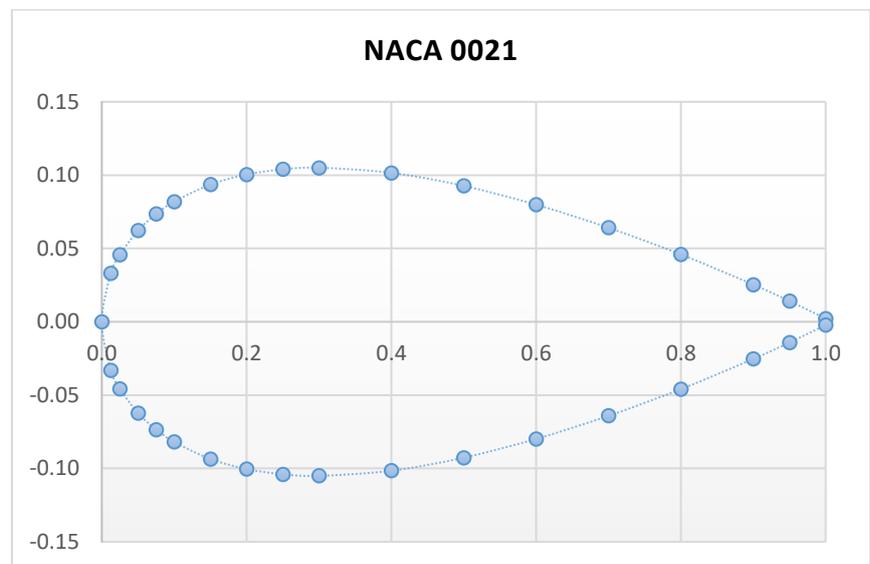
Fuente: [Elaboración propia]

Se selecciona un perfil NACA con un ángulo de ataque entre 6° y 13°, donde el flujo de aire ejerce una fuerza para generar el movimiento rotacional de la turbina [Salmena,2018].

El perfil que se ajusta es: **NACA 00 21**

Perfil simétrico: (00)

Máximo espesor: 21% de la cuerda al 0.3 C

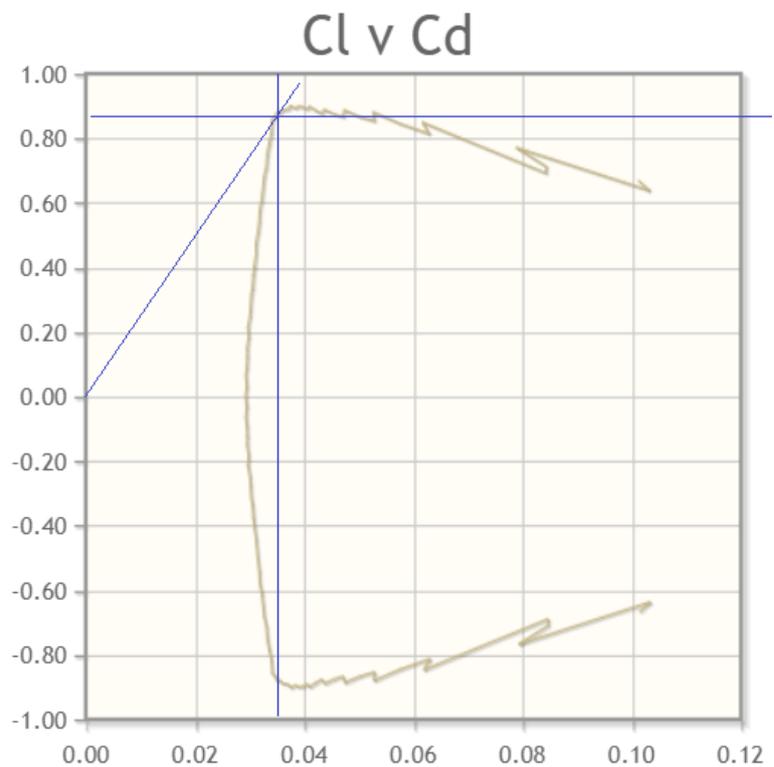


**Figura 2.12 Perfil alar NACA 0021**

Fuente: [Airfoil Tools, 2020]

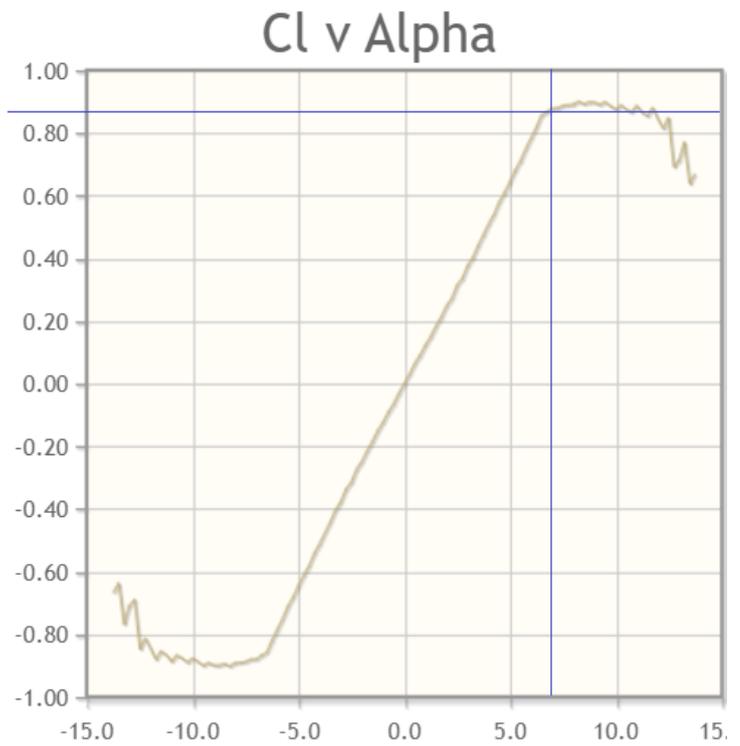
Para determinar los coeficientes aerodinámicos, se traza una línea tangente en la gráfica CL vs CD hasta la tangente de la curva la gráfica, tomando el valor de CL respectivo al punto de tangencia.

De la misma manera en la gráfica CL vs Alpha, se traza la línea recta desde el valor de CL previamente obtenido, hasta que se interseca con el respectivo valor de ángulo de ataque Alpha como se muestra en la gráfica 2.2, 2.3, 2.4 y 2.5 a continuación:

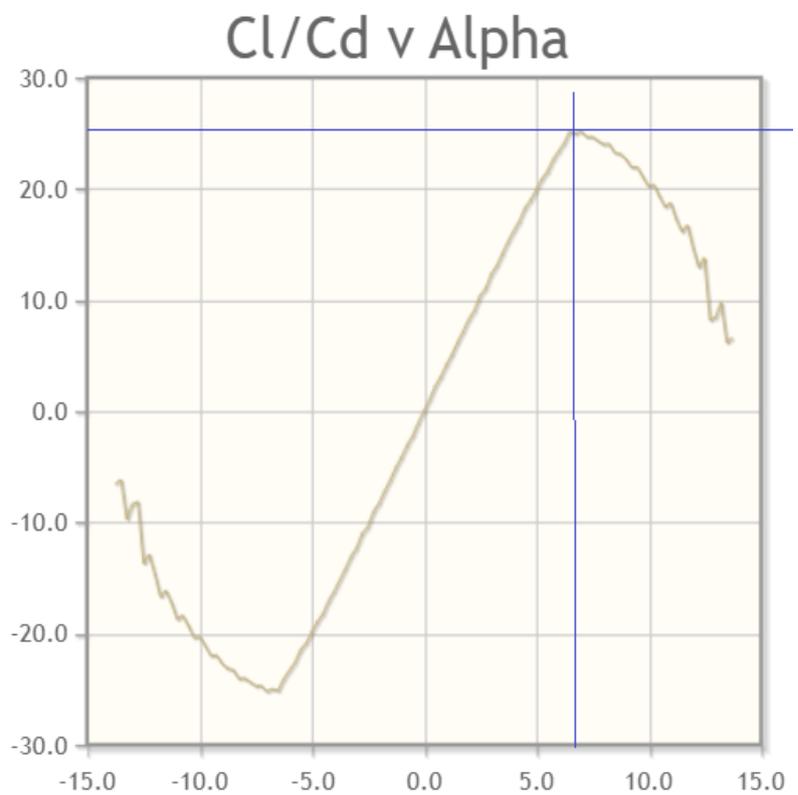


**Gráfica 2.2 Cl vs Cd [NACA 0021]**

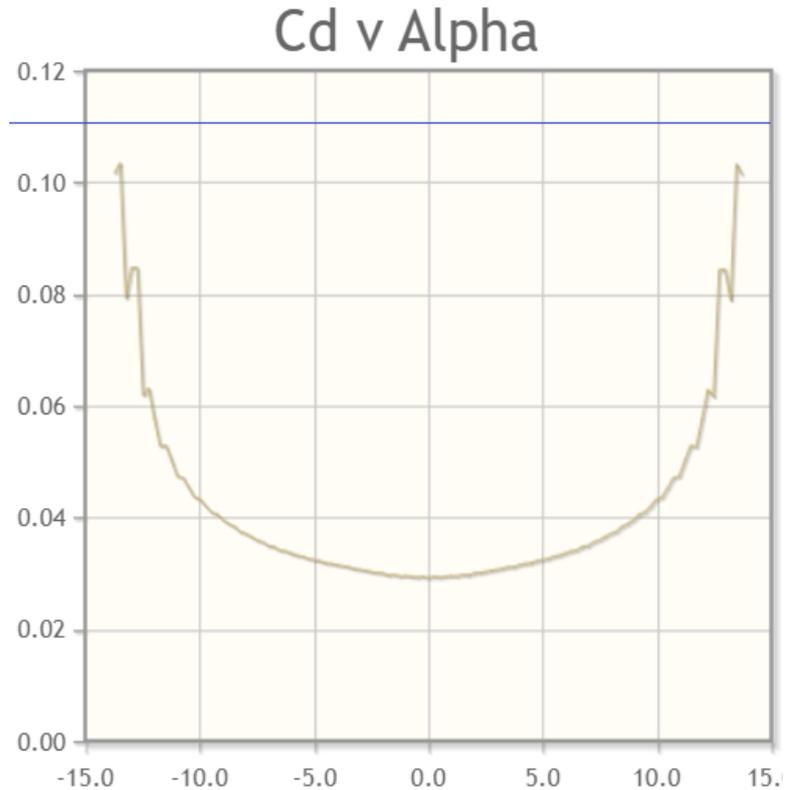
**Fuente: [Airfoil Tools, 2020]**



**Gráfica 2.3 Cl vs Alpha [NACA 0021]**  
**Fuente: [Airfoil Tools, 2020]**



**Gráfica 2.4 Cl/Cd vs Alpha [NACA 0021]**  
**Fuente: [Airfoil Tools, 2020]**



**Gráfica 2.5 Cd vs Alpha [NACA 0021]**  
**Fuente: [Airfoil Tools, 2020]**

**Diámetro exterior de la turbina:**

Basado en la dimensión del ducto circular que da soporte a la turbina Wells, donde se tiene 52 mm de diámetro interior. Se ha seleccionado el diámetro exterior de la turbina:

$$d_e = 50 [mm] \quad r_e = 25 [mm]$$

**Número de álabes:**

Se ha determinado que el número de álabes de la turbina Wells es:

$$B = 3$$

**Ángulo de distribución de los álabes:**

$$\theta = \frac{360^\circ}{3} \tag{2.6}$$

$$\theta = 120^\circ$$

### **Solidez de turbina:**

La solidez se encuentra definida como la relación entre el área proyectada por los álabes y el área total de barrido descrita por la turbina en movimiento rotacional. Es un número adimensional el cual permite determinar la geometría de la turbina Wells. Con el objetivo de evitar el fenómeno "Crawling", se opta por un valor que garantiza el arranque de la turbina a bajas velocidades de flujo de aire. (González, 2010)

$$\sigma = 0,5$$

### **Diámetro interior de la turbina:**

$$\sigma = \frac{r_e}{r_i} \quad ; \quad r_i = \sigma r_e \quad (2.7)$$

$$r_i = 12.5 [mm] \quad ; \quad d_i = 25 [mm]$$

### **Longitud de cuerda:**

La longitud de la cuerda comprende a la línea desde el borde de ataque con el borde de salida, y se determina con la ecuación (2.8)

$$C = \frac{\pi D_e \sigma}{B} \quad (2.8)$$

$$C = \frac{\pi (50) (0.5)}{3}$$

$$C = 20.9 [mm]$$

### **Máximo espesor:**

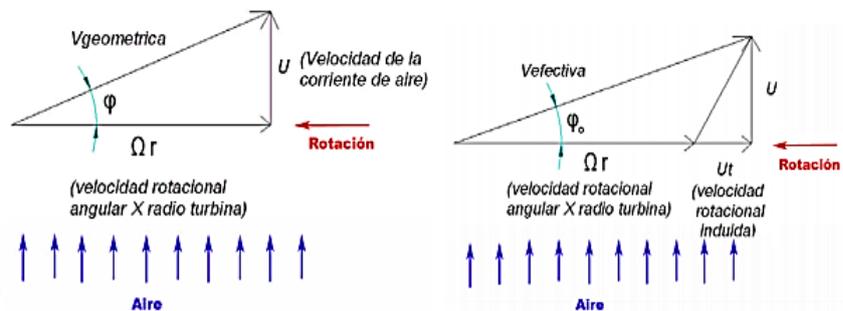
Para un perfil NACA 0021, el máximo espesor de curvatura representa al 21% de la cuerda a una distancia 3/10 desde el borde de ataque.

$$\text{Máx espesor} = 0,21 C$$

$$\text{Máx espesor} = 4,5 [mm]$$

### 2.5.4.2 Velocidades y fuerzas en turbina Wells

En la figura 21 se muestra el diagrama de velocidad ideal y real de la turbina Wells, donde se genera un momento en el rotor de la turbina que produce un cambio de dirección de la corriente de aire, esto ocurre través del espesor del disco provocando una componente de energía cinética rotacional también conocida como velocidad inducida (W.K.Tease, 2007).



**Figura 2.13 Diagrama de velocidades ideales y reales.**

Fuente: [Salueña, 2015]

El ángulo de ataque  $\alpha$ , está compuesto entre la cuerda geométrica del ala y la dirección de la velocidad de la corriente de aire, es el mismo que el formado por la bisectriz del ángulo de la velocidad efectiva VEFEC y la velocidad geométrica VGEOM.

La velocidad de fase de la ola obtenida en la ecuación (2.9):

$$V_{OLA} = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \left(9.8 \frac{m}{s^2}\right) (0,19)} \quad (2.9)$$

$$V_{OLA} = 1,93 \left[\frac{m}{s}\right]$$

Velocidad máxima del aire debajo de la turbina:

$$V_{AIRE} = 2,40 \left[\frac{m}{s}\right]$$

Por medio del triángulo de velocidades formado por las corrientes de aire que impulsan la turbina Wells (Figura 2.13), se obtiene la siguiente relación:

$$\tan^{-1} \alpha = \frac{V_{AIRE}}{V_{LINEAL} + V_{INDUCIDA}} \quad (2.10)$$

Donde:

$$V_{LINEAL} = \omega r_e \quad (2.11)$$

$$V_{INDUCIDA} = \frac{\Delta P}{2 \rho V_{LINEAL}} \quad (2.12)$$

De la ecuación (2.10) se despeja la velocidad lineal, expresada en la siguiente ecuación:

$$V_{LINEAL} = \frac{V_{AIRE}}{\tan \alpha} - V_{INDUCIDA} \quad (2.13)$$

$$\omega r_e = \frac{V_{AIRE}}{\tan \alpha} - \frac{\Delta P}{2 \rho \omega r_e}$$

$$2 \rho r_e^2 \omega^2 - \frac{2 \rho r_e V_{AIRE}}{\tan \alpha} \omega + \Delta P = 0 \quad (2.14)$$

Donde:

$\rho = 1,225 \left[ \frac{kg}{m^3} \right]$	Densidad del aire
$r_e = 0,025 [m]$	Radio exterior de la turbina
$\alpha = 7^\circ$	Ángulo de ataque
$V_{AIRE} = 2,40 \left[ \frac{m}{s} \right]$	Velocidad del flujo másico de aire
$\omega = 1150 [rpm]$	Velocidad angular

Se obtienen:

$$\omega = 1150 [rpm] = 120,43 \left[ \frac{rad}{s} \right]$$

$$\Delta P = 121,97 [Pa]$$

$$V_{LINEAL} = \omega r_e = \left( 120,43 \frac{rad}{s} \right) (0,025 m) = \mathbf{3,01} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

$$V_{INDUCIDA} = \frac{\Delta P}{2 \rho V_{LINEAL}} = \frac{121,97 Pa}{2 \left( 1,225 \frac{kg}{m^3} \right) (3,01 \frac{m}{s})} = \mathbf{16,54} \left[ \frac{m}{s} \right]$$

### Número de Reynolds:

El número de Reynolds se clasifica en:

$$\begin{aligned} \text{Flujo Laminar:} \quad C_f &= \frac{1,33}{Re_L^{1/2}} & Re_L < 5 \times 10^5 \\ \text{Flujo Turbulento:} \quad C_f &= \frac{0,074}{Re_L^{1/5}} & 5 \times 10^5 \leq Re_L \leq 10^7 \end{aligned}$$

Se calcula el número de Reynolds con la ecuación (13):

$$Re_L = \frac{V_{AIRE} L}{\nu} \quad (2.15)$$

$$Re_L = \frac{(2,40 \frac{m}{s}) (0,2 m)}{(13,28 \times 10^{-6} \frac{m^2}{s})}$$

$$Re_L = \mathbf{0,36145 \times 10^5 Re}$$

$$Re_L < \mathbf{5 \times 10^5}; \text{ Flujo Laminar}$$

Donde:

$V$  = Velocidad del aire

$L$  = Longitud

$\mu$  = Viscosidad cinemática del aire

### Área de Rodete:

$$\dot{A}REA_{RODETE} = \pi (r_E)^2 \quad (2.16)$$

$$\dot{A}REA_{RODETE} = \pi (0,025)^2$$

$$\dot{A}REA_{RODETE} = \mathbf{0.00196 \text{ m}^2}$$

### Caudal:

$$\dot{Q} = V_{AIRE} A_{RODETE} \quad (2.17)$$

$$\dot{Q} = \left( 2,4 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right) (0,00196 \text{ m}^2)$$

$$\dot{Q} = 0,0047 \left[ \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] = \mathbf{4,70 \left[ \frac{\text{L}}{\text{s}} \right]}$$

### Potencia de flujo

Para aumentar o disminuir la presión hidrostática de un fluido incompresible con densidad definida, se modifica la altura de la columna.

$$P = \Delta P Q = (122 \text{ Pa}) \left( 0,0047 \frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right) \quad (2.18)$$

$$\mathbf{P = 5,73 [W]}$$

### Potencia útil:

$$P = \omega T \quad (2.19)$$

$$P = (120,43)(0,17)$$

$$\mathbf{P = 20,63 [W]}$$

### Eficiencia:

$$\eta = \frac{P_{\dot{U}TIL}}{P_{TOTAL}} = \frac{20,63}{0,57} \quad (2.20)$$

$$\mathbf{\eta = 15 \%}$$

### Velocidad Efectiva

$$V_{EFEC} = \sqrt{V_{AIRE}^2 + (V_{LINEAL} + V_{INDUCIDA})^2} \quad (2.21)$$

$$V_{EFEC} = \sqrt{V_{AIRE}^2 + \left(\omega r_e + \frac{\Delta P}{2 \rho V_{LINEAL}}\right)^2}$$

$$V_{EFEC} = \sqrt{(2,4)^2 + (3,01 + 16,54)^2}$$

$$V_{EFEC} = 19,7 \left[\frac{m}{s}\right]$$

### Ángulo de velocidad efectiva

$$\varphi_0 = \tan^{-1} \left( \frac{V_{AIRE}}{V_{LINEAL} + V_{INDUCIDA}} \right) \quad (2.22)$$

$$\varphi_0 = 7^\circ$$

### Velocidad Geométrica

$$V_{GEOM} = \sqrt{V_{AIRE}^2 + V_{LINEAL}^2} \quad (2.23)$$

$$V_{GEOM} = \sqrt{(2,4)^2 + (3,01)^2}$$

$$V_{GEOM} = 3,85 \left[\frac{m}{s}\right]$$

### Ángulo de velocidad geométrica

$$\varphi = \tan^{-1} \left( \frac{V_{AIRE}}{V_{LINEAL}} \right) \quad (2.24)$$

$$\varphi = 38,6^\circ$$

Las fuerzas sobre un perfil simétrico actúan independientes del valor del ángulo de ataque, sea este positivo o negativo efectuará un giro en una sola dirección, como se observa en la figura 2.14.

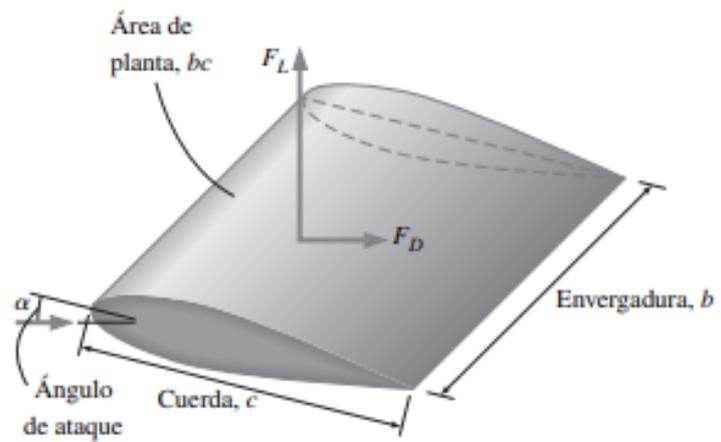


Figura 2.14 Características de un alabe en sustentación  
Fuente: (Cimbala, 2011)

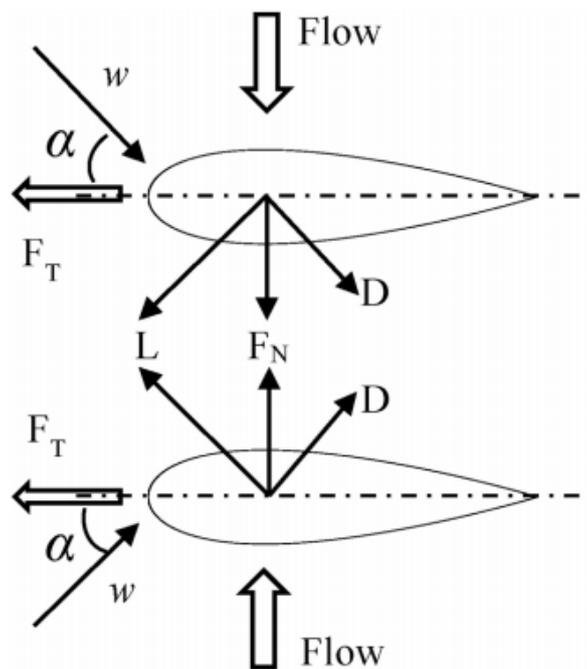


Figura 2.15 Diagrama de Fuerzas en el alabe de una Turbina Wells  
Fuente: [Salueña, 2015]

Donde:

$$T = (L \sin \alpha - D \cos \alpha) r \quad (2.25)$$

$$F_x = L \sin \alpha - D \cos \alpha \quad (2.26)$$

$$F_T = L \cos \alpha + D \sin \alpha \quad (2.27)$$

$F_X$  = Fuerza axial que varía la dirección en función del flujo del aire.

$F_T$  = Fuerza tangencial que ejerce la rotación del disco de la turbina.

La velocidad relativa sobre los álabes de la turbina genera las fuerzas aerodinámicas sobre el perfil, conocidas como:

#### **Fuerza de Sustentación:**

$$F_L = \frac{1}{2} C_L \rho V_{EFE}^2 A \quad (2.28)$$

$$F_L = \frac{1}{2} (0,9) (1,225) (19,7)^2 (0,0196)$$

$$F_L = 4,19 [N]$$

#### **Fuerza de Arrastre:**

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho V_{EFE}^2 A \quad (2.29)$$

$$F_D = \frac{1}{2} (0,035) (1,225) (19,7)^2 (0,0196)$$

$$F_D = 0,17 [N]$$

#### **Fuerza Axial:**

$$F_T = F_L \cos \alpha + F_D \sin \alpha \quad (2.30)$$

$$F_T = (4,19) \cos (7^\circ) + (0,17) \sin (7^\circ)$$

$$F_T = 4,17 [N]$$

#### **Fuerza Tangencial:**

$$F_X = F_L \sin \alpha - F_D \cos \alpha \quad (2.31)$$

$$F_X = (4,19) \sin (7^\circ) - (0,17) \cos (7^\circ)$$

$$F_X = 0,34 [N]$$

**Torque:**

$$\alpha = \frac{\varphi_0 + \varphi}{2} \quad (2.32)$$

$$\alpha = \frac{7 + 38,6}{2}$$

$$\alpha = 22,8^\circ$$

$$T = (F_L \sin \alpha - F_D \cos \alpha) r_e \quad (2.33)$$

$$T = ((4,19) \sin (22,8^\circ) - (0,17) \cos (22,8^\circ)) (0,025)$$

$$T = 0,017 \left[ \frac{N}{m} \right]$$

## 2.5.5 Diseño de Sistema De Transmisión

### 2.5.5.1 Requerimientos de diseño

Para el diseño de un eje de transmisión con requerimientos específicos se determina el diámetro requerido del eje utilizando teorías de fatiga. Criterios de diseño y asunciones:

- Se utilizan rodamientos de bolas rígidas en todos los soportes.
- Se considera el análisis como una viga en voladizo.
- La falla por fatiga debe considerarse en función de las cargas dinámicas.
- Factor de seguridad = 1,9

### 2.5.5.2 Cargas y Fuerzas

**Carga del viento:**

$$F_{VIENTO} = A \Delta P C_D \quad (2.34)$$

$$F_{VIENTO} = (0,0196 \text{ m}^2) (122 \text{ Pa}) (0,035)$$

$$F_{VIENTO} = 0,10 \text{ [N]}$$

### Par de torsión de la carga del viento:

$$T = 2 F_V r_e \quad (2.35)$$

$$T = 2 (0,10) (0,025)$$

$$T = 0.005 [N m]$$

### Peso de la turbina:

$$W_{TURBINA} = m_{TURBINA} * g \quad (2.36)$$

$$W_{TURBINA} = (0,01) (9.8)$$

$$W_{TURBINA} = 0,10 [N]$$

### Fuerza vertical:

$$F_{VERTICAL} = W_{TURBINA} + F_{VIENTO} \quad (2.37)$$

$$F_{VERTICAL} = 0,10 + 0,10$$

$$F_{VERTICAL} = 0,20 [N]$$

### Fuerzas en engranes cónicos:

Se determina la fuerza en los engranes cónicos mediante la ecuación 2.40

Donde:

T = Torque aplicado a cualquier elemento

d<sub>m</sub> = Diámetro de paso medio (Estándar AGMA 2005-B88)

El ángulo de presión más común es de 20°

$$W_T = \frac{2 T}{d_m} \quad (2.38)$$

$$W_T = \frac{2 (0,017)}{0,01}$$

$$W_T = 3,4 [N]$$

$$F_{AXIAL} = W_T \tan \phi \sin \alpha = (3,4) \tan 45^\circ \sin 20^\circ \quad (2.39)$$

$$F_{AXIAL} = 1,17 [N]$$

$$F_G = \frac{W_T}{\cos 20^\circ} \quad (2.40)$$

$$F_G = \frac{3,4}{\cos 20^\circ}$$

$$F_G = 3,6 [N]$$

**Reacciones en los rodamientos:**

$$\sum M_B = 0$$

$$M_1 + R_A (0,09) - F_G (0,135) - F_{VERTICAL} (0,045) = 0$$

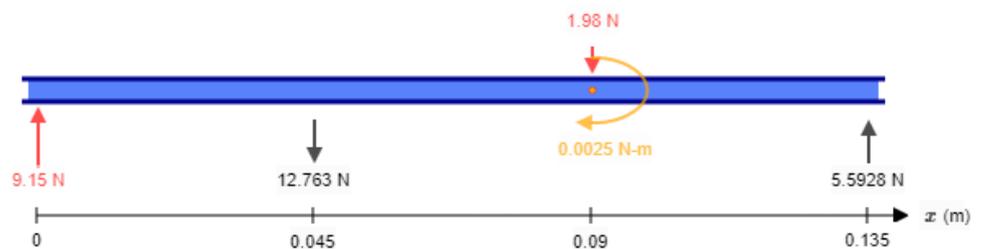
$$R_A = 12,76 [N]$$

$$\sum F_Y = 0$$

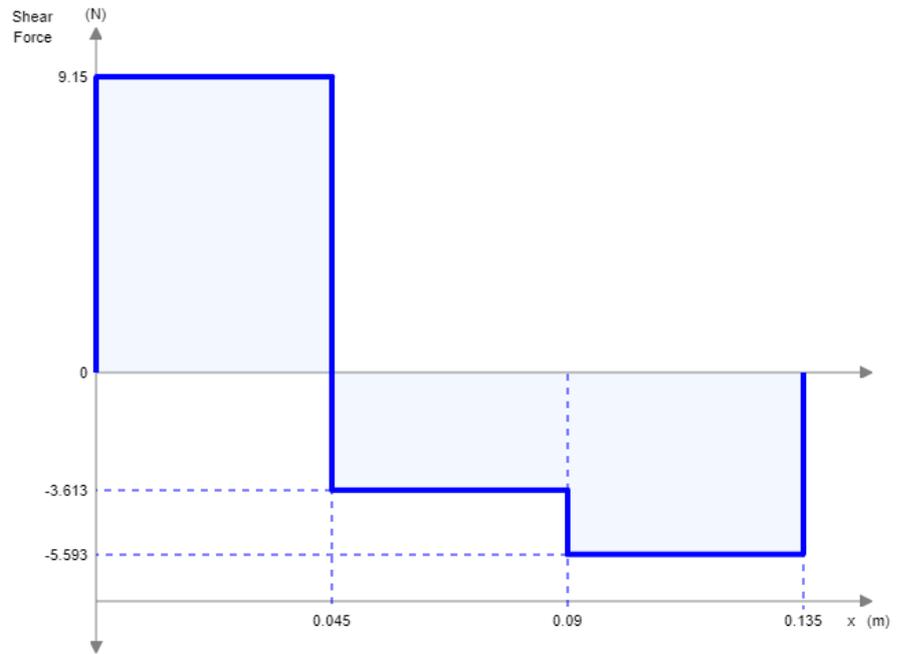
$$R_A + R_B - F_{VERTICAL} - F_G = 0$$

$$R_B = 5,59 [N]$$

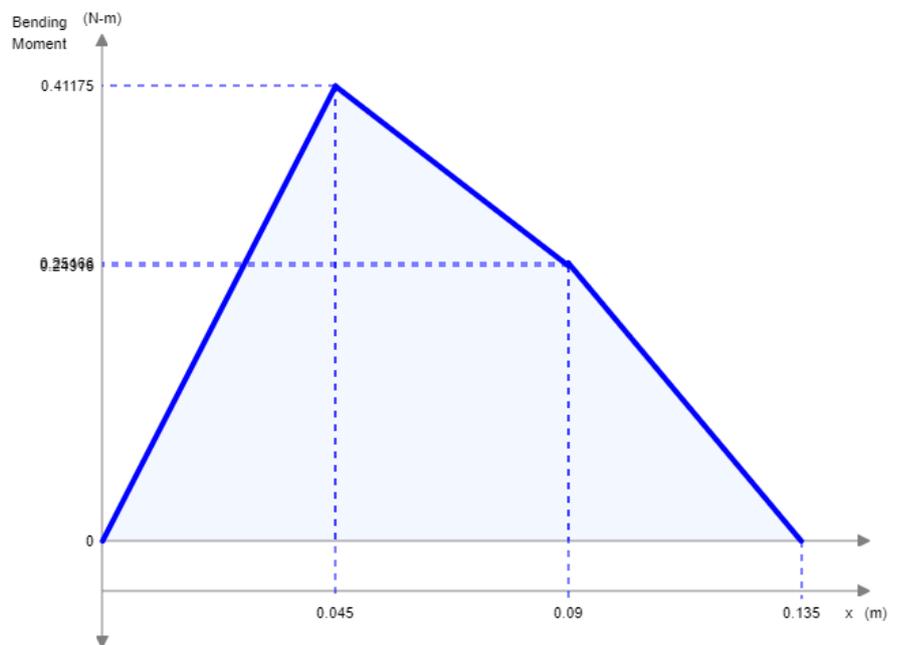
### 2.5.5.3 Diagrama de Cargas, Fuerza Cortante y Momento Flector



**Gráfica 2.6 Diagrama de cuerpo libre del eje de la turbina**  
Fuente: [Elaboración propia]



**Gráfica 2.7 Diagrama de Fuerza Cortante**  
Fuente: [Elaboración propia]



**Gráfica 2.8 Diagrama de Momento Flector**  
Fuente: [Elaboración propia]

De los diagramas de cargas, fuerza cortante y momento flector se obtienen los siguientes resultados:

**Tabla 2.5 Fuerza y Momento máximo en el eje**

POSICIÓN [m]	FUERZA CORTANTE [N]	MOMENTO FLECTOR [N m]
0	9,15	0
0,045	- 3,61	0,41
0,090	- 5,59	0,25
0,135	0	0

Fuente: [Elaboración propia].

Se determina la resistencia a la fatiga, considerando la concentración de esfuerzos (Norton, 2011) , donde:

$$S_{ut} = 440 \text{ MPa} \quad S_{ut} < 1400 \text{ MPa} \quad (\text{AISI 1018})$$

$$S_y = 370 \text{ MPa}$$

$$S'_e = 0.5 S_{ut} \quad (2.41)$$

$$S'_e = 0.5 (440)$$

$$S'_e = 220 \text{ [MPa]}$$

Tabla 6.2 (Shigley)

$$K_a = a S_{ut}^b \quad (2.42)$$

$$a = 4,51$$

$$K_a = (4.51)(440)^{-0.265}$$

$$b = -0,265$$

$$K_a = 0,9$$

Tabla 6.2 (Shigley)

$$K_b = 1$$

Tabla 6.3 (Shigley)

$$K_c = 1$$

Tabla 6.4 (Shigley)

$$K_d = 1$$

Tabla 6.5 (Shigley)

$$K_e = K_f = 1$$

Tabla A-15-7 (Shigley)

$$\frac{r}{d} = 0,05$$

$$K_T = 1,8$$

$$S_e = K_a K_b K_c K_d K_e K_f S'_e \quad (2.43)$$

$$S_e = (0,9)(1)(1)(1)(1)(1)(220 \text{ MPa})$$

$$S_e = 207,9 \text{ [MPa]}$$

Basados en la norma ANSI/ASME B106, junto a la ecuación de Mott, se determina los diámetros en los puntos de análisis conociendo el par de torsión que actúan en el eje.

Donde:

$$FS = 1,90 \qquad K_T = 1,8 \qquad T = 0,017 [N m]$$

$$S_e = 207,9 [MPa] \qquad S_y = 370 [MPa]$$

$$d_0 = \left[ \frac{32 FS}{\pi} \sqrt{\left(\frac{K_T M}{S_e}\right)^2 + \frac{3}{4} \left(\frac{T}{S_y}\right)^2} \right]^{\frac{1}{3}} \qquad (2.44)$$

$$d_0 = 2,70 \text{ mm}$$

$$d_{0,045} = 3,93 \text{ mm}$$

$$d_{0,09} = 3,42 \text{ mm}$$

$$d_{0,135} = 2,70 \text{ mm}$$

Se selecciona el diámetro mayor donde se concentra el momento máximo. (Mott, 2018)

De acuerdo al catálogo de varillas de acero AISI 1018 para ejes de transmisión de la marca DIPAC, se selecciona un diámetro a convenir, donde se ha seleccionado un eje de  $\frac{3}{16}$  pulgadas de diámetro.

$$\frac{3}{16} \text{ pulg} = 4,76 \text{ mm}$$

Se determina el valor de **inercia y momento polar de inercia** de cada diámetro.

$$I_d = \frac{\pi * d^4}{64} \quad (2.45)$$

$$I_{d=0} = \frac{\pi * (0.0027)^4}{64} = 2,61 \times 10^{-12} \text{ m}^4$$

$$I_{d=0,045} = \frac{\pi * (0.00393)^4}{64} = 1,17 \times 10^{-11} \text{ m}^4$$

$$I_{d=0,09} = \frac{\pi * (0.00342)^4}{64} = 6,72 \times 10^{-12} \text{ m}^4$$

$$I_{d=0,135} = \frac{\pi * (0.0027)^4}{64} = 2,61 \times 10^{-12} \text{ m}^4$$

$$J = 2 I_d \quad (2.46)$$

$$J_0 = J_{I_{d=0}} = 2 * (2,61 \times 10^{-12} \text{ m}^4) = 5,22 \times 10^{-12} \text{ m}^4$$

$$J_{0,045} = J_{I_{d=0,045}} = 2 * (1,17 \times 10^{-11} \text{ m}^4) = 2,34 \times 10^{-11} \text{ m}^4$$

$$J_{0,09} = J_{I_{d=0,09}} = 2 * (6,72 \times 10^{-12} \text{ m}^4) = 1,34 \times 10^{-11} \text{ m}^4$$

$$J_{0,135} = J_{I_{d=0,135}} = 2 * (2,61 \times 10^{-12} \text{ m}^4) = 5,22 \times 10^{-12} \text{ m}^4$$

### Esfuerzos de flexión:

$$\sigma = \frac{M c}{I} \quad (2.47)$$

$$\sigma_0 = \sigma_{I_{d=0}} = \frac{(0) * (0.00135)}{(2,61 \times 10^{-12})} = 0$$

$$\sigma_{0,045} = \sigma_{I_{d=0,045}} = \frac{(0,41) * (0.00197)}{(1,17 \times 10^{-11})} = 69,03 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{0,09} = \sigma_{I_{d=0,09}} = \frac{(0,25) * (0,00171)}{(6,72 \times 10^{-12})} = 63,62 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma_{0,135} = \sigma_{I_{d=0,135}} = \frac{(0) * (0.00135)}{(2,61 \times 10^{-12})} = 0$$

### Esfuerzos axiales:

$$\sigma_{AXIAL d} = \frac{2 P}{\pi * d^2} \quad (2.48)$$

$$\sigma_0 = \sigma_{AXIAL d=0} = \frac{2 * (2,94)}{\pi * (0.0027)^2} = 256,74 \text{ [KPa]}$$

$$\sigma_{0,045} = \sigma_{AXIAL\ d=0,045} = \frac{2 * (2,94)}{\pi * (0.00393)^2} = 121,18 \text{ [KPa]}$$

$$\sigma_{0,09} = \sigma_{AXIAL\ d=0,09} = \frac{2 * (2,94)}{\pi * (0.00342)^2} = 160 \text{ [KPa]}$$

$$\sigma_{0,135} = \sigma_{AXIAL\ d=0,135} = \frac{2 * (2,94)}{\pi * (0.0027)^2} = 256,74 \text{ [KPa]}$$

### Esfuerzos cortantes:

$$\tau_J = \frac{T r}{J_d} \quad (2.49)$$

$$\tau_0 = \tau_{J_{d=0}} = \frac{(0,43)(0.00135)}{5,22 \times 10^{-12} \text{ m}^4} = 111,2 \text{ [MPa]}$$

$$\tau_{0,045} = \tau_{J_{d=0,045}} = \frac{(0,43)(0.00197)}{2,34 \times 10^{-11} \text{ m}^4} = 36,2 \text{ [MPa]}$$

$$\tau_{0,09} = \tau_{J_{d=0,09}} = \frac{(0,43)(0.00171)}{1,34 \times 10^{-11} \text{ m}^4} = 54,9 \text{ [MPa]}$$

$$\tau_{0,135} = \tau_{J_{d=0,135}} = \frac{(0,43)(0.00135)}{5,22 \times 10^{-12} \text{ m}^4} = 111,2 \text{ [MPa]}$$

### Determine los factores de concentración de estrés:

Tomados de: (Shigley, 2008)

$$\text{Tabla A-15-7} \quad K_T = 1,8$$

$$K_{TS} = 2,1$$

$$\text{Tabla 6-20} \quad q = 0,6$$

$$q = 0,9$$

$$K_f = 1 + q(K_t - 1) \quad (2.50)$$

$$K_f = 1,5$$

$$K_{fs} = 1 + q(K_{TS} - 1) \quad (2.51)$$

$$K_{fs} = 1,9$$

### Esfuerzos de Von Mises para carga combinada:

$$\sigma' = \sqrt{(K_f \sigma)^2} = 0 \quad (2.52)$$

$$\sigma'_{0,045} = \sqrt{(K_f \sigma_{0,045})^2} = \sqrt{((1,5) (69,03))^2} = 103,5 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma'_{0,09} = \sqrt{(K_f \sigma_{0,09})^2} = \sqrt{((1,5) (63,62))^2} = 95,4 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma'_{0,135} = \sqrt{(K_f \sigma_{0,135})^2} = 0$$

### Promedio de esfuerzos de Von Mises:

$$\sigma'_m = \sqrt{(K_f \sigma_{AXIAL d})^2 + 3(K_{fs} \tau_J)^2} \quad (2.53)$$

$$\sigma'_{m 0} = \sqrt{(K_f \sigma_{AXIAL 0})^2 + 3(K_{fs} \tau_0)^2}$$

$$\sigma'_{m 0} = \sqrt{(1,5 * 256,74)^2 + 3 (1,9 * 111,2)^2} = 365,95 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma'_{m 0,09} = \sqrt{(K_f \sigma_{AXIAL 0,045})^2 + 3(K_{fs} \tau_{0,045})^2}$$

$$\sigma'_{m 0,045} = \sqrt{(1,5 * 121,18)^2 + 3 (1,9 * 36,2)^2} = 119,13 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma'_{m 0,09} = \sqrt{(K_f \sigma_{AXIAL 0,09})^2 + 3(K_{fs} \tau_{0,09})^2}$$

$$\sigma'_{m 0,09} = \sqrt{(1,5 * 160)^2 + 3 (1,9 * 54,9)^2} = 180,7 \text{ [MPa]}$$

$$\sigma'_{m 0,135} = \sqrt{(K_f \sigma_{AXIAL 0,135})^2 + 3(K_{fs} \tau_{0,135})^2}$$

$$\begin{aligned} \sigma'_{m 0,135} &= \sqrt{(1,5 * 256,74)^2 + 3 (1,9 * 111,2)^2} \\ &= 365,95 \text{ [MPa]} \end{aligned}$$

**Factor de seguridad contra falla por fatiga:** (Shigley, 2008)

$$\frac{\sigma_0}{S_e} + \frac{\sigma'_{m0}}{S_{ut}} = \frac{1}{n_{f0}} \quad (2.54)$$

$$\frac{0}{207,9} + \frac{365,95}{440} = \frac{1}{n_{f0}}$$

$$n_{f0} = 1,2$$

$$\frac{103,5}{207,9} + \frac{119,132}{440} = \frac{1}{n_{f0,045}}$$

$$n_{f0,045} = 1,3$$

$$\frac{95,4}{207,9} + \frac{180,7}{440} = \frac{1}{n_{f0,09}}$$

$$n_{f0,09} = 1,15$$

$$\frac{0}{207,9} + \frac{365,95}{440} = \frac{1}{n_{f0,135}}$$

$$n_{f0,135} = 1,2$$

**Factor de seguridad por carga dinámica:** (Shigley, 2008)

$$n_0 = \frac{S_y}{\sigma'_0 + \sigma'_{m0}} \quad (2.55)$$

$$n_0 = \frac{370}{0 + 365,95} = 1,10$$

$$n_{0,045} = \frac{370}{103,5 + 119,132} = 1,66$$

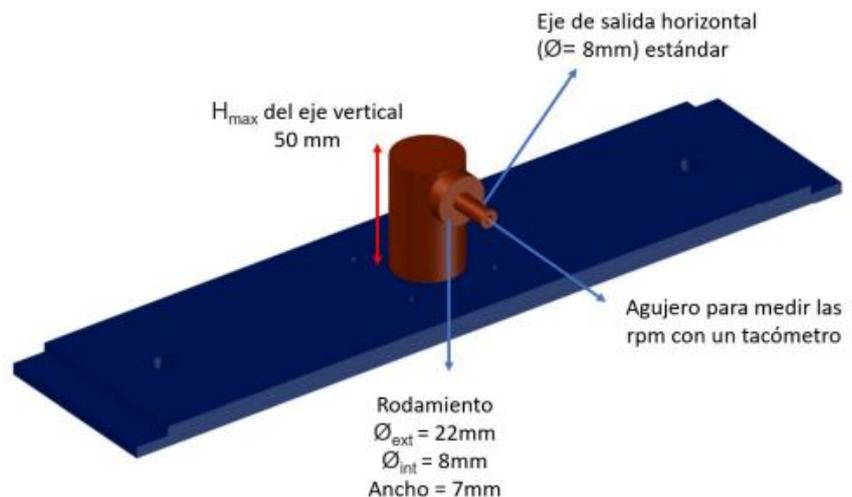
$$n_{0,09} = \frac{370}{95,4 + 180,7} = 1,34$$

$$n_{0,135} = \frac{370}{0 + 365,95} = 1,10$$

#### 2.5.5.4 Diseño de Transmisión de Potencia

Se requiere diseñar un sistema de transmisión de potencia que permita cambiar la dirección del eje de salida a 90°.

Los engranes cónicos rectos comprenden ejes no paralelos que se intersecan en los vértices de los conos, de esta manera cambian la dirección de un eje de transmisión. De esta manera se opta por diseñar un sistema de engranes que se ajusten al espacio físico disponible dentro del banco de pruebas.

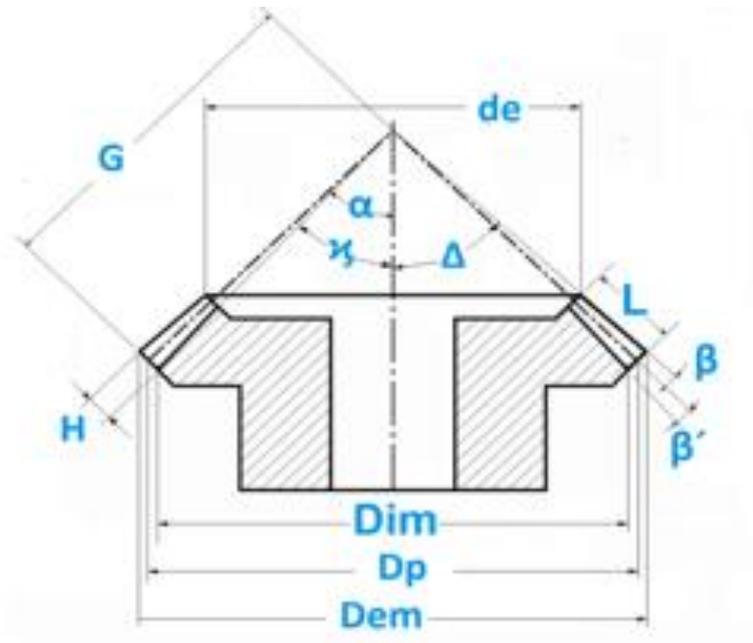


**Figura 2.16 Medidas estándar para el eje de salida**  
Fuente: [Parámetros de diseño banco generador de olas, ESPOL]

Se requiere diseñar un engrane cónico para el eje de transmisión de la turbina Wells de 3 mm de diámetro, y para el eje de transmisión de salida de 8 mm, tomando los siguientes parámetros:

$M = 1,5$	Módulo del engranaje
$N = 18$	Número de dientes del engranaje
$L = 10 \text{ mm}$	Longitud del diente
$\alpha = 45^\circ$	Ángulo al centro del engranaje

Se calculan todos los elementos necesarios para maquinar un engranaje cónico métrico de dientes rectos, (Norton, 2011):



**Figura 2.17 Parámetros de un engranaje cónico recto**  
Fuente: [Elaboración propia]

### Diámetro primitivo

$$D_p = M (N) \quad (2.56)$$

$$D_p = 27 [mm]$$

### Diámetro exterior mayor

$$D_{em} = D_p + (2 M \cos \alpha) \quad (2.57)$$

$$D_{em} = 29,12 [mm]$$

### Diámetro interior mayor

$$D_{im} = D_p - ((1,157) 2 M \cos \alpha) \quad (2.58)$$

$$D_{im} = 24,55 [mm]$$

### Longitud de la generatriz sobre el cono primitivo

$$G = \frac{D_P}{2 \sin \alpha} \quad (2.59)$$
$$G = 19,09 [mm]$$

### Ángulo correspondiente al módulo

$$\tan \beta = \frac{M}{G} \quad (2.60)$$
$$\tan \beta = 4,49^\circ$$

### Ángulo correspondiente al fondo del juego dentado

$$\tan \beta' = 0,157 \frac{M}{G} \quad (2.61)$$
$$\tan \beta' = 0,71^\circ$$

### Ángulo de inclinación del divisor

$$\eta = \alpha - (\beta + \beta') \quad (2.62)$$
$$\eta = 39,8^\circ$$

### Semiángulo del cono exterior

$$\Delta = \alpha + \beta \quad (2.63)$$
$$\Delta = 49,49^\circ$$

### Altura del diente en el diámetro exterior

$$H = 2,167 (M) \quad (2.64)$$
$$H = 3,25 [mm]$$

### Diámetro exterior menor

$$D_e = \frac{D_{em}(G - L)}{G} \quad (2.65)$$

$$D_e = 13,87 \text{ [mm]}$$

### Número de dientes imaginarios para la fresadora

$$N_i = \frac{N}{\cos \alpha} \quad (2.66)$$

$$N_i = 26 \text{ [dientes]}$$

### Relación de Transmisión

Debido al bajo número de revoluciones a la que opera la turbina, se requiere una relación de transmisión 1:1 con el objetivo de minimizar pérdidas por fricción. (Shigley, 2008)

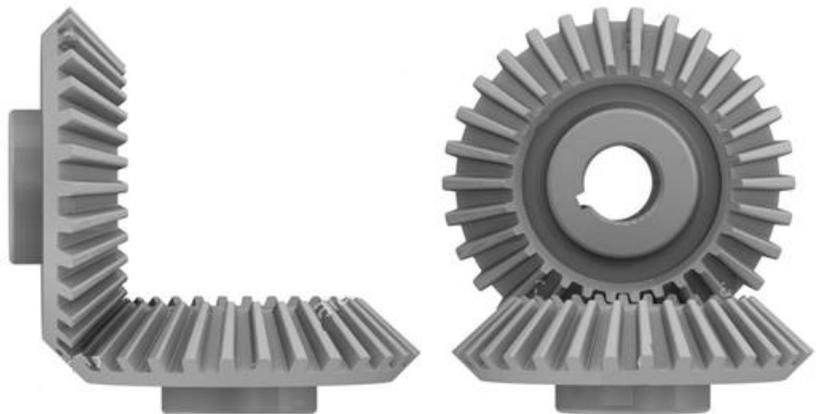


Figura 2.18 Relación de transmisión de engranes cónicos rectos.

Fuente: [Alamy, 2020]

$$i = \frac{N_1}{N_2} = \frac{Z_1}{Z_2} = \frac{1}{1} \quad (2.67)$$

$$N_1 Z_1 = N_2 Z_2$$

Donde:

$$N_1 = 1150 \text{ [rpm]}$$

$$Z_1 = 18 \text{ [dientes]}$$

$$N_2 = 1150 \text{ [rpm]}$$

$$Z_2 = 18 \text{ [dientes]}$$

### 2.5.5.5 Selección de Rodamientos

#### Rodamientos del eje principal

Se seleccionan correctamente los rodamientos de acuerdo a los parámetros de diseño del eje de transmisión de la turbina. Se consideran factores de diseño que garanticen el correcto funcionamiento y seguridad. Según las reacciones determinadas en el diseño del eje, se asumen cargas pequeñas por lo que se opta por rodamientos de bolas rígidas.

Se realiza un análisis de cargas en el rodamiento que se encuentra en la posición más crítica, donde se encuentran los álabes estáticos que dan soporte al peso de la turbina y del eje de transmisión.

#### Carga Estática

$$P_o = 1,98[N]$$

Carga en el rodamiento

$$f_s = 0,5$$

Factor de esfuerzos estáticos

$$C_o = P_o f_s \quad (2.68)$$

$$C_o = 1 [N]$$

#### Carga Dinámica

$$L_h = 2 [N]$$

Carga en el rodamiento

$$N = 0,5$$

Factor de esfuerzos estáticos

$$p = 3$$

Exponente de vida

$$a_1 = 1 \quad (10\%)$$

Factor de probabilidad de fallo

$$a_{23} = 1,7$$

Factor de material

$$C = P_o \sqrt[p]{\frac{L_h N 60}{1 \times 10^6 a_1 a_{23}}} \quad (2.69)$$

$$C = 3,66 [N]$$

## Vida nominal del rodamiento

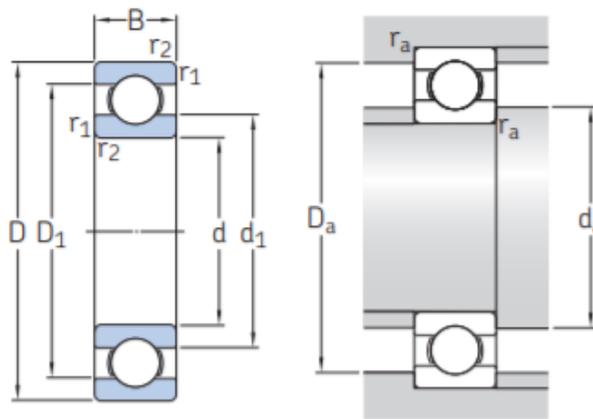
$$f_l = 4$$

Factor de esfuerzos dinámicos

$$L_h = 500 f_l^p = 32\,000 \text{ [horas]} \quad (2.70)$$

$$L_h = 32\,000 \text{ [horas]}$$

De acuerdo al análisis de cargas y la dimensión del diámetro del eje principal de 3 mm, se seleccionan tres rodamientos de bolas rígidas de una hilera del catálogo SKF con las siguientes especificaciones:



Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga	Velocidades nominales		Masa	Designaciones	
d	D	B	dinámica C	estática C <sub>0</sub>	P <sub>u</sub>	Velocidad de referencia	Velocidad límite <sup>1)</sup>		Rodamiento abierto o tapado en ambos lados	tapado en un lado <sup>1)</sup>
mm			kN		kN	r. p. m.		kg	-	
<b>3</b>	10	4	0,54	0,18	0,007	130 000	80 000	0,0015	▶ 623	-
	10	4	0,54	0,18	0,007	-	40 000	0,0015	▶ 623-2RS1	623-RS1
	10	4	0,54	0,18	0,007	130 000	60 000	0,0015	▶ 623-2Z	623-Z

Dimensiones						Dimensiones de resaltes y radios de acuerdo				Factores de cálculo	
d	d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	r <sub>1,2</sub> min.	d <sub>a</sub> min.	d <sub>a</sub> máx.	D <sub>a</sub> máx.	r <sub>a</sub> máx.	k <sub>r</sub>	f <sub>0</sub>
mm						mm				-	
<b>3</b>	5,2	-	-	8,2	0,15	4,2	-	8,8	0,1	0,025	7,5
	5,2	-	-	8,2	0,15	4,2	5,1	8,8	0,1	0,025	7,5
	5,2	-	-	8,2	0,15	4,2	5,1	8,8	0,1	0,025	7,5

Tabla 2.6 Dimensiones de rodamientos de bolas rígidas  
Fuente: [Catálogo de rodamientos SKF]

Se comprueba el análisis de cargas con el rodamiento seleccionado, para garantizar que no fallará bajo cargas estáticas y dinámicas.

### Capacidad de carga básica del catálogo SKF

$$C' = 0,54 \text{ [kN]} \quad \text{Carga dinámica}$$

$$C < C'$$

$$3,66 \text{ [N]} < 540 \text{ [N]}$$

$$C'_0 = 0,18 \text{ [kN]} \quad \text{Carga estática}$$

$$C_o < C'_0$$

$$1 \text{ [N]} < 180 \text{ [N]}$$

Los rodamientos seleccionados se ajustan a la capacidad de carga a la que se encuentran sometidos en el funcionamiento del eje de transmisión.

### Rodamientos del eje de salida

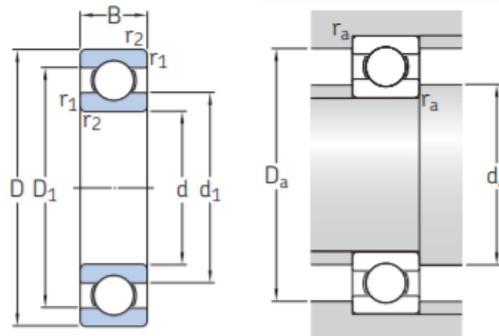
El prototipo requiere transmitir la potencia generada en el eje principal de la turbina, obteniendo como salida un eje de rotación horizontal estándar de 8 mm de diámetro con las especificaciones que se muestran en la figura 2.7.

$$\phi_{ext} = 22 \text{ [mm]}$$

$$\phi_{int} = 8 \text{ [mm]}$$

$$\text{Ancho} = 7 \text{ [mm]}$$

Del catálogo SKF de bolas rígidas de una hilera, se toma el rodamiento que se ajusta a las especificaciones:



Dimensiones principales			Capacidad de carga básica		Carga límite de fatiga	Velocidades nominales		Masa	Designaciones	
d	D	B	dinámica C	estática C <sub>0</sub>	P <sub>u</sub>	Velocidad de referencia	Velocidad límite <sup>1)</sup>		Rodamiento abierto o tapado en ambos lados	tapado en un lado <sup>1)</sup>
mm			kN		kN	r. p. m.		kg	-	
8	16	4	0,819	0,3	0,012	90 000	56 000	0,003	618/8	-
	16	5	1,33	0,57	0,024	-	26 000	0,0036	▶ 628/8-2RS1	-
	16	5	1,33	0,57	0,024	90 000	45 000	0,0036	▶ 628/8-2Z	-
	16	6	1,33	0,57	0,024	90 000	45 000	0,0043	638/8-2Z	-
	19	6	1,46	0,465	0,02	-	24 000	0,0071	619/8-2RS1	-
	19	6	1,46	0,465	0,02	85 000	43 000	0,0071	619/8-2Z	-
	19	6	1,46	0,465	0,02	85 000	53 000	0,0071	619/8	-
	19	6	2,34	0,95	0,04	85 000	43 000	0,0072	607/8-2Z	607/8-Z
	22	7	3,45	1,37	0,057	75 000	48 000	0,012	▶ 608	-
	22	7	3,45	1,37	0,057	-	22 000	0,012	▶ 608-2RSH	▶ 608-RSH
	22	7	3,45	1,37	0,057	75 000	38 000	0,012	▶ 608-2RSL	608-RSL
	22	7	3,45	1,37	0,057	75 000	38 000	0,013	▶ 608-2Z	608-Z
22	11	3,45	1,37	0,057	-	22 000	0,016	▶ 630/8-2RS1	-	
24	8	3,9	1,66	0,071	63 000	40 000	0,018	628	-	

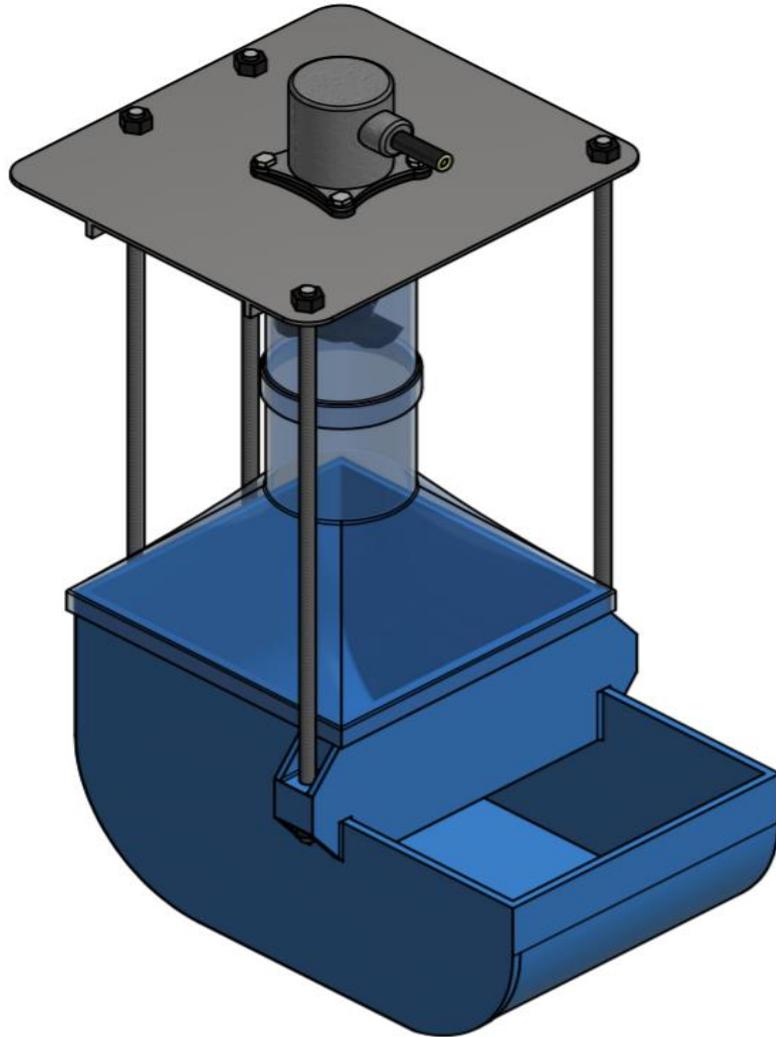
**Tabla 2.7 Dimensiones de rodamientos de bolas rígidas**  
Fuente: [Catálogo de rodamientos SKF]

### 2.5.6 Diseño de estructura de Anclaje

Se requiere diseñar una estructura soporte o de anclaje de características resistentes a las condiciones de prueba a las que estará sometida. Las dimensiones de la estructura están delimitadas a una estructura de altura máxima de 350 mm.

Se opta por un sistema de anclaje basado en una placa metálica de acero negro de 2mm sujeta por 4 pernos M5 a la placa soporte suministrada por el banco de pruebas, dando sujeción por medio de varillas roscadas galvanizada de 1/4", asegurada a la placa metálica

por tuercas y anillos desde la cámara de captación del prototipo OWC, como se muestra en la figura 2.19.



**Figura 2.19 Estructura de anclaje**  
Fuente: [Elaboración propia]

**Materiales de estructura:**

**Tabla 2.8 Materiales de estructura de anclaje**

CANTIDAD	DESCRIPCIÓN	MATERIAL	DIMENSIÓN
1	Placa metálica	Acero A304	160 x 180 x 2 mm
4	Varillas roscadas	Acero galvanizado	1/4 "
16	Tuercas	Acero inoxidable	1/4 "
16	Anillos	Acero inoxidable	1/4 "
4	Pernos Allen	Acero inoxidable	3/16 "
4	Tuercas	Acero inoxidable	3/16 "

Fuente: [Elaboración propia]

# CAPÍTULO 3

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

### 3.1 Resultados del desarrollo del proyecto

Se diseñó una turbina Wells de acuerdo a los requerimientos de diseño para realizar pruebas de conversión de energía undimotriz en el canal generador de olas del laboratorio de hidráulica de ESPOL.

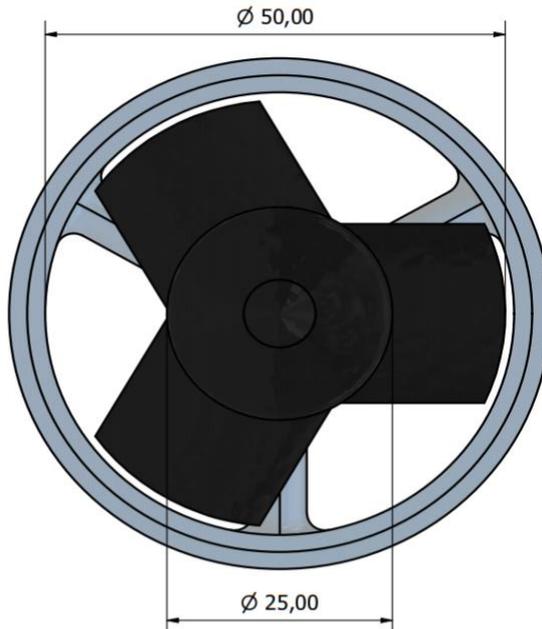
La metodología aplicada permitió diseñar, simular, construir un dispositivo de máximo aprovechamiento de energía proveniente de las olas.

En el proceso de diseño y experimentación se evidenció el comportamiento de una turbina Wells a pequeña escala, donde el adecuado valor de solidez garantiza el arranque de la turbina en sus álabes.

La construcción de la turbina se realizó por manufactura aditiva, donde se utilizó de material PLA en impresión por extrusión. Y la respectiva selección de elementos mecánicos para el ensamble final del dispositivo.

### 3.2 Descripción y Funcionamiento

El prototipo de energía undimotriz funciona como un convertidor de energía de las olas a energía mecánica, a través de un sistema de captación de columna de agua. El oscilatorio movimiento de las olas acciona una turbina Wells, característica por contar con perfiles alares simétricos donde independiente de la dirección del flujo, le permite a esta seguir girando en la misma dirección. El movimiento es transmitido por un sistema de engranes cónicos en una relación 1:1.



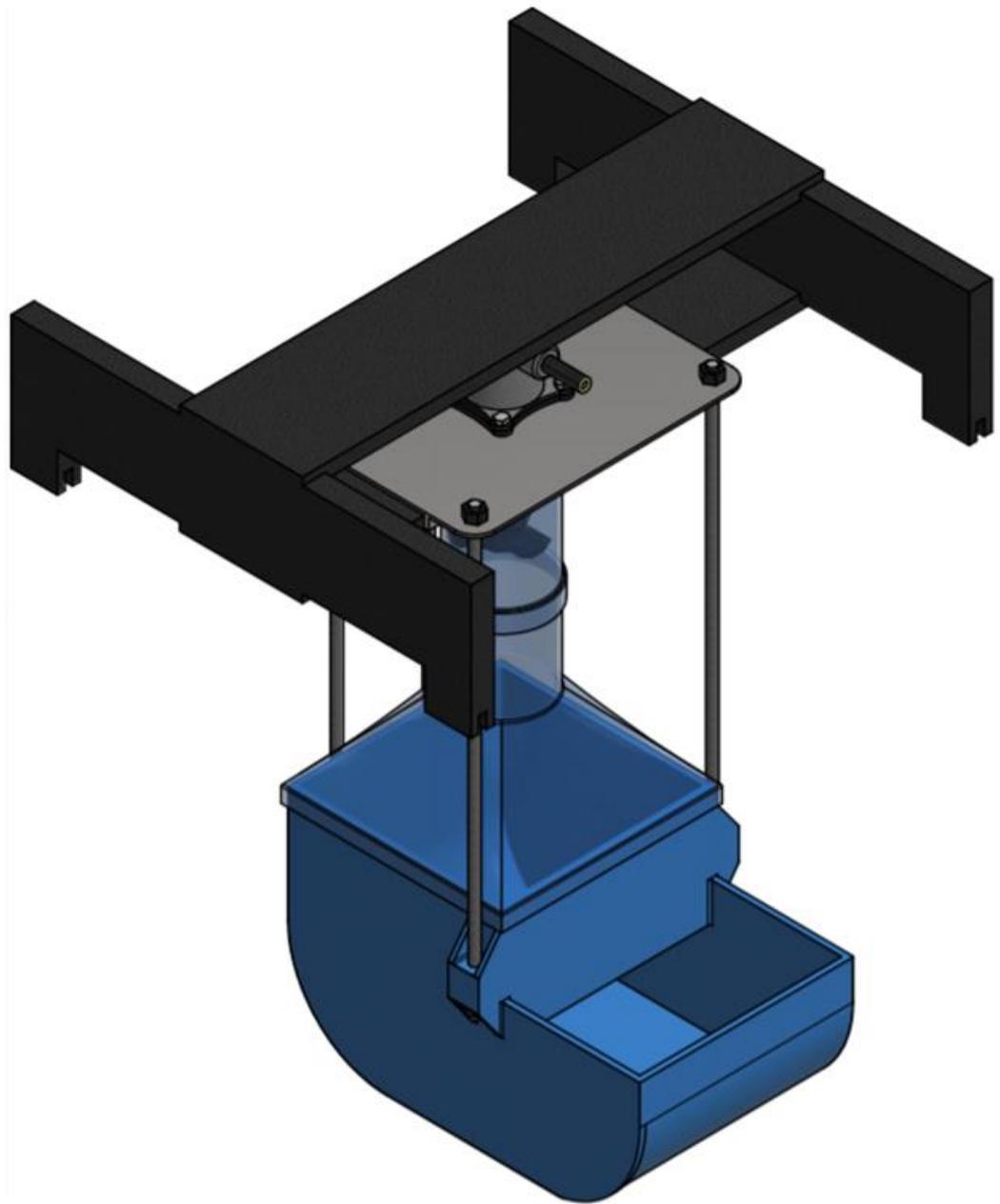
**Figura 3.1** Sección transversal de turbina Wells  
Fuente: [Elaboración propia]

### 3.3 Especificaciones de la turbina

**Tabla 3.1** Especificaciones de Turbina Wells

DISEÑO AERODINÁMICO DE TURBINA WELLS	
Radio exterior	50,0 [mm]
Radio interior	25,0 [mm]
Número de álabes	3
Solidez	0,5
Perfil aerodinámico	NACA 0021
Coefficiente de Sustentación	0,9
Coefficiente de Arrastre	0,035
Longitud de cuerda	21 [mm]
Ángulo de ataque	7 °
Volumen desplazado	0.004 [m <sup>3</sup> ]
Velocidad angular	1725 [rpm]
Torque	0,017 $\frac{N}{m}$
Potencia útil	20,63 [W]
Caudal	0,0864 $\frac{m^3}{s}$
Caída de presión	122 [Pa]
Potencia total	5,73 [W]
Eficiencia promedio	36 %

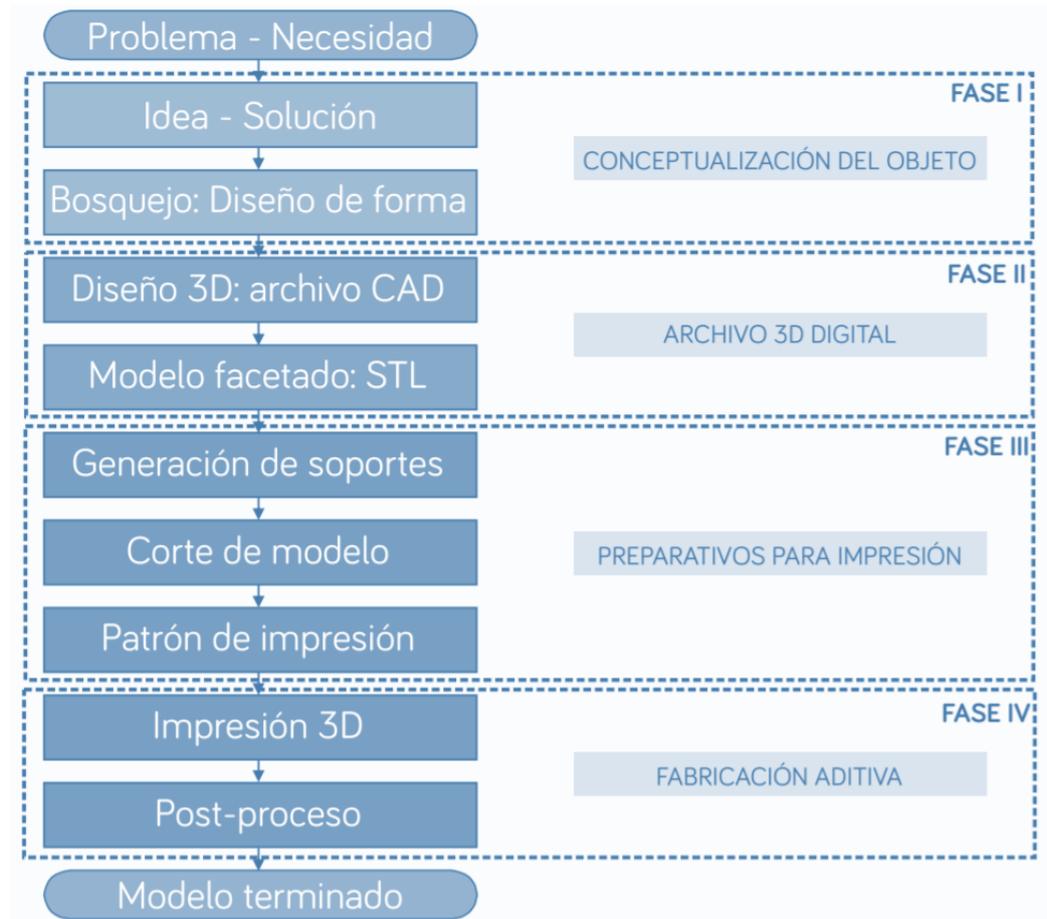
Fuente: [Elaboración propia]



**Figura 3.2** Diseño conceptual de prototipo oscilo-undimotriz  
Fuente: [Elaboración propia]

### **3.4** Manufactura Aditiva

El proceso de manufactura aditiva consta de cuatro fases definidas: Conceptualización, Archivo digital 3D, Preparativos e Impresión. Cada fase cuenta con diferentes pasos, como se muestra en el siguiente diagrama:

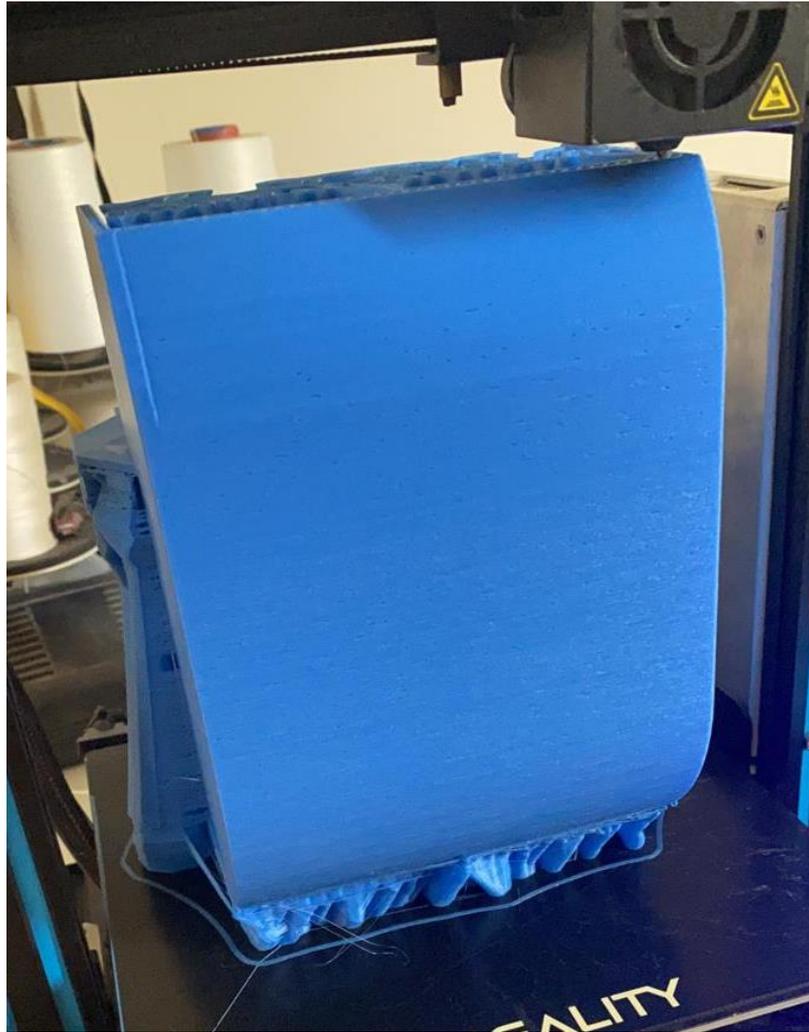


**Figura 3.3 Diagrama del proceso de Manufactura Aditiva**  
 Fuente: [HelgueroAcademy3D, 2020]

Las piezas o elementos a manufacturar son:

- Cámara de captación (Figura 3.4)
- Tobera convergente (Figura 3.5)
- Turbina Wells (Figura 3.6)

Se realizó el proceso de impresión 3D con una altura de capa de 1,6 mm al 100%. El tiempo de impresión estimado de las 3 piezas fue de 105 horas.



**Figura 3.4 Impresión 3D de cámara de captación**  
Fuente: [Elaboración propia]



**Figura 3.5 Impresión 3D de turbina a escala y tobera convergente**  
Fuente: [Elaboración propia]



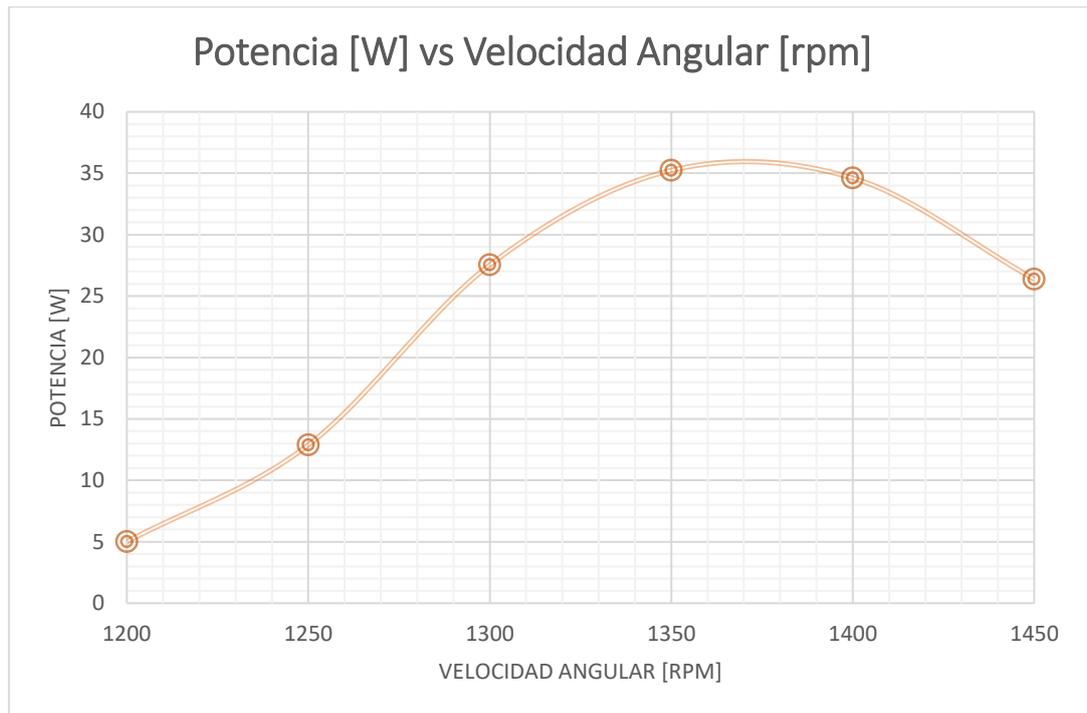
**Figura 3.6 Impresión 3D elementos de prototipo undimotriz**  
Fuente: [Elaboración propia]



**Figura 3.7 Prototipo undimotriz en el banco generador de olas**  
Fuente: [Elaboración propia]

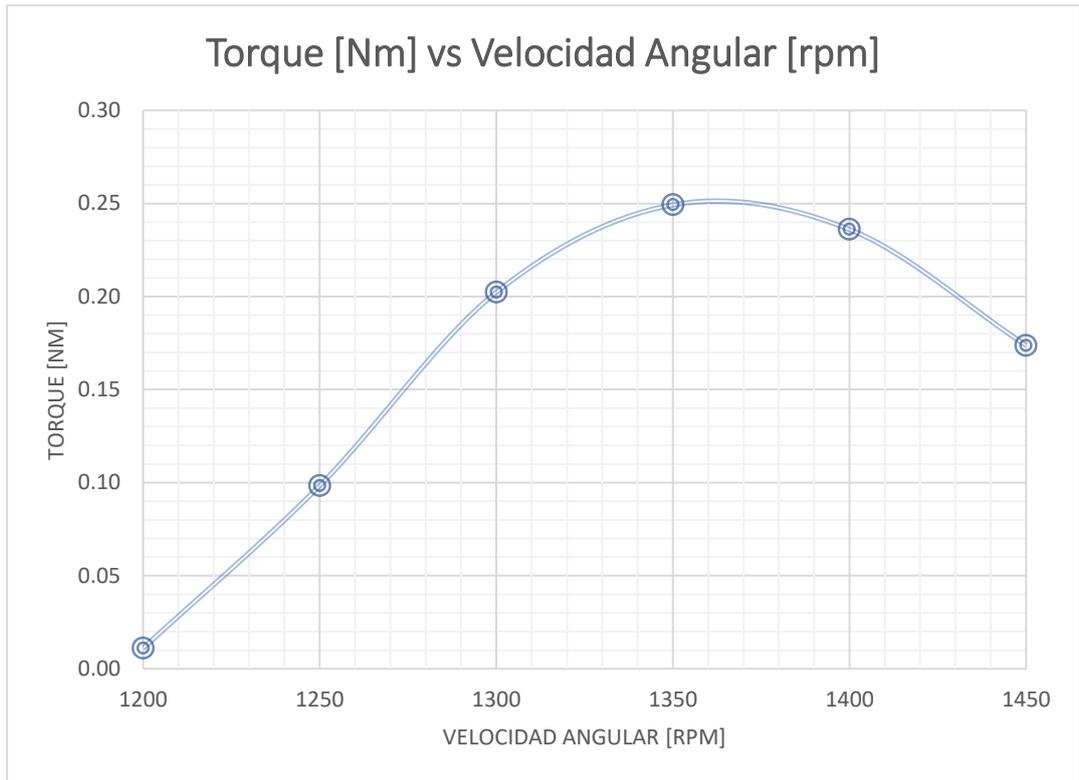
### 3.5 Eficiencia Mecánica

De acuerdo a las ecuaciones expresadas en el capítulo 2, se realizó un análisis de eficiencia mecánica, tomando como parámetros las diferentes condiciones a las que opera el dispositivo. Por medio de iteraciones se obtuvieron los resultados de: Torque, Potencia y Velocidad angular.



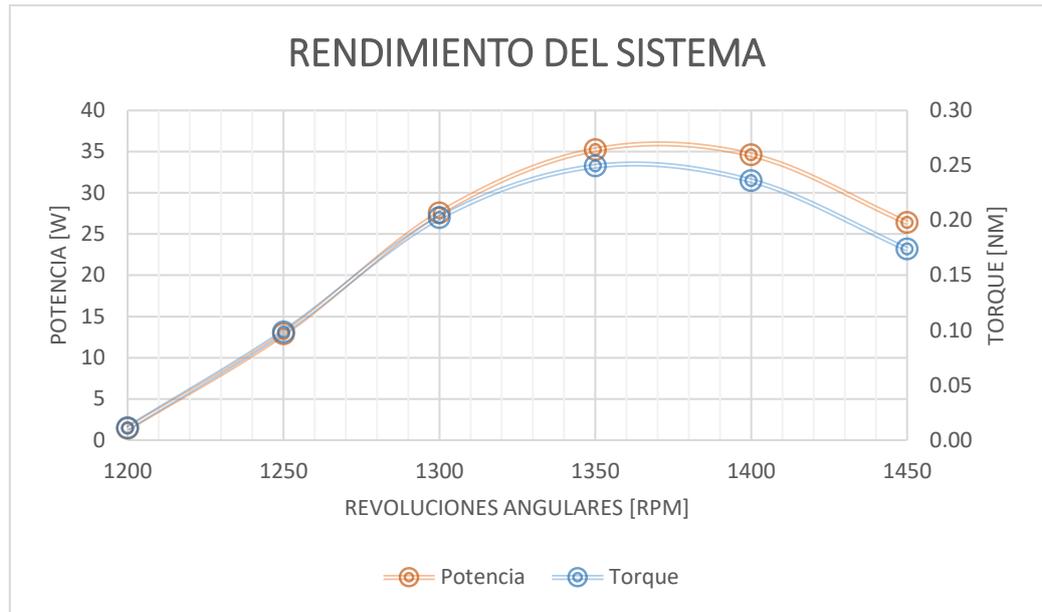
**Gráfica 3.1 Potencia vs Velocidad angular**  
Fuente: [Elaboración propia]

Se observa en la gráfica 3.1 el rendimiento de la turbina con una potencia máxima de 36 W alcanzados cuando la turbina gira a 1350 rpm. El rango de operación de la turbina se encuentra entre los 1200 – 1500 rpm. La caída de potencia se debe al cambio de presión dentro del ducto. La potencia necesaria para el arranque de la turbina es de 28 W, cuando esta gira a 1300 rpm.



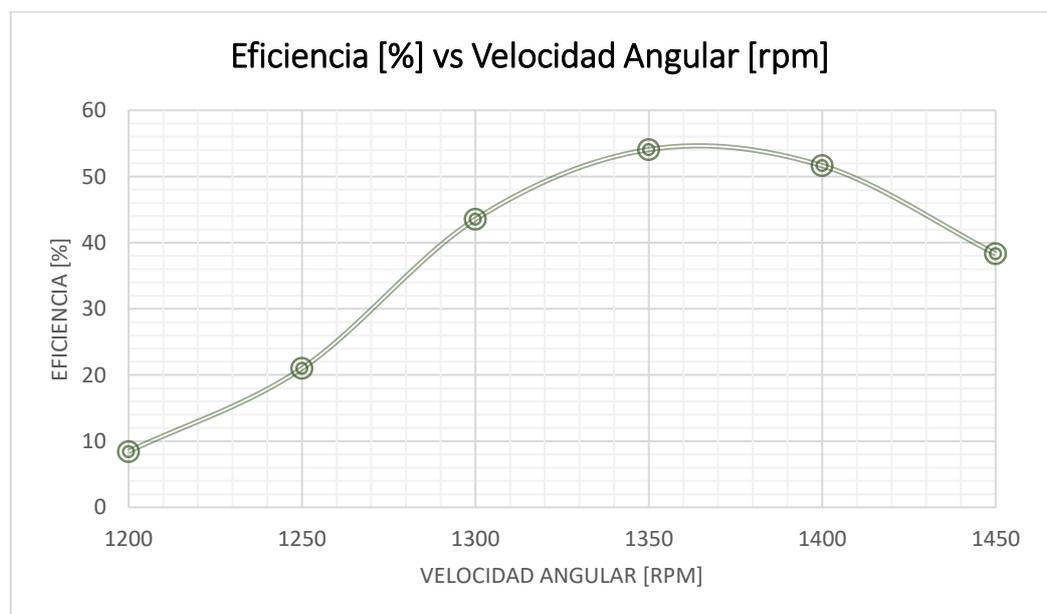
**Gráfica 3.2 Torque vs Velocidad angular**  
Fuente: [Elaboración propia]

En la gráfica 3.2 se muestra el torque máximo alcanzado en su punto de máximo aprovechamiento de energía, alcanzando un torque de 0,25 N m cuando la turbina gira a 1350 rpm, y el torque mínimo cuando gira a 1200 rpm. Teniendo un rango óptimo de operación entre 1200 – 1450 rpm. El torque necesario para el arranque de la turbina es de 0,10 Nm cuando gira a 1250 rpm.



**Gráfica 3.3 Torque & Potencia vs Velocidad angular**  
Fuente: [Elaboración propia]

Se adjuntó las curvas de torque y potencia con el fin de determinar el rango de operación para garantizar el óptimo rendimiento del sistema. En la Grafica 3.3 se muestra el punto de máxima operación de la turbina, cuando el torque alcanza su valor máximo de 0,25 N m y una potencia de 36 W. El rango de operatividad se encuentra entre 1250 rpm – 1450 rpm. (Gráfica 3.3).



**Gráfica 3.4 Eficiencia vs Velocidad angular**  
Fuente: [Elaboración propia]

En la gráfica 3.4 se representa la eficiencia del prototipo para diferentes valores de velocidad angular, teniendo como su punto de máxima eficiencia de 54% cuando esta gira a 1350 rpm. Tiene un rango eficiente entre 1300 rpm – 1400 rpm.

Potencia de Ola	35,5 [W]	0,8 [Hz]
Potencia OWC	8,6 [W]	1150 [rpm]

<b>Eficiencia Global</b>	<b>24 %</b>
--------------------------	-------------

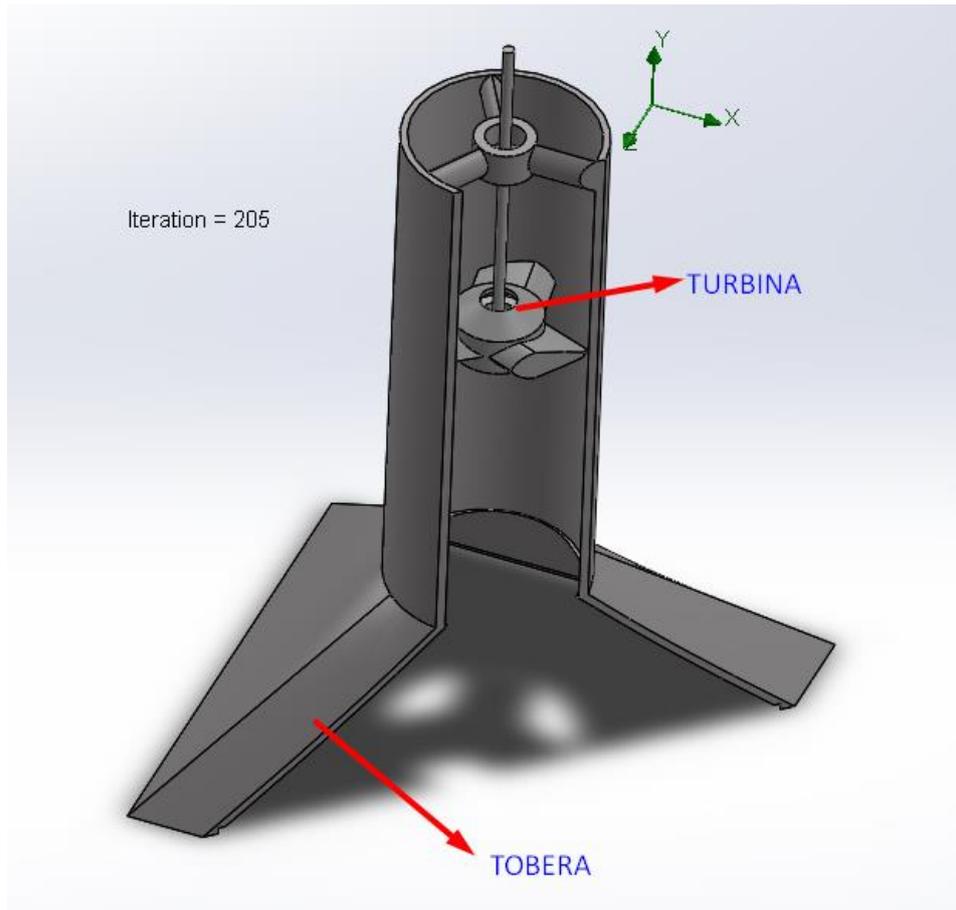
Las turbinas Wells bidireccionales no alcanzan niveles altos de eficiencia, esto es debido a que la velocidad de arranque es muy elevada, donde depende de otros factores físicos como el caudal de aire, la caída de presión para encontrar su punto de máxima eficiencia.

### 3.6 Simulación de flujo de aire

Con ayuda de Flow Simulation (SolidWorks) se realizó un análisis de flujo interno (aire) a través de la tobera con rotación en la turbina y una gravedad de  $9.81m/s^2$ , tal y como se puede observar en la figura 3.8.

Luego se procede a colocar la rotación de la turbina, este análisis se realizó con 1350 rpm, lo cual nos da 141,37 rad/s. Las condiciones iniciales del ambiente se registran con una presión de 1atm y una temperatura de 293.2K con el 50% de HR para la salida de la tobera.

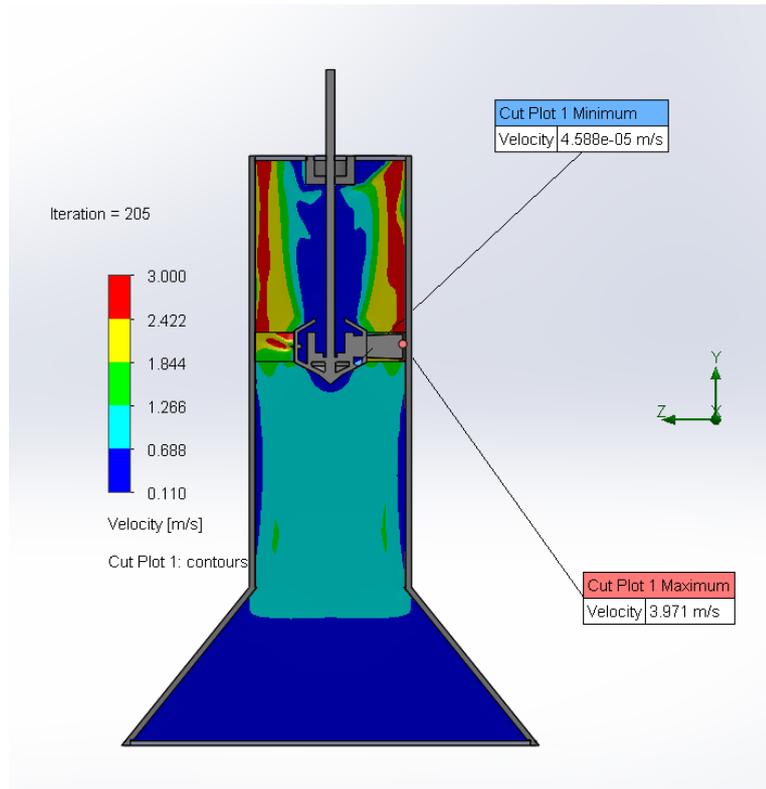
Después, se procede a especificar las condiciones de borde para el análisis, con una velocidad de entrada de aire por la parte inferior de la tobera de  $0,11 m/s$  a una presión de 52.15 Pa, a una temperatura de 293.2K y una presión de 1 atm con 293.2K y el 50% de HR en la parte superior de la tobera. Al finalizar se utilizó un mallado global de 7, para así poder obtener un dato más preciso de Torque en las hélices de la turbina.



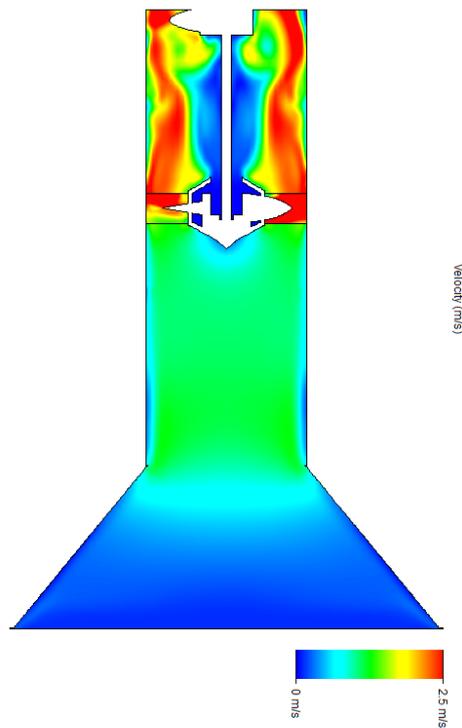
**Figura 3.8 Partes de la simulación Turbina Wells**  
Fuente: [Elaboración propia]

### 3.6.1 Resultados simulación

En la figura 3.9, se observa un corte en la parte central de la tobera en el cual se puede observar que el flujo de aire presenta una velocidad máxima de  $3,97\text{ m/s}$  y mínima de  $0,11\text{ m/s}$  a la entrada de la tobera, lo cual es correcto ya que esta es de tipo convergente es decir debe aumentar su velocidad de flujo. Esto se puede corroborar con la figura 3.10 ya que a medida que el flujo pasa por la tobera aumenta su velocidad, empezando con  $0,11\text{ m/s}$  y justo por debajo de la turbina presenta una velocidad de  $2,4\text{ m/s}$ .

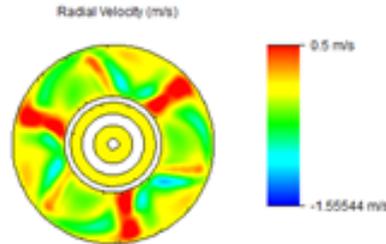


**Figura 3.9 Distribución de la velocidad de aire (Corte central de la tobera)**  
 Fuente: [Elaboración propia]



**Figura 3.10 Distribución de la velocidad de aire**  
 Fuente: [Elaboración propia]

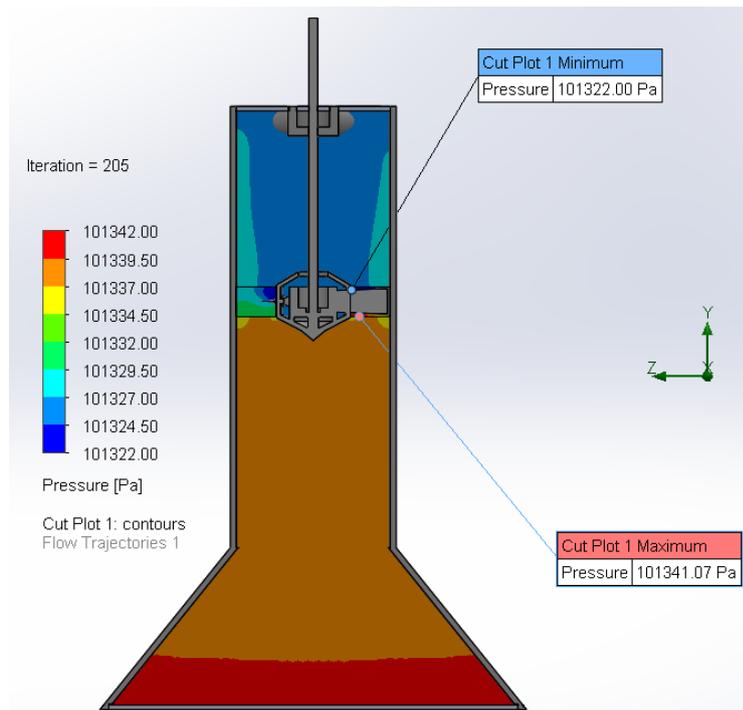
En la figura 3.11 se puede observar la velocidad radial en m/s justo en la turbina un valor máximo del fluido 0.5m/s.



**Figura 3.11 Velocidad Radial (m/s) del aire en la turbina**  
Fuente: [Elaboración propia]

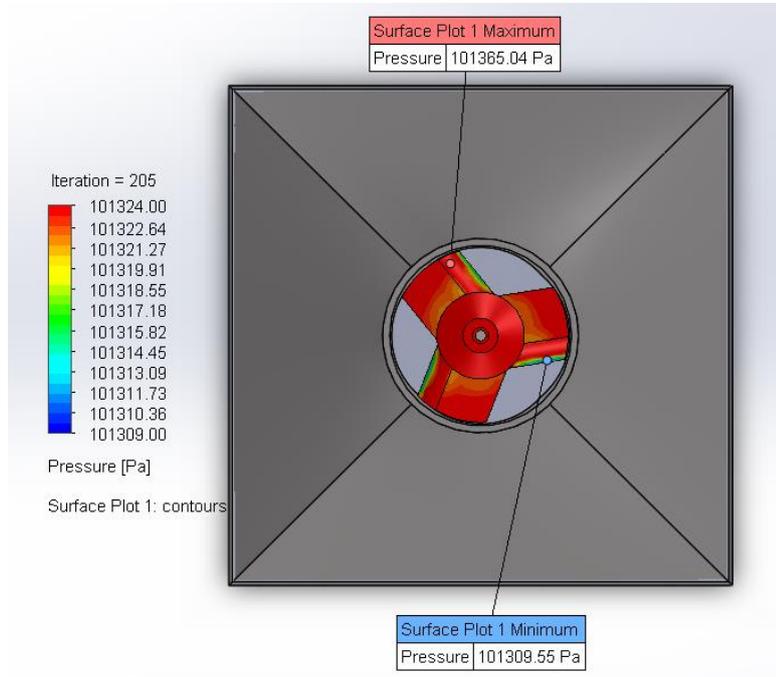
En la figura 3.12 se puede observar el gradiente de presión, obteniendo una presión máxima de 101341.07 Pa y una presión de 101322 Pa justo por detrás de la turbina.

Esto se puede corroborar en la figura 3.13 en la cual se muestra la trayectoria de flujo con la distribución de las presiones, obteniendo una presión menor justo detrás de la turbina.

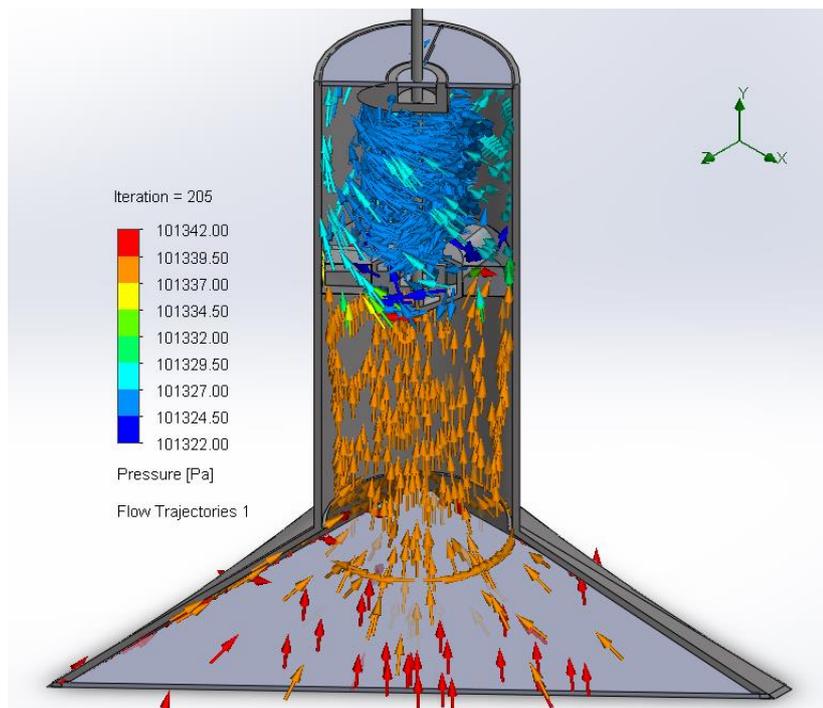


**Figura 3.12 Distribución de Presión (Corte central de la tobera)**  
Fuente: [Elaboración propia]

En cambio, en la figura 3.13, se observa la distribución de presión que existe en la turbina, obteniendo una presión máxima de 101365.04 Pa y una mínima de 101309.55 Pa.



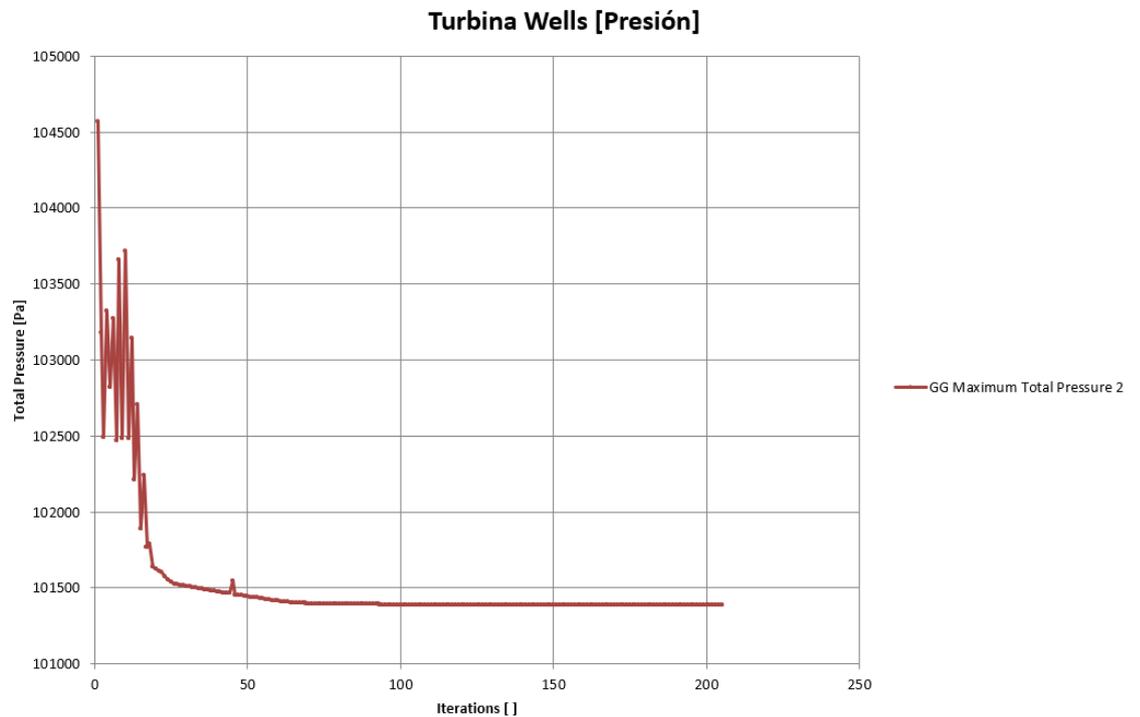
**Figura 3.13 Distribución de Presión en las hélices de la turbina**  
Fuente: [Elaboración propia]



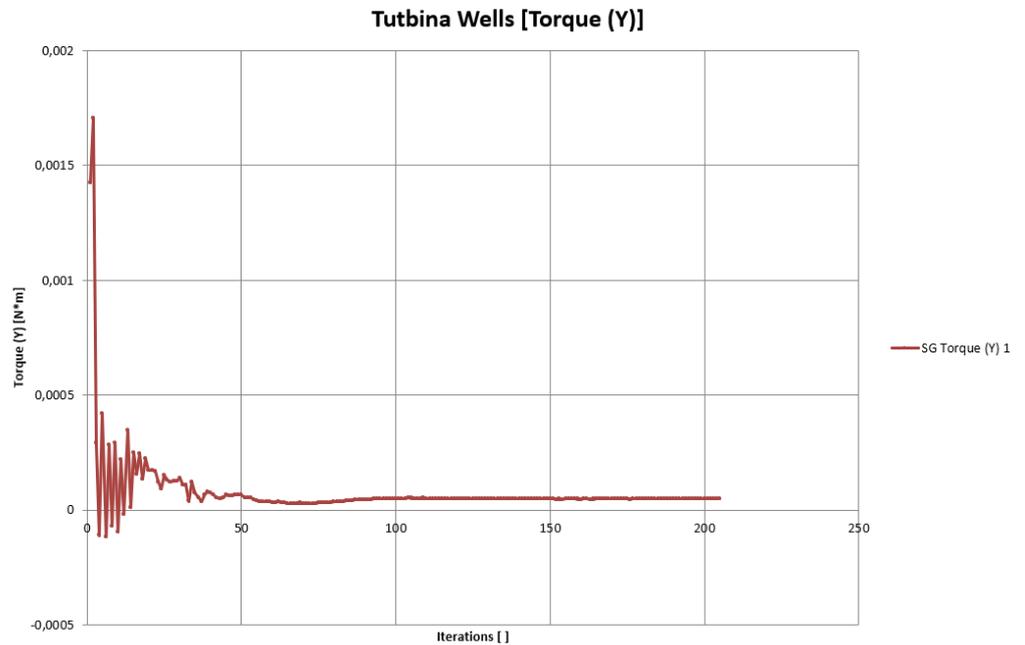
**Figura 3.14 Distribución de flujo en la tobera**  
Fuente: [Elaboración propia]

En la gráfica 3.14 la presión de aire total en la tobera con respecto al número de iteraciones necesarias para realizar la simulación, obteniendo una presión máxima al inicio de 104566 Pa, a partir de la iteración 50 la presión se mantiene estable en 101390 Pa.

En las gráficas 3.5 y 3.6 se puede observar el torque máximo generado en la turbina sobre el eje Y (eje de rotación de la turbina en la simulación) es de 0.0017 Nm al inicio de la simulación, y luego de varias iteraciones se establece en 0.0000485 Nm.



**Gráfica 3.5 Presión máxima vs Iteraciones de la simulación**  
Fuente: [Elaboración propia]



**Gráfica 3.6 Torque máximo en el eje “Y” vs Iteraciones de la simulación**  
**Fuente: [Elaboración propia]**

### 3.7 Análisis Económico

Se analiza el costo del proyecto, considerando materiales, máquinas herramientas, costo hombre-hora-máquina, y costos adicionales.

#### 3.7.1 Costos de materiales

**Tabla 3.2 Tabla de Costos de Materiales**

CANT.	MATERIAL	PRECIO UNIDAD (\$)	COSTO TOTAL (\$)
1	Eje de acero inoxidable	2,26	2,26
3	Rodamientos de bola 3mm	5,06	17,00
2	Rodamiento de bola 8mm	7,14	16,00
1	Placa de acero A304	10,00	10,00
1	Varillas roscadas 1/4"	1,05	1,05
16	Tuercas 1/4"	0,07	1,12
16	Anillos de acero inox	0,05	0,60
4	Pernos Allen 3/16"	0,22	0,90
4	Tuercas 3/16"	0,06	0,25
2	Lijas de agua	0,31	0,62
2	Super Bonder Extra	4,44	8,88
2	Engranés cónicos	17,50	35,00
<b>TOTAL</b>			<b>\$ 93,68</b>

**Fuente: [Elaboración propia]**

### 3.7.2 Costos de manufactura aditiva

Se detallan los costos derivados del uso del equipo de impresión 3D:

$$COSTO_{PREP} = \left( \frac{\$}{hora} \right) \times 3\% \text{ horas de impresión}$$

$$COSTO_{IMPRESIÓN} = \left( \frac{\$}{hora} \right) \times \text{horas de impresión}$$

$$COSTO_{POST} = \left( \frac{\$}{hora} \right) \times 8\% \# \text{ horas de impresión}$$

**Tabla 3.3 Costos totales de las piezas en Impresión 3D**

	PESO (gr)	TIEMPO DE IMPRESIÓN (HR)	COSTO PREP. DE MÁQUINA (\$)	COSTO IMPRESIÓN 3D			COSTO POST IMPRESIÓN 3D (\$)	COSTO TOTAL (\$)
				TARIFA ELÉCTRICA (\$/KW)	TIEMPO DE VIDA	COSTO (\$/HR)		
Cámara de Captación	800	83	5	0,12	5	3	13,28	267,28
Tobera Convergente	133	13,8	0,82				2,20	44,42
Ducto de Turbina	57	5,9	0,35				0,94	18,99
Turbina Wells	10	1,1	0,1				0,16	3,56
<b>TOTAL</b>	1000	103,8						

Fuente: [Elaboración propia]

### 3.7.3 Costos varios

**Tabla 3.4 Costos variados**

DESCRIPCIÓN	COSTO (\$)
Curso Impresión 3D	50,00
Mecanizado	50,00
Otros	50,00
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 150,00</b>

Fuente: [Elaboración propia]

### 3.7.4 Costo total del proyecto

**Tabla 3.5 Costo total del prototipo**

COSTO TOTAL	
Costo de Materiales	\$ 93,68
Costo de Manufactura Aditiva	\$ 334,25
Costos Varios	\$ 150,00
<b>TOTAL</b>	<b>\$ 577,93</b>

Fuente: [Elaboración propia]

# CAPÍTULO 4

## 4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 4.1 Conclusiones

- Se evaluó y fabricó un prototipo innovador que demuestre el funcionamiento de un sistema oscilo undimotriz con fines investigativos para determinar el potencial energético en el perfil costanero de Ecuador.
- Se diseñó un prototipo innovador que demuestra el funcionamiento de un sistema OWC, obteniendo una eficiencia energética de 24% cuando esta ópera a 1150 [rpm].
- Se determinó un rango óptimo de operación de la turbina Wells comprendido entre 1150 - 1450 [rpm], donde la solidez es la relación que garantiza el arranque de la turbina, y esta debe estar comprendida entre [ 0,5 – 0,65].
- Los resultados de las pruebas experimentales en el banco generador de olas permitieron entender que el aprovechamiento de un sistema OWC, es directamente proporcional a la variación de altura de agua.
- A partir de las diferentes frecuencias dadas por el banco de pruebas se determinó el punto de máxima eficiencia de nuestro prototipo siendo, dando este la mejor velocidad dentro del ducto producido por la ola en la cámara de captación y a su vez la mejor variación de presión para que esta mueva nuestra y de esta manera.
- La energía undimotriz es una tecnología en estudio, y es de interés público, privado, la investigación e inversión de nuevos sistemas de conversión de energía y así lograr así una visión de desarrollo más sostenible para los futuros proyectos del país.

## 4.2 Recomendaciones

- Se recomienda designar un área de trabajo más grande para el prototipo. En el banco de pruebas dado que este haría que el prototipo se pueda construir con accesorios más fáciles de conseguir en el mercado, dado que al tener un espacio pequeño para trabajar las dimensiones de los accesorios son muy pequeñas y muchas veces no se pueden mecanizar.
- Realizar una correcta alineación del sistema árbol-turbina-rodamientos-caja transmisión, si esto no sucede podría ocasionar cabeceo el momento de girar la turbina y esto podría ocasionar que la turbina tenga daños además de los rodamientos fallen por fatiga.
- Se recomienda realizar una cámara de mayores dimensiones para tener un mejor aprovechamiento de la energía de la ola dado que está a mayor cantidad de volumen de agua en el interior generaría una columna de aire mayor y a altas frecuencias en el generador de olas la cámara captaría con mayor facilidad y al no tener la suficiente capacidad esta se vea colapsada, además haría que la velocidad del aire dentro del ducto sea mayor y la variación de presión antes de la turbina incremente y esta tenga una transmisión de forma idónea.
- Se recomienda suavizar todas las partes donde choquen los flujos (agua-aire) para direccionarlo y este no tenga pérdidas a lo largo de su recorrido y el prototipo sea más eficiente.

# BIBLIOGRAFÍA

- AirfoilTools. (2020, Diciembre). *Airfoil Tools Data*. Retrieved from <http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit>
- ARCONEL. (2020, Diciembre). *Agencia de Regulación y Control de Energía y Recursos Naturales no Renovables*. Retrieved from <https://www.regulacionelectrica.gob.ec/>
- Berna, J. S. (2009). Diseño y fabricación de un prototipo a pequeña escala de una turbina de aire, para el aprovechamiento de la energía marina. Retrieved from [https://www.researchgate.net/publication/277153855\\_Disenio\\_y\\_fabricacion\\_de\\_un\\_prototipo\\_a\\_pequena\\_escala\\_de\\_una\\_turbina\\_de\\_aire\\_para\\_el\\_aprovechamiento\\_de\\_la\\_energia\\_marina\\_a\\_bajo\\_coste\\_mediante\\_tecnicas\\_de\\_prototipado\\_rapido](https://www.researchgate.net/publication/277153855_Disenio_y_fabricacion_de_un_prototipo_a_pequena_escala_de_una_turbina_de_aire_para_el_aprovechamiento_de_la_energia_marina_a_bajo_coste_mediante_tecnicas_de_prototipado_rapido)
- Caicedo, F. (2019). *Diseño de un prototipo para pruebas de conversión de energía undimotriz*. Retrieved from <https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/133582/D-CD88764.pdf>
- Castillo, S. (2018). *Diseño y Construcción de un tanque de olas para el laboratorio de Ing. Naval*. Retrieved from <https://www.dspace.espol.edu.ec/retrieve/129824/D-76634.pdf>
- Cimbala, Y. A. (2011). *Mecánica de fluidos, fundamentos y aplicaciones*. Mc Graw Hill.
- CNEL EP. (2017). *CNELEP*. Retrieved from Rendición de cuentas: <https://www.cnelep.gob.ec/rendicion-de-cuentas/>
- Expreso. (2020, Enero). *El consumo de energía eléctrica se incrementó en un 4,5 % en 2019*. Retrieved from <https://www.expreso.ec/actualidad/economia/consumo-energia-electrica-incremento-4-5-2019-3014.html>
- Falnes, J. (2010). *Ocean Waves and Oscillating Systems*. Cambridge University Press.
- Fernandez. (2008). *Una Aproximación al aprovechamiento de energía de las olas para generación de electricidad*. Madrid.
- Henriquez, J. (2016, Oct). *Design of oscillating-water-column wave energy converters with an application to self-powered sensor buoys*. Retrieved from <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544216308283>

- Mott, R. L. (2018). *Machine Elements in Mechanical Design, Chapter 12 pages 218-238*, Pearson. 4th Edition.
- Norton, R. L. (2011). *Diseño de Máquinas, Chapter 4 pages 233-283 and Chapter 6 pages 411-464*. Pearson. 4th Edition.
- PaoloBocotti. (2006). *Caisson breakwaters embodying an OWC*. Reggio-Calabria.
- Pinzon. (2013, Junio). *El perfil alar y su nomenclatura NACA*. Retrieved from <https://publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo/article/view/4/106>
- Profesorenlinea. (2015). *Física*. Retrieved from <https://www.profesorenlinea.cl/fisica/Energiademar.htm>
- Rodriguez R, C. M. (2017, Ene-Jun). *Aprovechamiento de la energía undimotriz en el Ecuador*. Retrieved from <https://www.redalyc.org/jatsRepo/5055/505554801003/505554801003.pdf>
- Shigley. (2008). *Mechanical Engineering Design Chapter 6 pages 257-336 and Chapter 7 pages 106-115*. McGraw Hill. 8th Edition.
- Solé, A. C. (2014). *Energías Renovables*. Ed Ceyza.
- Sources, C. f. (2006). *Wave Energy utilization in Europe*. Retrieved from [http://www.cres.gr/kape/publications/download\\_uk.htm](http://www.cres.gr/kape/publications/download_uk.htm)
- Tools, A. (2020). *Perfiles aerodinámicos*. Retrieved from <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0021-il>
- W.K.Tease. (2007). *Dynamic Response of a Variable Pitch Wells Turbina, Turbine Department*.
- Xavier Salueña Berna, J. O. (2015, Julio). *Diseño y fabricación de un prototipo a pequeña escala de una turbina de aire, para el aprovechamiento de la energía marina, a bajo coste mediante técnicas de prototipado rápido*. Retrieved from II Congreso UPC Sostenible 2015: [https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/8145/19\\_Xavier\\_Saluena-1.pdf](https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099/8145/19_Xavier_Saluena-1.pdf)

# APÉNDICES

# APÉNDICE A

## ESPECIFICACIONES DE BANCO GENERADOR DE OLAS

**Tabla 0.1 Ficha Técnica de Banco generador de Olas**

SECCIÓN DE ENSAYO		MODELO	110523
Longitud posible	5m-7,5m - 10m-12,5	SERIE	225648
Sección transversal de flujo	309x450mm	MARCA	GUNT
Ajuste de inclinación	0,5 + 2,5%	LONGITUD	12500 [mm]
DEPÓSITOS DE AGUA		ALTO	450 [mm]
PRFV	1100L	PESO	1800 [kg]

Bomba de agua		400v, 50Hz, 3 fases
Consumo de potencia	4 [kW]	400v, 60hz, 3 fases
Caudal máx.	132 [m3/h]	230v, 60 Hz, 3 fases
Altura de elevación máx.	16,1 [m]	UL/CSA opcional
Número de revoluciones	1450 [min-1]	LxAnXal 9170 x1000x2100mm
RANGOS DE MEDICIÓN		
Caudal	5,4 - 130m3/h	

Fuente: [Elaboración propia]



**Figura 0.1 Banco generador de Olas**  
Fuente: [Laboratorio de Hidráulica, ESPOL]

## CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN

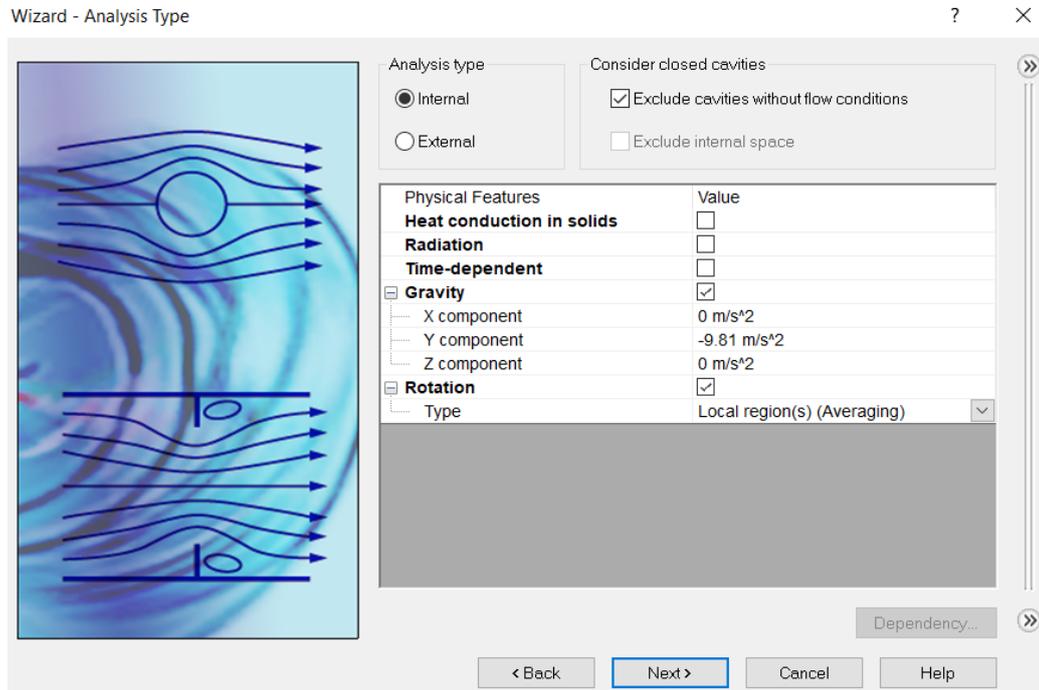


Figura 0.2 Tipo de Análisis  
Fuente: [Elaboración propia]

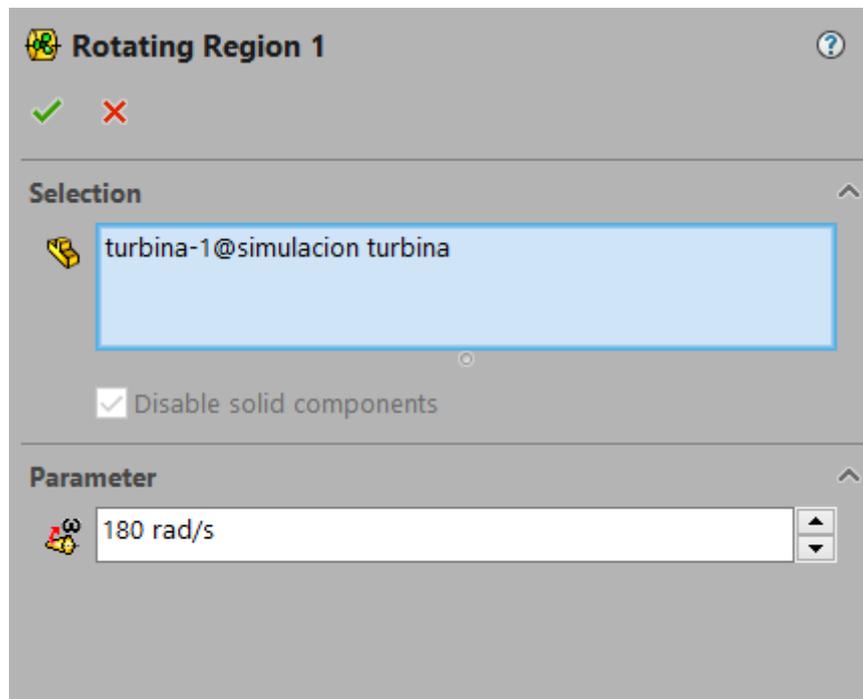
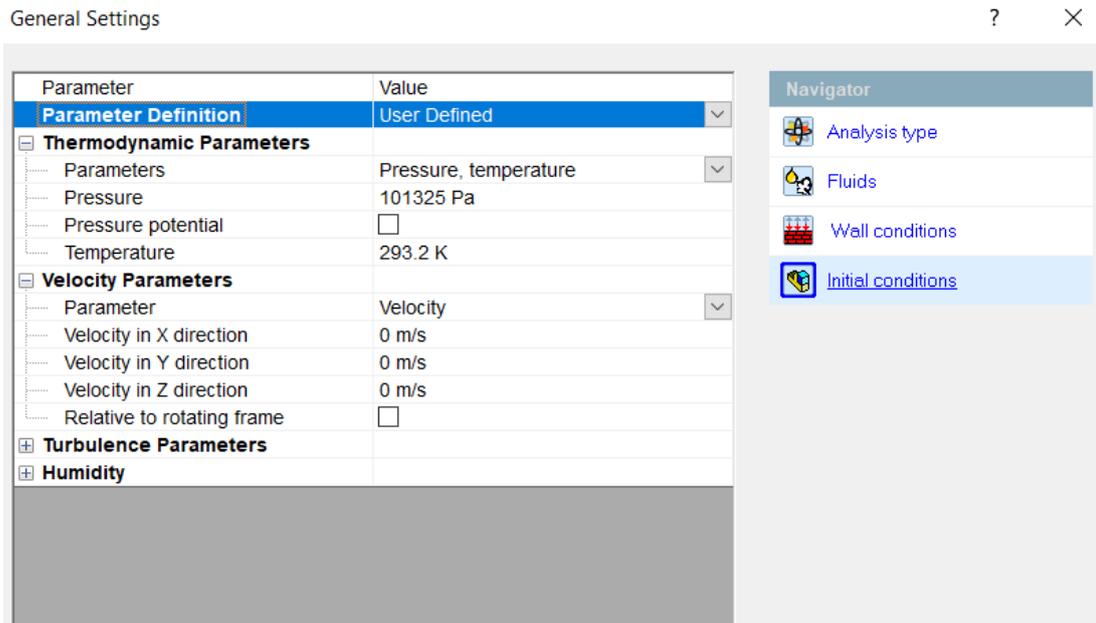
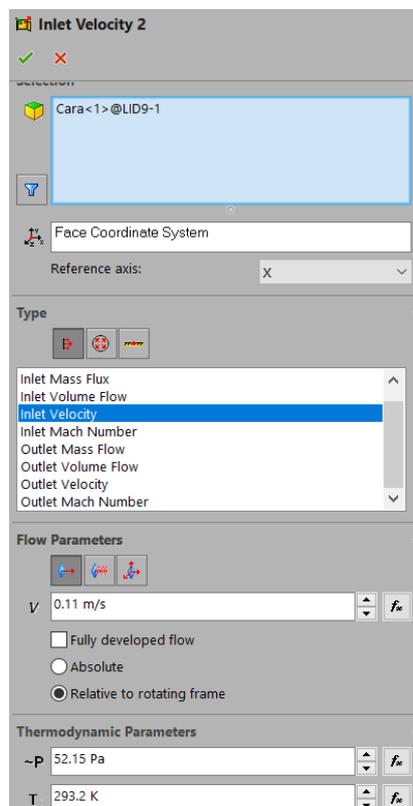


Figura 0.3 Configuración de los parámetros de rotación  
Fuente: [Elaboración propia]



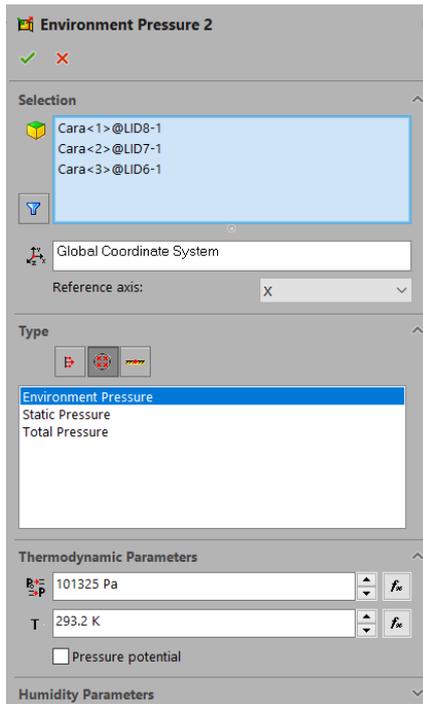
**Figura 0.4 Condiciones iniciales del aire**

**Fuente: [Elaboración propia]**



**Figura 0.5 Condiciones de velocidad de entrada de aire**

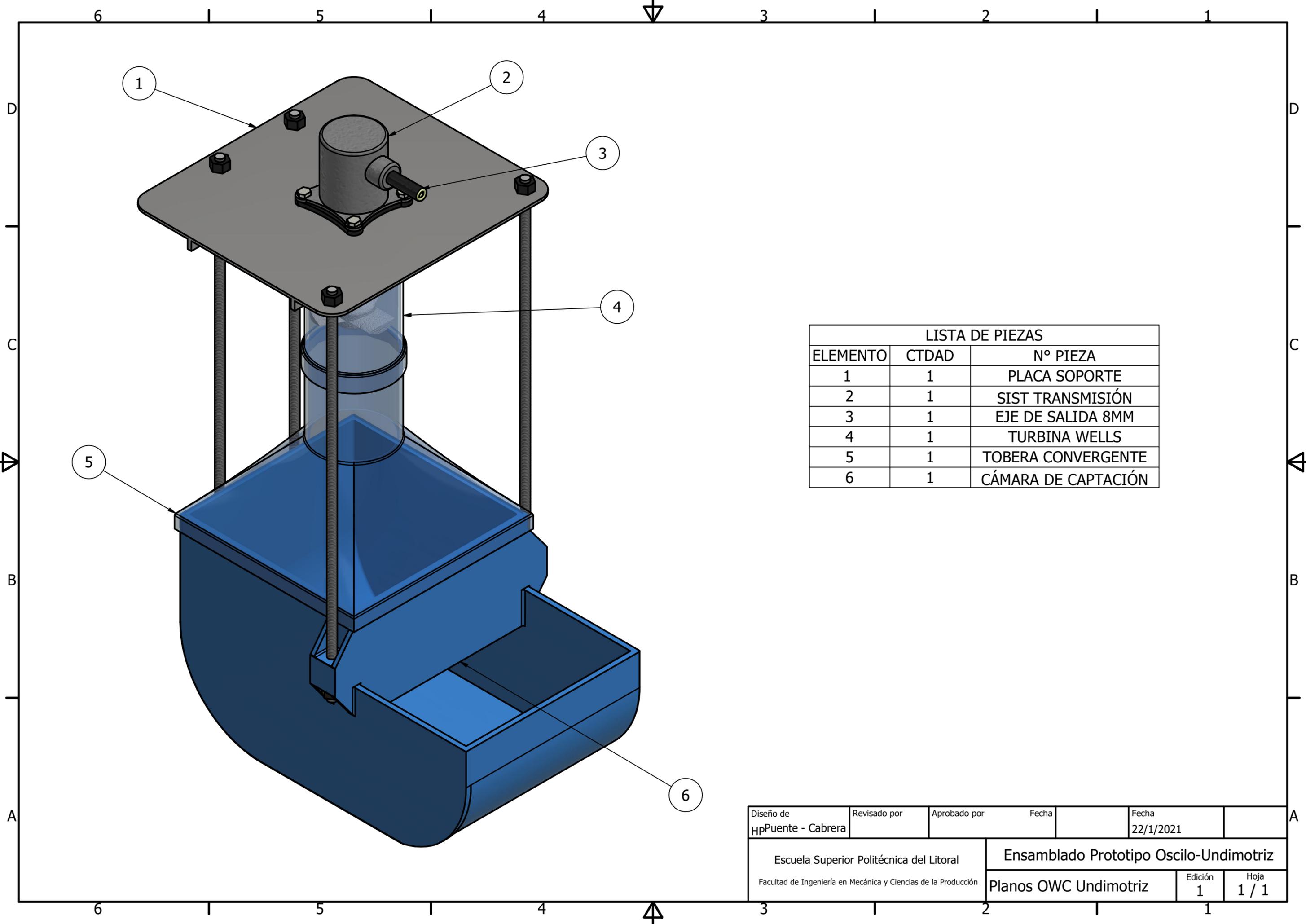
**Fuente: [Elaboración propia]**



**Figura 0.6 Condiciones de la Presión atmosférica**  
**Fuente: [Elaboración propia]**

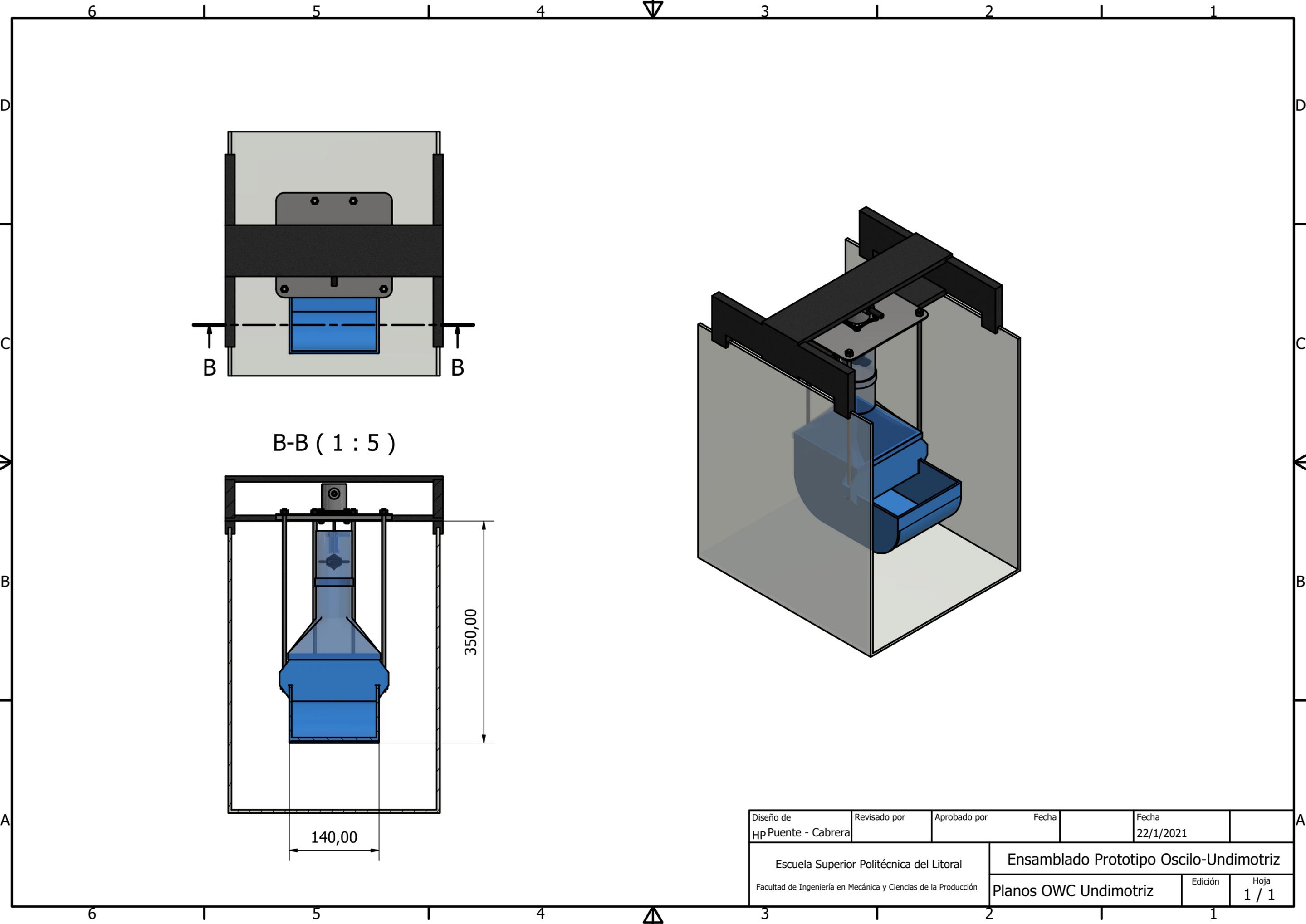
## **APÉNDICE B**

### **PLANOS DEL PROTOTIPO**

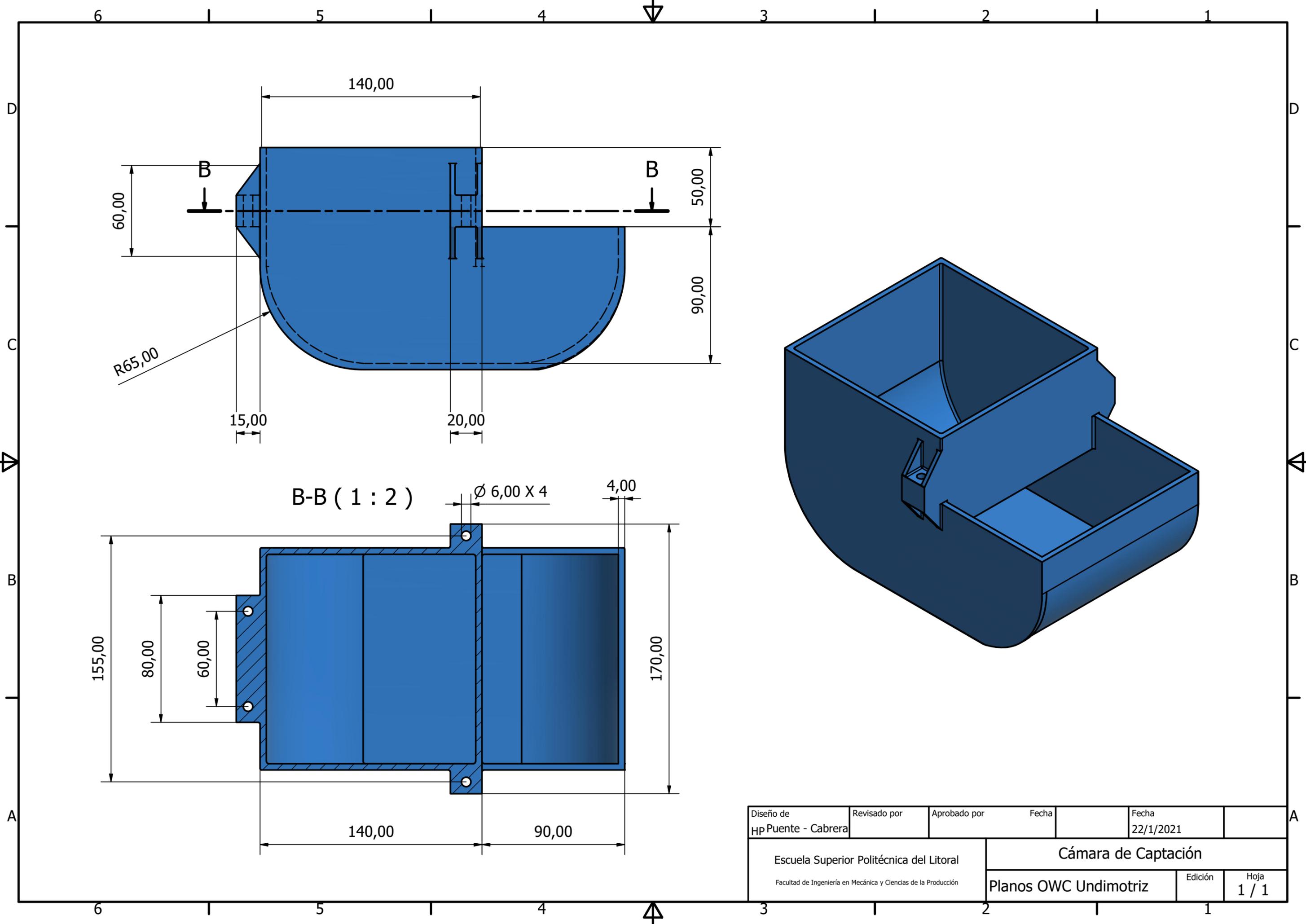


LISTA DE PIEZAS		
ELEMENTO	CTDAD	Nº PIEZA
1	1	PLACA SOPORTE
2	1	SIST TRANSMISIÓN
3	1	EJE DE SALIDA 8MM
4	1	TURBINA WELLS
5	1	TOBERA CONVERGENTE
6	1	CÁMARA DE CAPTACIÓN

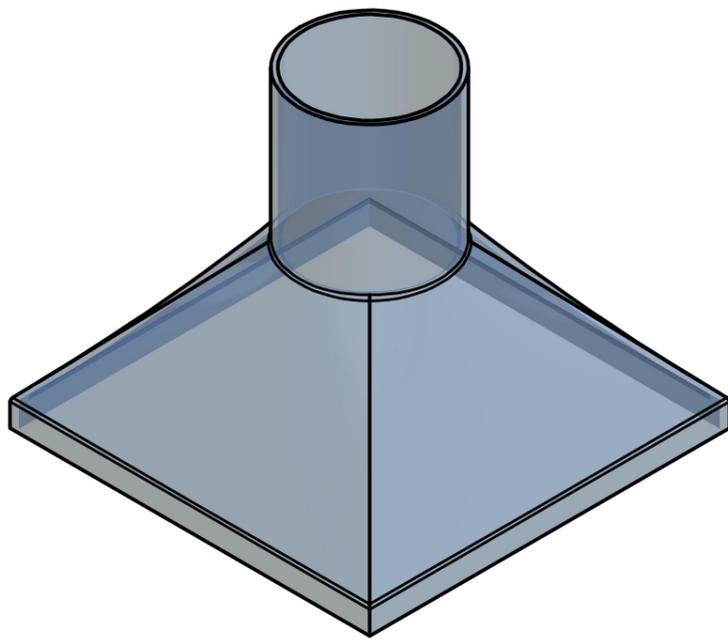
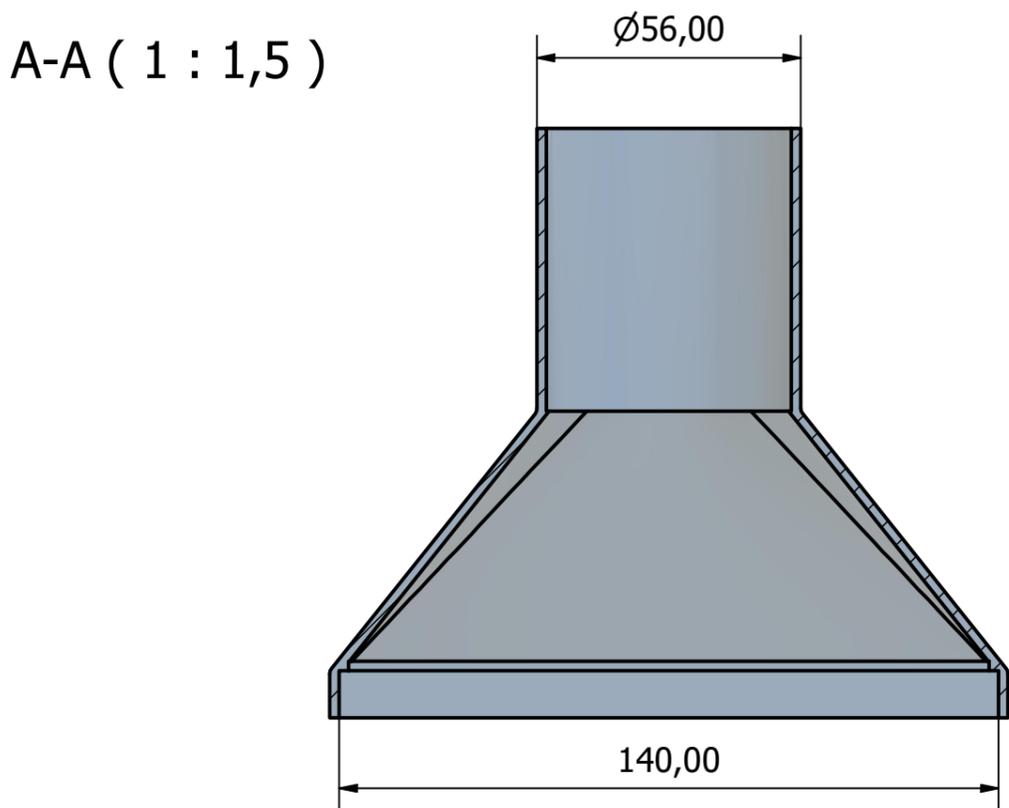
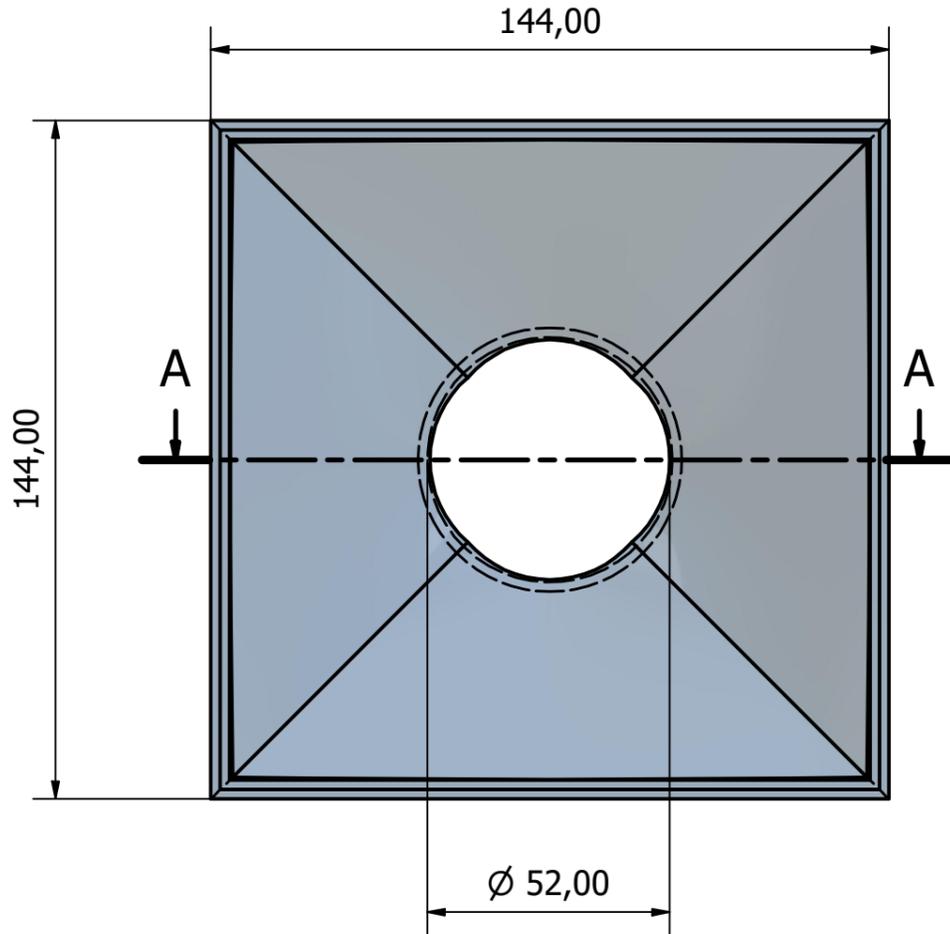
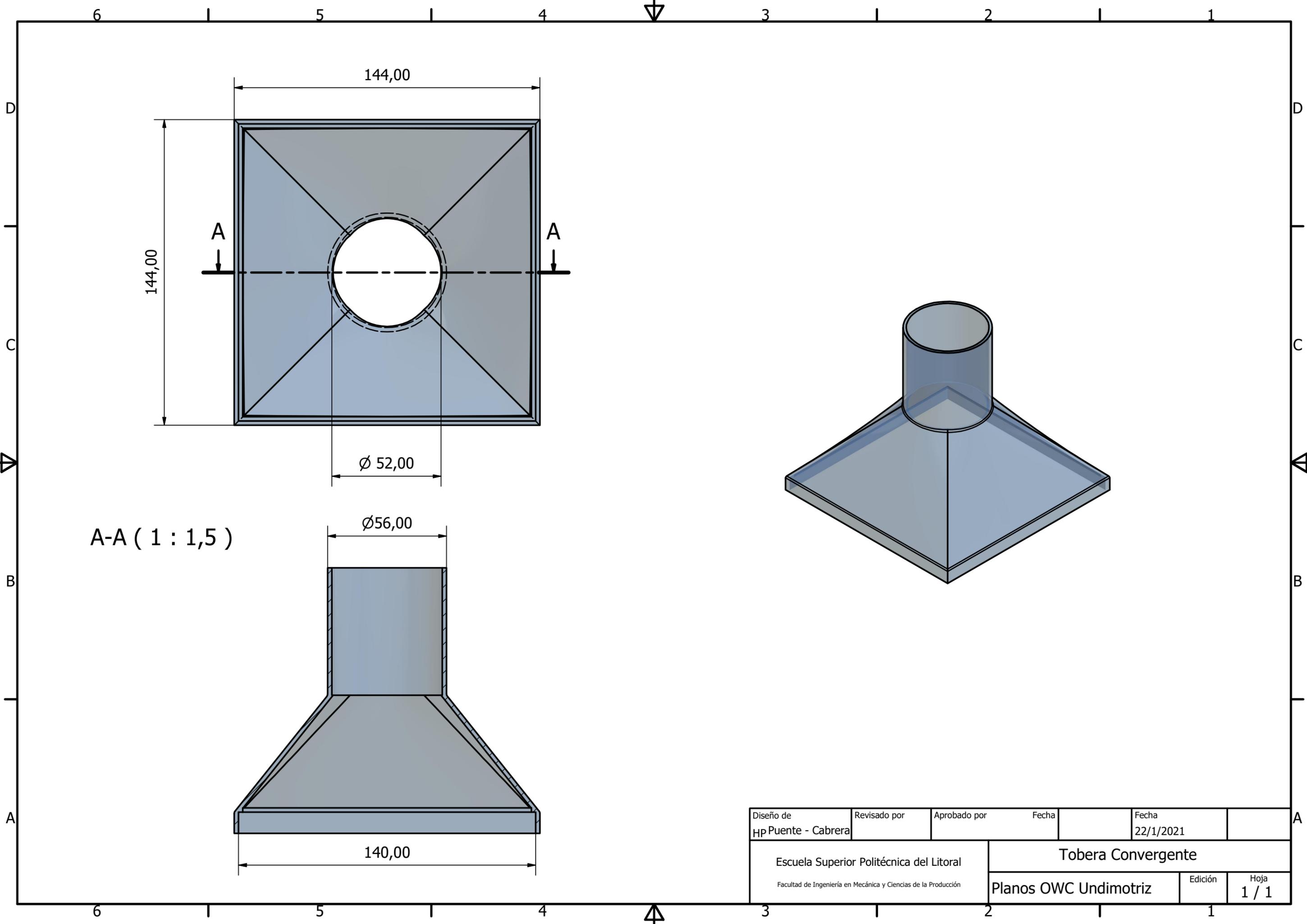
Diseño de HpPuentes - Cabrera	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 22/1/2021
Escuela Superior Politécnica del Litoral		Ensamblado Prototipo Oscilo-Undimotriz		
Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción		Planos OWC Undimotriz	Edición 1	Hoja 1 / 1



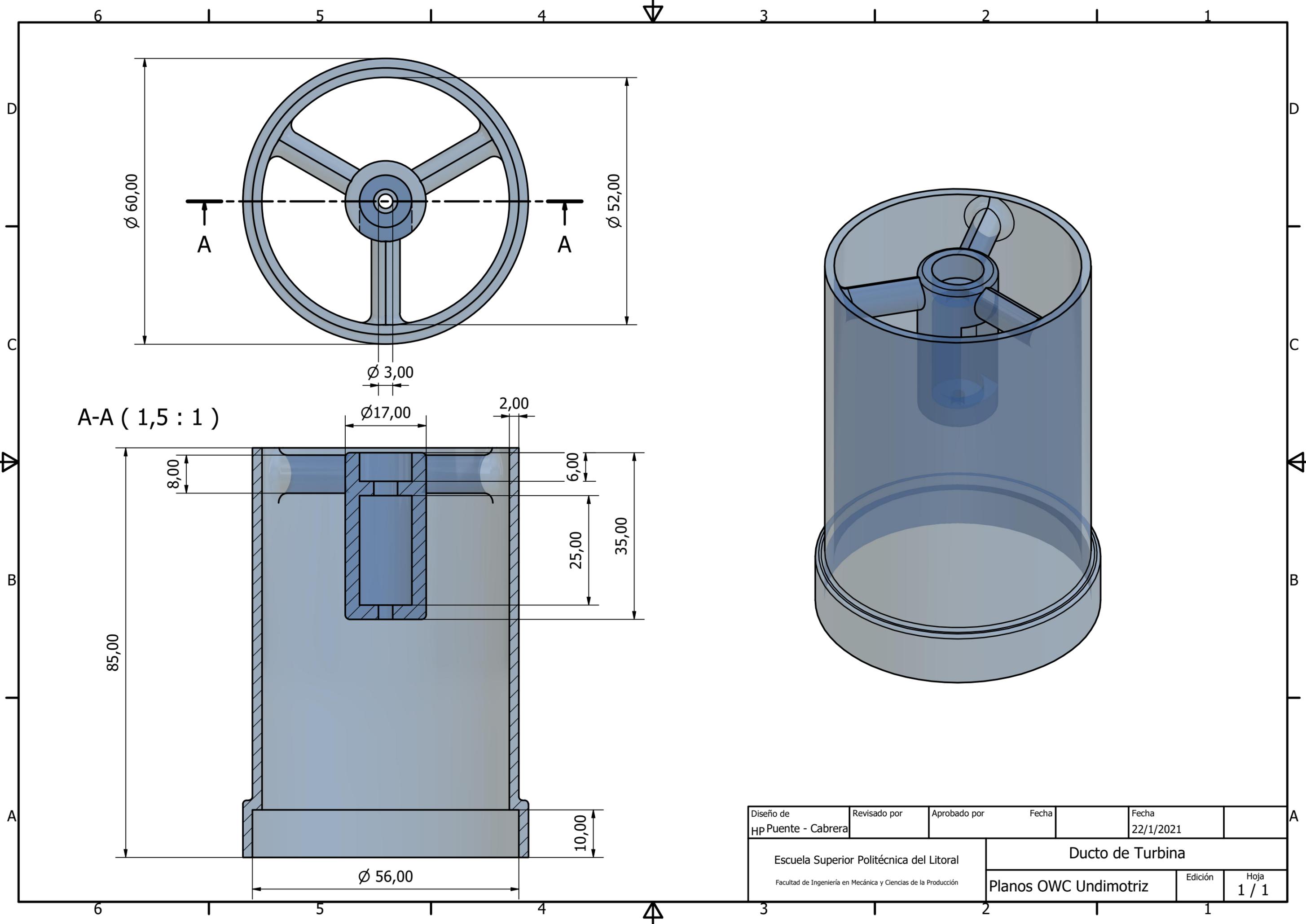
Diseño de HP Puentes - Cabrera	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 22/1/2021
Escuela Superior Politécnica del Litoral Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción			Ensamblado Prototipo Oscilo-Undimotriz	
Planos OWC Undimotriz			Edición	Hoja 1 / 1



Diseño de HP Puentes - Cabrera	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 22/1/2021
Escuela Superior Politécnica del Litoral		Cámara de Captación		
Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción		Planos OWC Undimotriz	Edición	Hoja 1 / 1



Diseño de HP Puentes - Cabrera	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 22/1/2021	
Escuela Superior Politécnica del Litoral			Tobera Convergente		
Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción			Planos OWC Undimotriz	Edición	Hoja 1 / 1



A-A ( 1,5 : 1 )

85,00

8,00

Ø17,00

2,00

6,00

25,00

35,00

Ø 56,00

10,00

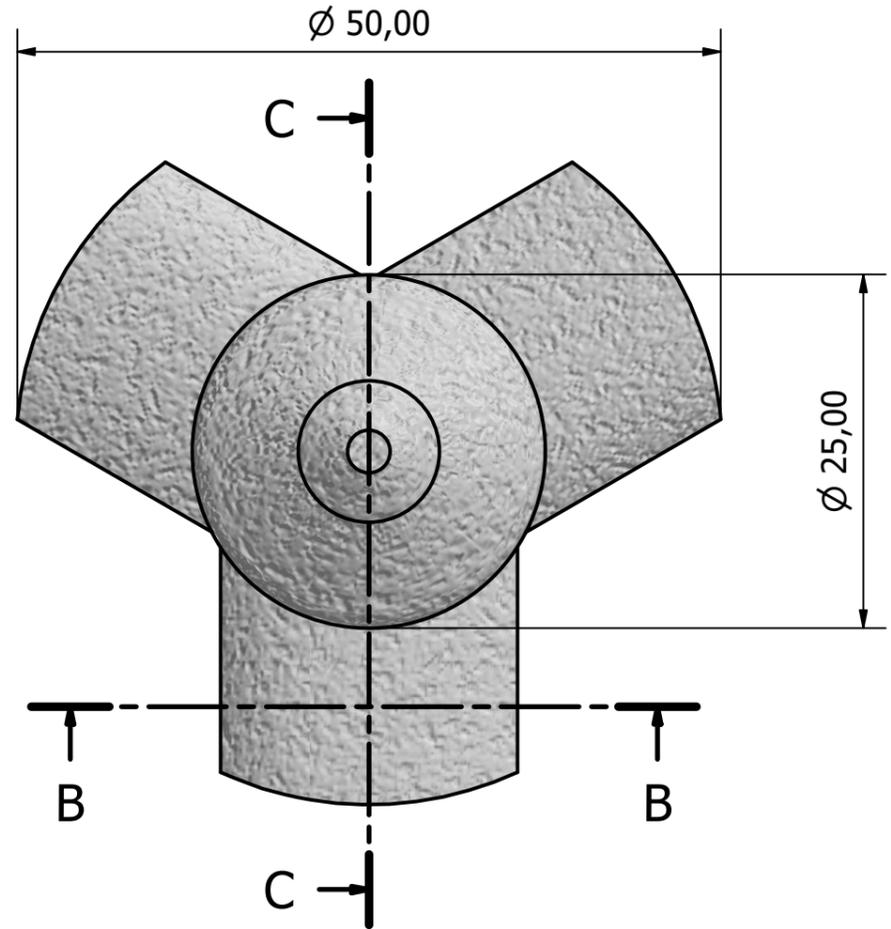
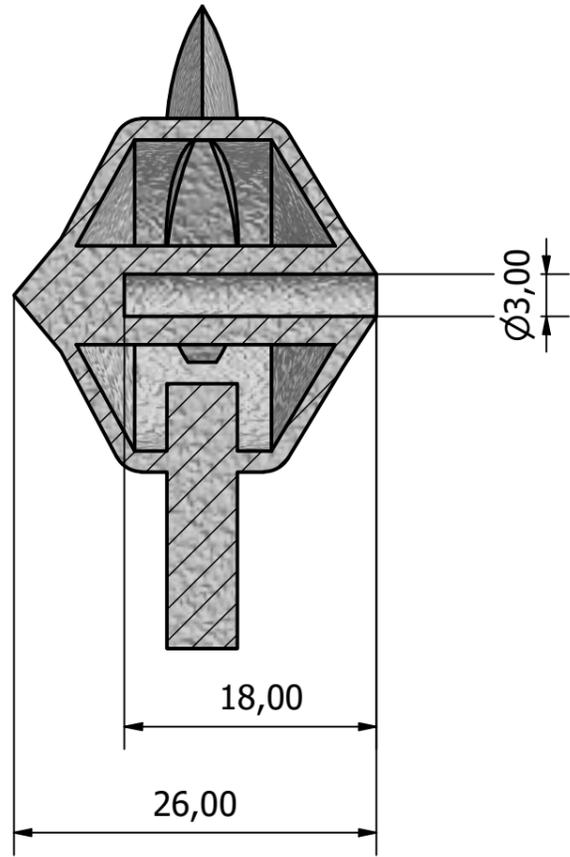
Ø 3,00

Ø 52,00

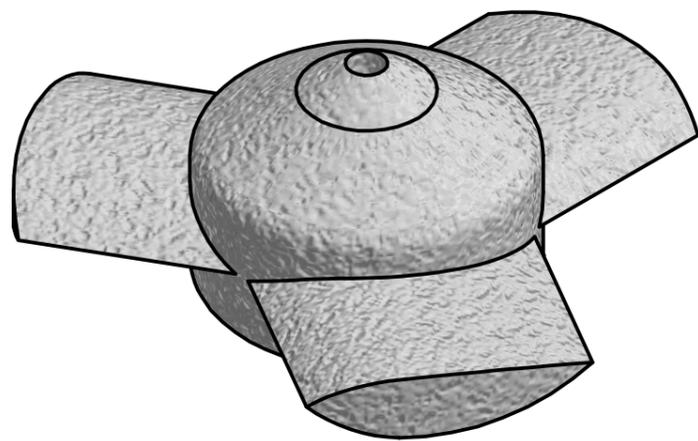
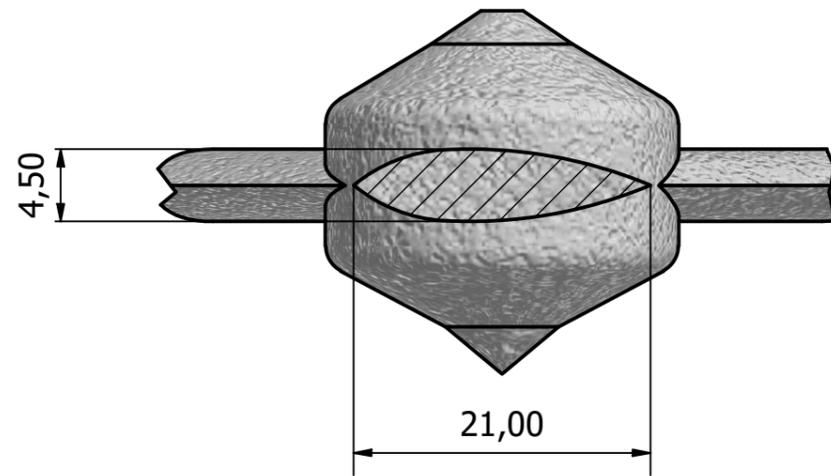
Ø 60,00

Diseño de HP Puentes - Cabrera	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 22/1/2021
Escuela Superior Politécnica del Litoral		Ducto de Turbina		
Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción		Planos OWC Undimotriz	Edición	Hoja 1 / 1

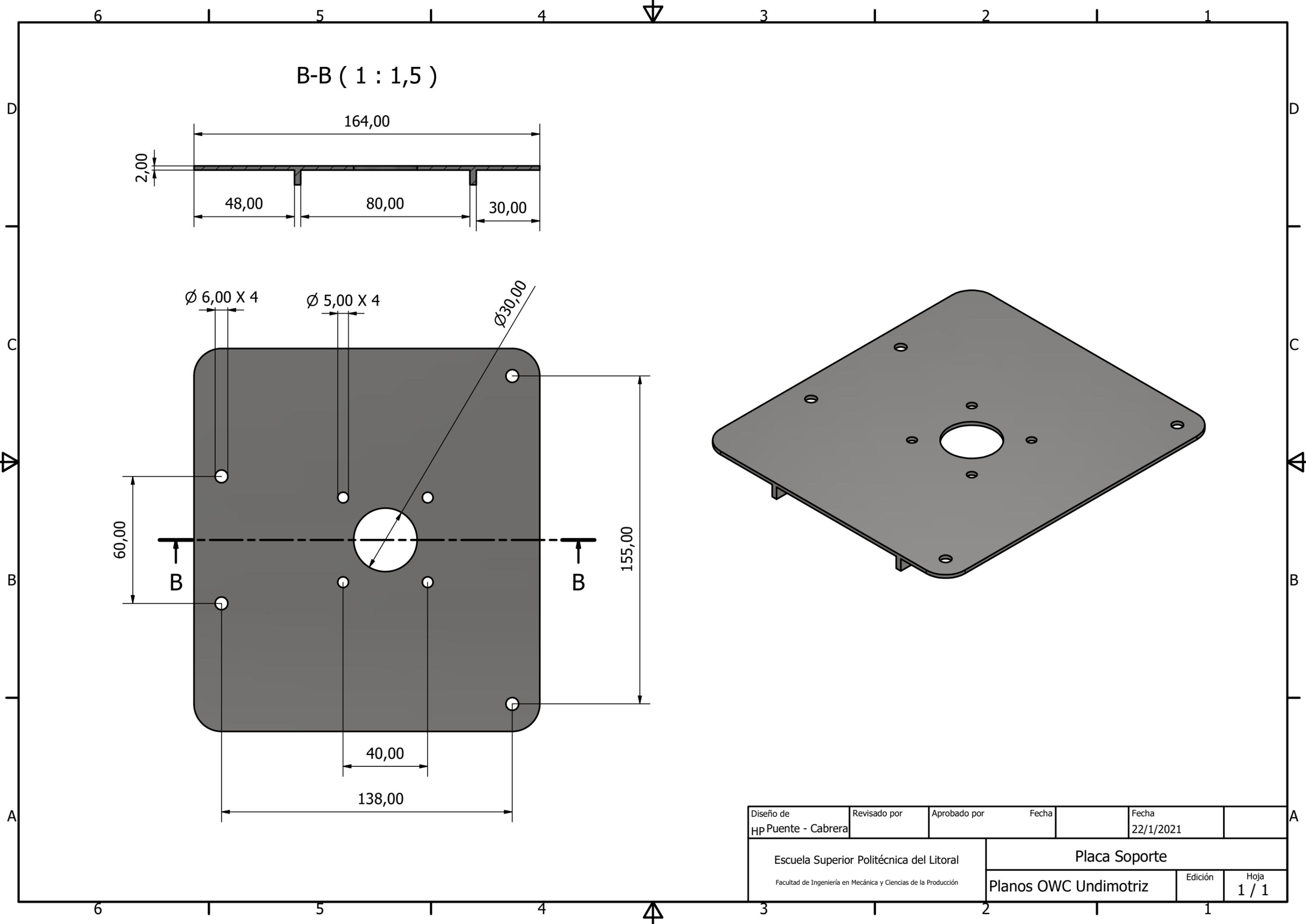
C-C ( 2 : 1 )



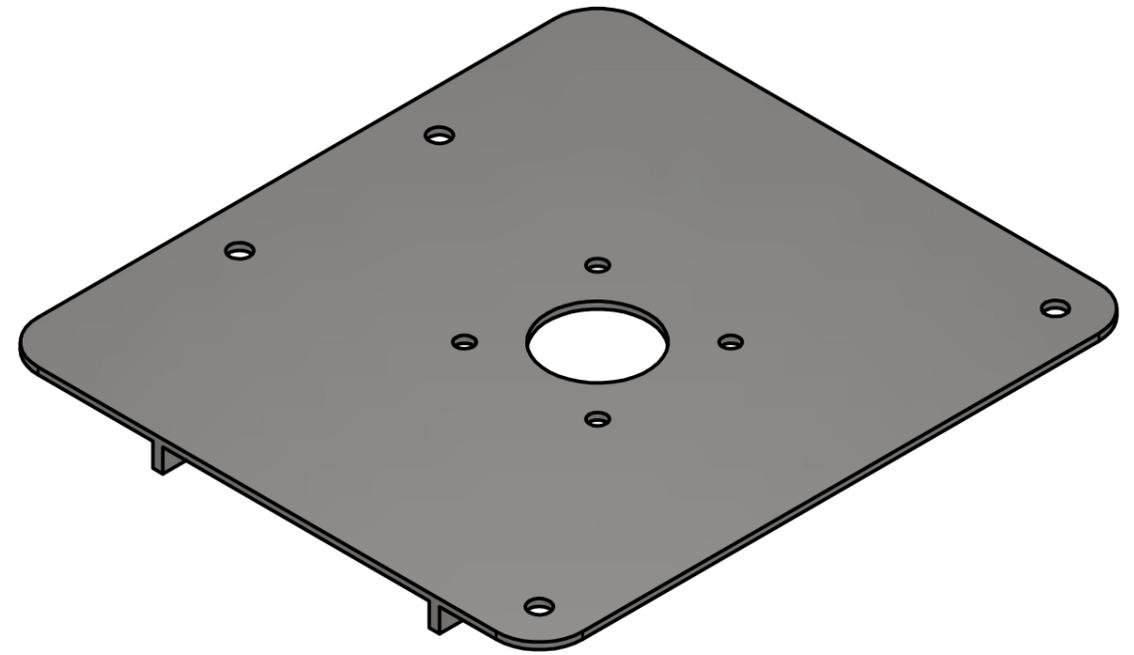
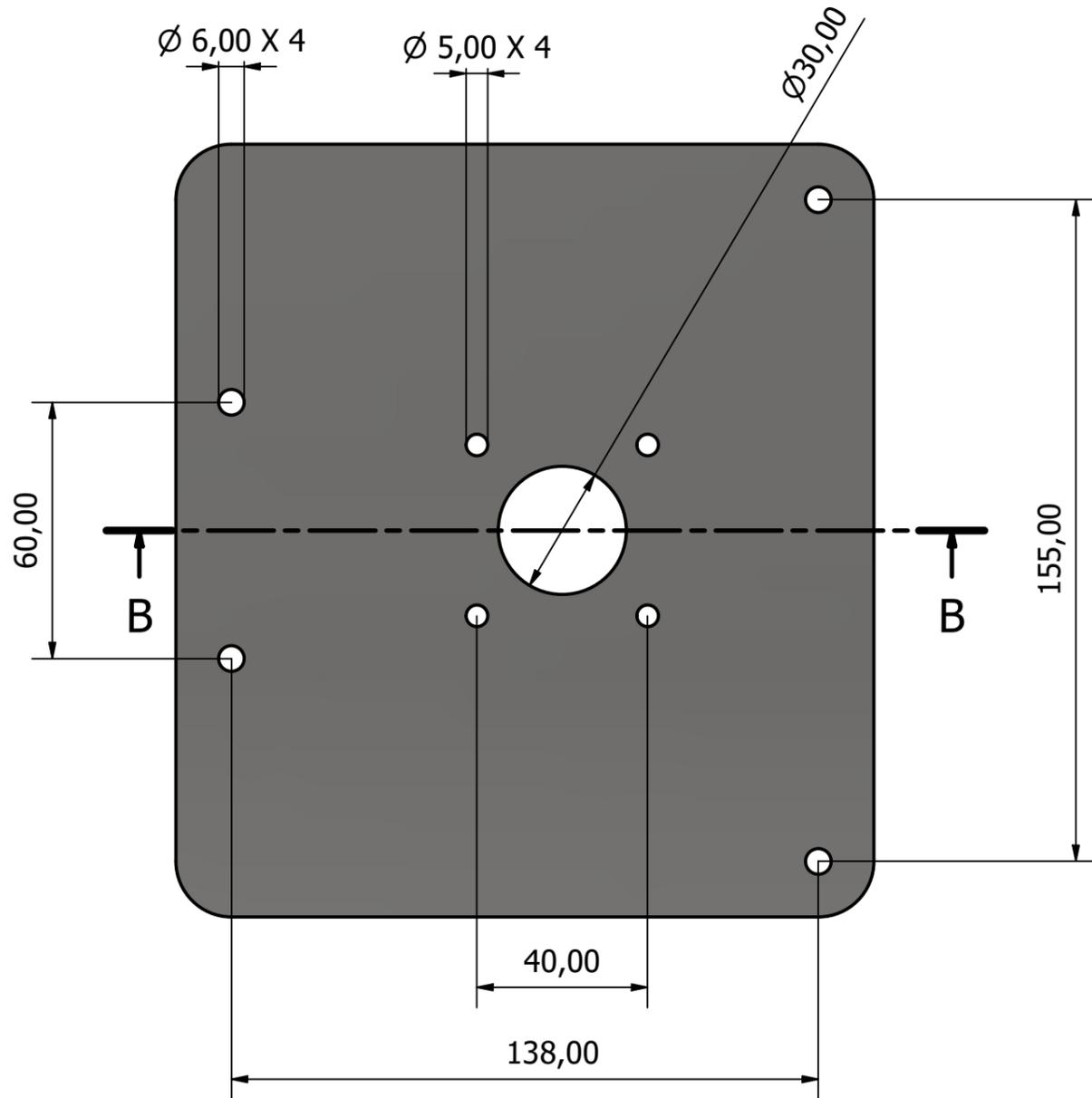
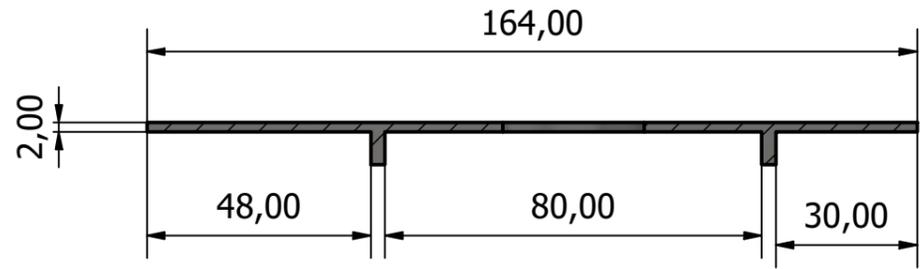
B-B ( 2 : 1 )



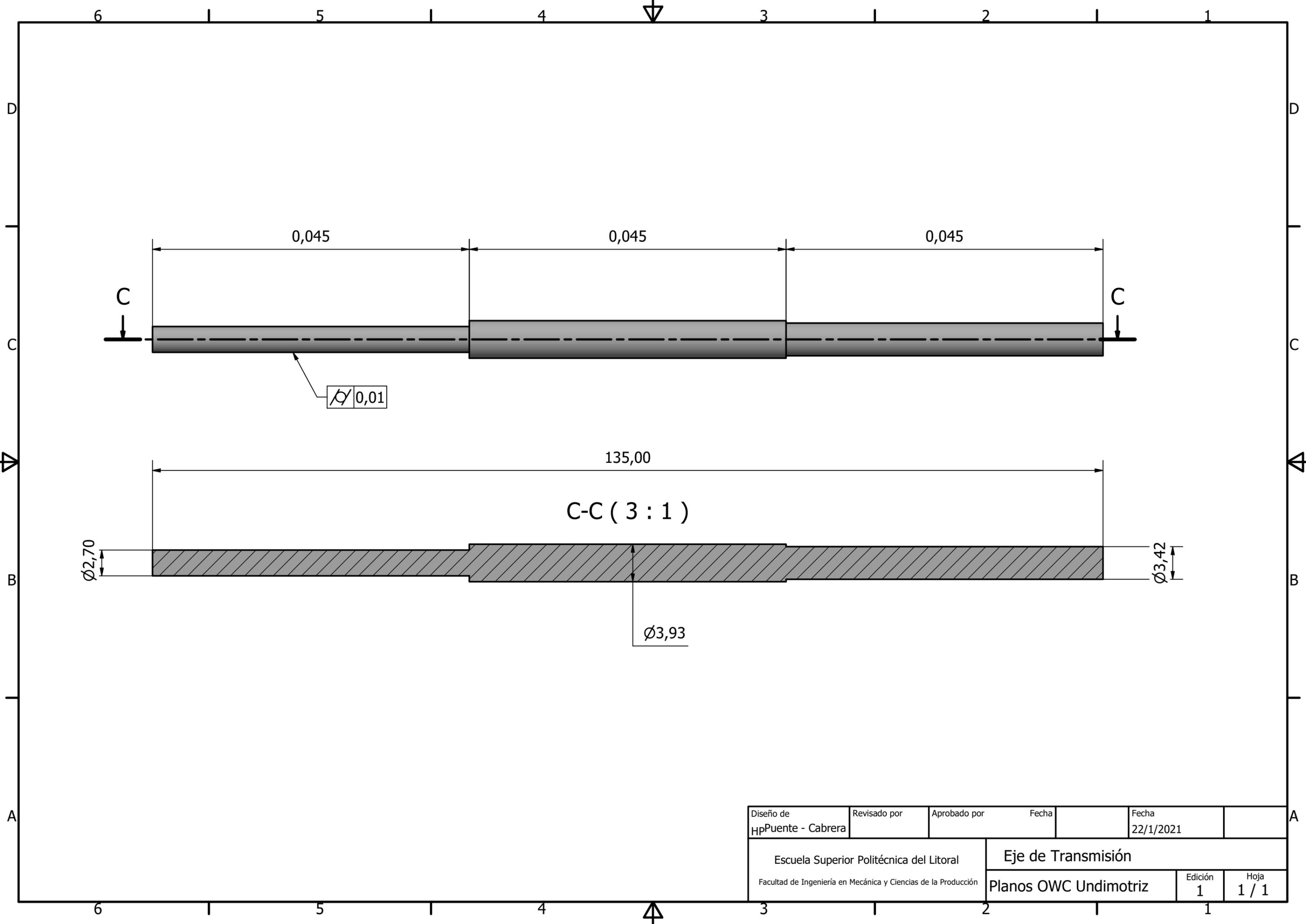
Diseño de HP Puente - Cabrera	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 22/1/2021
Escuela Superior Politécnica del Litoral Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción			Turbina Wells - NACA 0021	
Planos OWC Undimotriz			Edición	Hoja 1 / 1



B-B ( 1 : 1,5 )



Diseño de HP Puento - Cabrera	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 22/1/2021
Escuela Superior Politécnica del Litoral		Placa Soporte		
Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción		Planos OWC Undimotriz	Edición	Hoja 1 / 1



Diseño de HPuente - Cabrera	Revisado por	Aprobado por	Fecha	Fecha 22/1/2021
Escuela Superior Politécnica del Litoral			Eje de Transmisión	
Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción			Planos OWC Undimotriz	Edición 1
				Hoja 1 / 1