

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

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

“Diseño de un Prototipo Experimental de Generación Eléctrica Basado en
Energía Undimotriz”

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniera Mecánica

Presentado por:

Joselyn Andrea González Peñafiel

Magaly Carolina Roman Lino

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2020

DEDICATORIA

El presente proyecto está dedicado primero a Dios, por darme la fortaleza para salir adelante día a día.

A mis padres Alexandra y Webster, quienes me han acompañado y apoyado a lo largo de toda mi vida estudiantil.

A mis tíos, hermano y mi abuelita Marthita, por siempre darme palabras de aliento cuando más lo necesitaba.

A Christian por acompañarme y hacer de mi etapa universitaria una de las mejores.

Joselyn González Peñafiel

Dedico este Proyecto a mi familia, principalmente a mis Padres Dikson Y Aurora, quienes han sido pilar fundamental en este caminar, por su ayuda y amor incondicional.

A mis hermanos y amigos que han sido parte del proceso, por su apoyo en todo momento a pesar de las circunstancias.

Magaly Roman Lino

AGRADECIMIENTO

Agradezco primero a Dios, por darme salud y paciencia para culminar mi carrera universitaria. A mi familia por su apoyo y amor. A Christian por su cariño y por siempre recordarme de lo que soy capaz. A la familia Arellano Torres por abrirme las puertas de su casa siempre que lo necesitaba. A todos los amigos que conocí en la ESPOL por su paciencia y por acompañarme en las largas jornadas de estudio.

Joselyn González Peñafiel

Agradezco a Dios, por guiar mis pasos para alcanzar esta meta, y en el proceso darme salud, sabiduría, y fortaleza.

A mis padres por ser un pilar fundamental en mi desarrollo, por siempre darme palabras de aliento para no desfallecer. A mis hermanos Roxana, Armando por acompañarme en el proceso, a mis Profesores y amigos que conocí en la Universidad, en especial a mi amiga Nathalie por siempre estar. Y a todos los que hoy ya no están, pero siempre estarán de corazón.

Magaly Roman Lino

Agradecemos al PhD. Juan Peralta y la PhD. Emérita Delgado por su guía en el desarrollo de este proyecto.

DECLARACIÓN EXPRESA

"Los derechos de titularidad y explotación, nos corresponde conforme al reglamento de propiedad intelectual de la institución; *Joselyn Andrea González Peñafiel* y *Magaly Carolina Román Lino* damos nuestro consentimiento para que la ESPOI 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"



Joselyn González Peñafiel



Magaly Roman Lin

EVALUADORES

EMERITA
ALEXANDR
A DELGADO
PLAZA

Firmado digitalmente
por EMERITA ALEXANDRA
DELGADO PLAZA
DN: cn=EMERITA ALEXANDRA
DELGADO PLAZA, c=EC,
o=SECURITY DATA S.A. 1,
ou=ENTIDAD DE
CERTIFICACION DE
INFORMACION
Motivo: Soy el autor de este
documento
Ubicación:
Fecha: 2021-02-17 21:48-05:00

Emérita Delgado Plaza, PhD.

PROFESOR DE LA MATERIA

JUAN
MANUEL
PERALTA
JARAMILLO

Firmado digitalmente por JUAN
MANUEL PERALTA JARAMILLO
Nombre de reconocimiento (DN):
c=EC, o=SECURITY DATA S.A. 1,
ou=ENTIDAD DE CERTIFICACION
DE INFORMACION,
serialNumber=280920183144,
cn=JUAN MANUEL PERALTA
JARAMILLO
Fecha: 2021.02.17 22:00:59 -05'00'

Juan Peralta Jaramillo, PhD.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

En la actualidad, estamos frente a un alarmante crecimiento de la contaminación ambiental. Por tanto, el presente trabajo, se centró en el diseño de un prototipo a escala laboratorio de un dispositivo convertidor de energía undimotriz de columna de agua oscilante, con el fin de incursionar en el desarrollo de nuevas alternativas energéticas y como un intento de disminuir el impacto ambiental producido por el uso indiscriminado de combustibles fósiles para la generación de energía. Para ello, se empleó una metodología que incluye tanto el diseño conceptual como de ensamblaje o “embodiment design” del dispositivo, en la cual se plantearon criterios para seleccionar la mejor alternativa con lo que se determinó que un dispositivo de columna de agua oscilante u OWC era el adecuado para cumplir con los requerimientos planteados; además, se incluyeron las ecuaciones y teorías aplicables para el estudio de las olas en aguas poco profundas. Posteriormente, se utilizaron los programas de dinámica de fluidos computacionales CFD de ANSYS y SolidWorks como herramientas para simular la interacción de las olas con el prototipo en un canal generador de olas, el cual sirvió como punto de partida para el dimensionamiento de los componentes que constituyen el dispositivo, ya que el mismo limitaba el volumen de trabajo disponible. A partir de los resultados obtenidos de las simulaciones, fue posible estimar parámetros como la velocidad para estimar la potencia eléctrica generada por el dispositivo. Como última instancia, se realizó el análisis de costos para la manufactura aditiva del prototipo.

Palabras Clave: Energía Undimotriz, OWC, Diseño, CFD.

ABSTRACT

Nowadays, we are facing an alarming growth in environmental pollution. Therefore, this work focused on the design of a laboratory-scale prototype of a wave energy converter device, to venture into the development of new energy alternatives and as an attempt to reduce the environmental impact produced by the indiscriminate use of fossil fuels for power generation. To this end, a methodology was used that includes both the conceptual and embodiment design of the device, in which criteria were raised to select the best alternative with which it was determined that an oscillating water column device or OWC was adequate to meet the requirements; In addition, the applicable equations and theories were included for the study of waves in shallow water. Subsequently, computational fluid dynamics or CFD software such as ANSYS and SolidWorks were used as tools to simulate the interaction of waves with the prototype on a wave-generating channel, which served as a starting point for sizing the components that make up the device, as it limited the available workload. From the results obtained from the simulations, it was possible to estimate parameters such as speed to estimate the electrical power generated by the device. As a last instance, cost analysis was performed for additive manufacturing of the prototype.

Keywords: Wave Energy, OWC, Design, CFD.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE PLANOS.....	XI
CAPÍTULO 1	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del Problema.....	2
1.2 Justificación del Proyecto	2
1.3 Objetivos	4
1.3.1 Objetivo General.....	4
1.3.2 Objetivos Específicos.....	4
1.4 Marco Teórico	4
1.4.1 Origen de la Energía de las Olas	4
1.4.2 Características de las Olas	4
1.4.3 Clasificación de las Olas.....	5
1.4.4 Potencial de la Energía de las Olas	6
1.4.5 Potencial Energético de la Ola Incidente.....	7
1.4.6 Energía Undimotriz	9
1.4.7 Tecnologías de Aprovechamiento.....	9
1.4.8 Sistemas de Transmisión de Potencia	12
1.4.9 Situación Actual	12
CAPÍTULO 2	16
2. Metodología	16
2.1 Metodología para el Diseño del Prototipo.....	16
2.1.1 Requerimientos y Restricciones del Diseño	17
2.2 Diseño del Sistema de Columna Agua Oscilante (OWC)	29
2.2.1 Componentes del sistema OWC.....	29
2.2.2 Diseño de Forma	30

2.2.3	Modelo Matemático General del Sistema.....	31
CAPÍTULO 3	39
3.	Resultados y Análisis	39
3.1	Introducción.....	39
3.2	Modelo del Canal Generador de Olas	39
3.2.1	Definición del Dominio y Mallado	39
3.2.2	Definición del Modelo Matemático y Condiciones de Borde	41
3.2.3	Resultados Obtenidos.....	43
3.2.4	Análisis de los Resultados	46
3.3	Modelo de la Cámara OWC	47
3.3.1	Metodología de Diseño y Simulación en SolidWorks	47
3.4	Dimensionamiento de la Turbina	59
3.5	Resultados Obtenidos	59
3.6	Análisis de Costos.....	61
CAPÍTULO 4	63
4.	Conclusiones y Recomendaciones	63
4.1	Conclusiones.....	63
4.2	Recomendaciones.....	64
BIBLIOGRAFÍA		
APÉNDICES		

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
INP	Instituto Nacional de Preinversión
REN21	Renewable Energy Policy Network for the 21st Century
IRENA	International Renewable Energy Agency
WEC	Wave Energy Converter
OWC	Oscillating Water Column
CFD	Computational Fluid Dynamics
VOF	Volume of Fluid
PLA	Ácido Poliláctico

SIMBOLOGÍA

m	Metros
mm	Milímetros
m ²	Metro Cuadrado
gr	Gramo
CO ₂	Dióxido de Carbono
C	Velocidad de onda
L	Longitud de onda
λ	Longitud de onda
H	Altura de onda
T	Período e onda
Cg	Velocidad de grupo
<i>h</i>	Profundidad
<i>k</i>	Número de onda
TW	Tera vatio
TWh	Tera vatio hora
W	Vatio
kW	Kilovatio
GW	Gigavatio
GWh	Gigavatio
Hs	Altura significativa de las olas
Te	Período energético o período del nivel cero
ω	Frecuencia
ρ	Densidad
g	Aceleración de la gravedad
Pola	Potencia entregada por la ola
Re	Número de Reynolds
V	Velocidad
D_h	Diámetro hidráulico
μ	Viscosidad del fluido
A_c	Área de la sección transversal
P	Perímetro

P	Presión
V_o	Velocidad de entrada
Z	Altura
E	Energía
h	Entalpía
σ	Solidez de la Turbina
h	Relación base-punta
AR	Relación de aspecto
τ_e	Espacio libre de la punta
τ	Relación de espesor
D_h	Diámetro de la base de la turbina
D_t	Diámetro hasta la punta de la turbina
b	Longitud de la superficie del perfil
c	longitud de la cuerda del perfil de la turbina
N	Número de aspas de la turbina
Q	Caudal
W	Trabajo
\dot{m}	Flujo másico
f	Frecuencia

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Características de una onda senoidal.	5
Figura 1.2 Parámetros de una onda senoidal.	7
Figura 1.3 Planta de LIMPET OWC de 500 KW, instalada en el año 2000 en Islay, Escocia, Reino Unido.	10
Figura 1.4 Esquema de un dispositivo tipo pendulo	10
Figura 1.5 Esquema de un dispositivo tipo canal ahusado	11
Figura 1.6 Dispositivos ubicados fuera de la costa.	11
Figura 1.7 Esquema en 3D del conjunto brazo, boya, y sistema electromecánico montado sobre una plataforma en el agua.	14
Figura 1.8 Modelo de generador de electricidad por inducción magnética	15
Figura 2.1 Diagrama de flujo de la metodología del diseño.	17
Figura 2.2 Esquema de los componentes de una OWC.	20
Figura 2.3 Esquema del prototipo atenuador.	21
Figura 2.4 Esquema de las alternativas de diseño planteadas	25
Figura 2.5 Sistema OWC	29
Figura 2.6 Diseño de forma de la cámara OWC.	30
Figura 2.7 Placa Curva.	31
Figura 3.1 Mallado del canal generador de olas.	40
Figura 3.2 Mallado de la interfaz entre aire y agua.	41
Figura 3.3 Esquema del canal generador de olas.	42
Figura 3.4 Características experimentales de las olas en el canal.	43
Figura 3.5 Contornos de Velocidad	44
Figura 3.6 Fracción de Volumen	44
Figura 3.7 Vectores de velocidad en $t=3.3$	44
Figura 3.8 Velocidad X vs Tiempo.	45
Figura 3.9 Velocidad Y vs Tiempo.	45
Figura 3.10 Velocidad vs Tiempo.	45
Figura 3.11 Mallado del modelo OWC.	49
Figura 3.12 Mallado del modelo OWC.	49
Figura 3.13 Dominio Computacional.	50
Figura 3.14 Esfuerzo de Von Mises sobre estructura.	51

Figura 3.15 Desplazamiento de la estructura.	51
Figura 3.16 Deformación unitaria de la estructura.	52
Figura 3.17 Factor de seguridad.....	52
Figura 3.18 Perfil de velocidad de la ola vs Tiempo	53
Figura 3.19 Velocidad de Salida vs Tiempo.	53
Figura 3.20 Potencia entregada por el Flujo.	55
Figura 3.21 Curva de Potencia Promedio Generada.	56
Figura 3.22 Simulación del agua dentro de la cámara.....	57
Figura 3.23 Fracción de Aire dentro de la cámara.....	58
Figura 3.24 Modelo de la Turbina Wells	59
Figura 3.25 Flujo aire a través de la turbina.	61

Figura B.1 Curva Caudal Volumétrico vs Tiempo.

Figura B.2 Velocidad X vs Tiempo.

Figura B.3 Velocidad Y vs Tiempo.

Figura B.4 Velocidad Entrada Promedio vs Tiempo.

Figura B.5 Velocidad Salida X vs Tiempo.

Figura B.6 Velocidad Salida Y vs Tiempo.

Figura B.7 Velocidad Salida Promedio vs Tiempo.

Figura B.8 Presión Total vs Tiempo.

Figura B.9 Fracción de Volumen de Agua subida.

Figura B.10 Fracción de Volumen de Agua bajada.

Figura B.11 Fracción de masa de aire.

Figura B.12 Velocidad Lateral Y.

Figura B.13 Curva Potencia vs Tiempo en función de la fracción másica de aire
 $0,95 \leq F \leq 0,96$.

Figura B.14 Curva Potencia vs Tiempo en función de la fracción másica de aire
 $0,97 \leq F \leq 0,98$.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Clasificación de las olas.	6
Tabla 1.2 Potencia obtenida de convertidores de energía undimotriz.....	13
Tabla 2.1 Tabla de puntuación.	19
Tabla 2.2 Comparación por pares de los criterios de selección.	20
Tabla 2.3 Escala de puntuación	22
Tabla 2.4 Matriz de selección de la mejor alternativa de diseño.	22
Tabla 2.5 Comparación por pares de los criterios de selección.	24
Tabla 2.6 Matriz de selección de la mejor alternativa de diseño.	26
Tabla 2.7 Comparación por pares de los criterios de selección.	27
Tabla 2.8 Matriz de Selección de la turbina.....	28
Tabla 2.9 Información del sistema WEC seleccionado.....	28
Tabla 2.10 Parámetros de una Turbina Wells.....	37
Tabla 3.1 Propiedades de los fluidos involucrados.....	41
Tabla 3.2 Condiciones de Borde.	42
Tabla 3.3 Condiciones de entrada de las olas.....	42
Tabla 3.4 Dominio Computacional y Objetivos de la Simulación.	50
Tabla 3.5 Velocidades Obtenidas.....	54
Tabla 3.6 Valores promedio de entalpía y Flujo másico.	54
Tabla 3.7 Potencia Promedio generada con diferentes fracciones de mezcla $F=1$ (aire); $F<1$ (mezcla aire-agua).....	55
Tabla 3.8 Resultados del dimensionamiento de la turbina.....	59
Tabla 3.9 Datos sección de cálculo.	60
Tabla 3.10 Valores de Velocidad y Caudal mínimos necesarios	60
Tabla 3.11 Potencia entregada al generador.....	61
Tabla 3.12 Análisis de Costos de la Cámara.....	62
Tabla 3.13 Análisis de Costos de la Turbina.	62
Tabla A.1 Velocidades en la entrada de la cámara.	
Tabla B.1 Objetivos de la simulación.	
Tabla B.2 Valores de entalpia y flujo másico de la simulación.	

ÍNDICE DE PLANOS

Plano 1 Entrada de la cámara del Captador de Energía Undimotriz

Plano 2 Cámara del Captador de Energía Undimotriz

Plano 3 Cámara del Captador de Energía Undimotriz

Plano 4 Columna de la cámara del dispositivo

Plano 5 Turbina Wells

Plano 6 Soporte para la turbina del dispositivo

Plano 7 Ensamblaje del Captador de Energía Undimotriz

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de generación de energía convencionales basados en combustibles fósiles representan en la actualidad una de las principales fuentes que contribuyen a la emisión de gases de efecto invernadero, lo que se ve reflejado en impactos negativos sobre el ambiente. Dentro de este contexto, el progreso continuo en el desarrollo de nuevas tecnologías incluyendo los sistemas de energías renovables han contribuido al fomento de la sostenibilidad energética. Adicionalmente en los últimos años estas tecnologías han adquirido un papel importante en los sistemas mundiales de electricidad, pues son sistemas basados en recursos energéticos renovables que su explotación puede realizarse con un mínimo impacto ambiental y pueden ser mecanismos que contribuyan la reducción de los gases de efecto invernadero.

En la actualidad el aporte proporcional de las energías renovables en la generación de electricidad se ha incrementado a nivel global, siendo al año 2019, el 27.3%. Sin embargo, hasta la fecha se sigue invirtiendo una cantidad considerable de recursos económicos hacia los modelos convencionales de generación de energía. El desarrollo en tecnología renovable crece cada día, pero estos tipos de energía varían constantemente de acuerdo con las condiciones climáticas por lo que se vuelven sistemas de generación inestables o fluctuantes, lo que dificulta en algunos casos su incorporación dentro de los modelos de producción de energía. (REN21, 2020)

La cantidad de agua que nos rodea ha despertado el interés en el estudio de la generación de energía proveniente del mar. Desde 1980, se ha investigado el desarrollo de la energía undimotriz, porque este tipo de energía renovable no genera emisiones de efecto invernadero, está presente de manera continua, tiene un potencial elevado, es predecible y su impacto ambiental es mínimo en comparación con otros tipos de energías renovables. Aprovechar la energía proveniente de las olas es un tema de investigación tecnológica que sigue en desarrollo para ser una energía competitiva. Nuestro país actualmente está en búsqueda de este tipo de tecnología para desarrollo de modelo de factibilidad. (J. Fernández, 2008)

1.1 Descripción del Problema

A nivel mundial, las consecuencias del calentamiento global hacen que la búsqueda de fuentes de energía diferentes a los combustibles fósiles sea cada vez más urgente. En las últimas décadas se ha tratado de atacar este problema mediante las fuentes de energía solar y eólica dándose a conocer sus limitaciones en cuanto a su disponibilidad, lo que hace imperativo el desarrollo de otras alternativas energéticas como es el caso de la energía undimotriz, la cual se centra en el potencial de energía física del océano. Sin embargo, la mayoría de los dispositivos de aprovechamiento energético del oleaje se encuentran en una etapa de investigación, lo que conlleva a que no existan prototipos a escala industrial para aplicaciones en zonas donde el potencial de la ola se puede considerar relativamente bajo.

Dentro de los aspectos que se considerarán para atacar la problemática del proyecto se encuentran: aspectos ambientales, económicos, sociales, de seguridad e infraestructura.

1.2 Justificación del Proyecto

Debido a las consecuencias del aumento de gases de efecto invernadero a lo largo de los últimos años, se han explorado alternativas para disminuir sus emisiones, siendo el uso de las energías renovables una de las principales alternativas de mecanismos de mitigación hoy en día. En este marco, las energías provenientes de las olas resultan un recurso interesante de explotación, sin embargo, las dificultades en el diseño de elementos sometidos a cargas cíclicas y la posterior conversión del movimiento dependiente de las condiciones del entorno, hacen necesario el estudio de sistemas y modelos a escala con el fin de optimizar la generación de energía. El presente proyecto, forma parte de las actividades de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), para fomentar el desarrollo de sistemas tecnológicos renovables, innovando sobre todo en fuentes renovables no tradicionales. A continuación, se detallan los aspectos que se considerarán para el desarrollo del proyecto:

Aspectos ambientales: El desarrollo de sistemas de energía renovable, disminuirá las emisiones de gases de efecto invernadero, las cuales son la principal causa del calentamiento global.

Aspectos económicos: El fomento de generación energética distribuida por medio de las olas, contribuirá al impulso socio productivo de las comunas pesqueras locales.

Infraestructura: El escalamiento industrial de estos prototipos facilitará el acceso a la energía contribuyendo al desarrollo de la infraestructura local.

Aspecto Social: El desarrollo de sistemas distribuidos de energía renovable, contribuye de manera directa a mejorar la calidad de vida de las comunidades, principalmente por la cercanía de los sistemas, facilitando el acceso a la electricidad.

Seguridad: El prototipo cumplirá parámetros de seguridad ocupacional durante la operación y el proceso de generación de electricidad.

El proyecto se alinea con los siguientes objetivos de desarrollo sostenible:

Objetivo N°7: Energía limpia y no contaminante, este proyecto se basa en generación de electricidad proveniente de energía de las olas, por lo que es una fuente de energía renovable sin emisiones de gases de efecto invernadero, con suficiente potencial para satisfacer las necesidades energéticas mundiales.

Objetivo N°9: Industria, innovación e infraestructura, la energía undimotriz es considerada como una industria emergente en etapa de investigación y desarrollo tecnológico, por lo que, constantemente se está buscando mejoras en su diseño, para permitir que su implementación sea factible.

Objetivo N°13: Acción por el clima, la energía undimotriz, es una energía marina renovable sin emisiones de CO₂, con la que se pretende generar energía limpia y así combatir el cambio climático y sus efectos.

Objetivo N°14: Vida submarina, la energía undimotriz, al ser energía proveniente de las olas, utiliza océanos y mares para el desarrollo sostenible.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Diseñar un prototipo a escala de laboratorio empleando criterios de ingeniería, que permita la generación de electricidad a través de la energía undimotriz.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Desarrollar el diseño de un dispositivo considerando el movimiento de olas en zonas costeras del Ecuador.
- Realizar un correcto dimensionamiento de los componentes del prototipo de acuerdo con los requerimientos y restricciones de diseño.
- Desarrollar simulaciones del comportamiento del prototipo, empleando programas computacionales de ingeniería.
- Seleccionar materiales adecuados para la manufactura aditiva del prototipo.

1.4 Marco Teórico

1.4.1 Origen de la Energía de las Olas

En la dinámica de fluidos, se le llama ola de viento u ola generada por el viento, a todo tipo de oscilación periódica producida en la superficie de cuerpos de agua. El calentamiento desigual de las superficies marinas y terrestres de la tierra, producen regiones de altas y bajas presiones, generando flujos o desplazamientos de aire, lo que se conoce como viento. Por tanto, se suele decir que el viento es una forma indirecta de energía solar (Neill & Hashemi, 2018). En este sentido, se podría concluir que las olas constituyen una forma de almacenamiento de energía solar en la superficie de los océanos, la cual es transmitida sobre el agua por acción del viento.

1.4.2 Características de las Olas

Ciertos factores como el tamaño de las olas, la velocidad a la que viajan y como rompen en la costa, se definen por características como: longitud de

onda, L , altura de onda, H , y el período T , con las cuales se caracterizan también ondas senoidales como se muestra en la *Figura 1.1*. La longitud de onda es la distancia entre dos crestas consecutivas; la altura de onda se refiere a la diferencia en altura entre una cresta y un valle; y el período es el tiempo en segundos que una longitud de onda tarda en pasar por un punto dado. La amplitud es la distancia desde el centro de la onda hasta el fondo de un valle. (James & Stull, 2016)

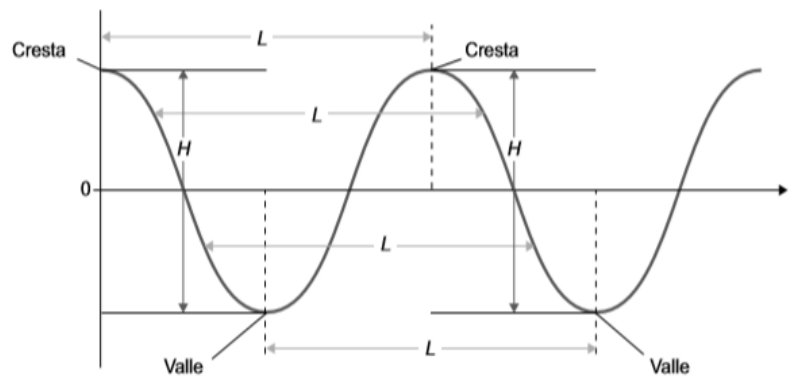


Figura 1.1 Características de una onda senoidal.
[González et al., 2009]

En realidad, la capa superficial del océano se compone de una superposición de ondas con características propias, es decir, su propia longitud de onda, período, amplitud, etcétera.

1.4.3 Clasificación de las Olas

Las Olas se clasifican por su relación de tamaño, profundidad y velocidad, estos factores definen su potencial energético. La velocidad de propagación c de una ola viene dada por el cociente entre la longitud de onda L y el período T ,

$$c = \frac{L}{T} \quad (1.1)$$

El océano, no se compone de ondas senoidales puras, sino de una superposición de varias ondas, cada una con características propias, y es esta combinación lo que se observa en la superficie del mar (Carta González et al., 2009). La velocidad a la cual un grupo de olas viaja, no es la misma a la cual olas individuales viajan, y se denomina velocidad de

grupo c_g (Horko, 2007). En la tabla 2.4, se detalla la clasificación de las olas por su relación de tamaño, profundidad y velocidad.

Tabla 1.1 Clasificación de las olas.
[Manual de Protección Costero, US Army Corps, 1984]

Clasificación	Profunda	Transición	Somera
Velocidad de fase, c	$\frac{gT}{2\pi}$	$\frac{gT}{2\pi} \tanh(kh)$	\sqrt{gh}
Velocidad de grupo, c_g	$\frac{L}{2T} = \frac{c}{2}$	$\frac{L}{2T} \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right]$	c
Límite de aplicación, $\frac{h}{L}$	$> \frac{1}{2}$	$\frac{1}{25} < \frac{h}{L} < \frac{1}{2}$	$< \frac{1}{25}$

En donde:

k : Número de onda

h : Altura desde el fondo marino hasta la superficie del agua.

1.4.4 Potencial de la Energía de las Olas

La energía de las olas oceánicas es enorme, sin embargo, se encuentra limitado a las zonas costeras o cercanas a ellas, ya que los dispositivos de aprovechamiento fuera de la costa aún se encuentran en fase de desarrollo y comercialización. Se estima que el potencial energético mundial es de aproximadamente 3.7 TW y la energía anual generable de 17500 TWh/año, no obstante, la exclusión de áreas con muy baja energía ($P \leq 5 \text{ kW/m}$) y áreas impactadas por el hielo marino, limitan el recurso explotable a un 20% de disponibilidad máxima. (Mørk et al., 2010a)

La potencia total de cada metro de frente de ola del mar irregular es la suma de las potencias de todos sus componentes. Ya que no es posible medir todas las alturas de períodos de ondas independientemente, se utiliza una media. Por tanto, en un mar irregular típico, la potencia media total, en kW/m, está dada por la ecuación 1.1. En donde, H_s , es la altura significativa de las olas, y T_e , es el período energético o período del nivel cero. (Carta González et al., 2009)

$$P_s = 0,49 H_s^2 T_e \quad (1.2)$$

1.4.5 Potencial Energético de la Ola Incidente

Para describir el comportamiento de las olas del océano, en 1845 el astrónomo George Airy desarrolló la Teoría Lineal de las Ondas o también conocida como la Teoría de Airy. Esta teoría afirma que una ola puede ser modelada como una onda oscilante en forma senoidal, tal que la elevación de la superficie por encima de la superficie libre del mar está representada matemáticamente por (Kraemer & McCormick, 2019):

$$\eta(x, t) = \frac{H}{2} \cos(kx - \omega t) \quad (1.3)$$

Donde:

x = Distancia en la dirección a la que viaja la ola

t = Tiempo

H = Altura de la ola (De cresta a valle)

k = Número de ola, la cual se representa por la ecuación

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (1.4)$$

Donde:

L = Longitud de onda y

ω = frecuencia de la ola, dada por

$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (1.5)$$

Donde:

T = Período de la ola.

$$T = \frac{\lambda}{c} \quad (1.6)$$

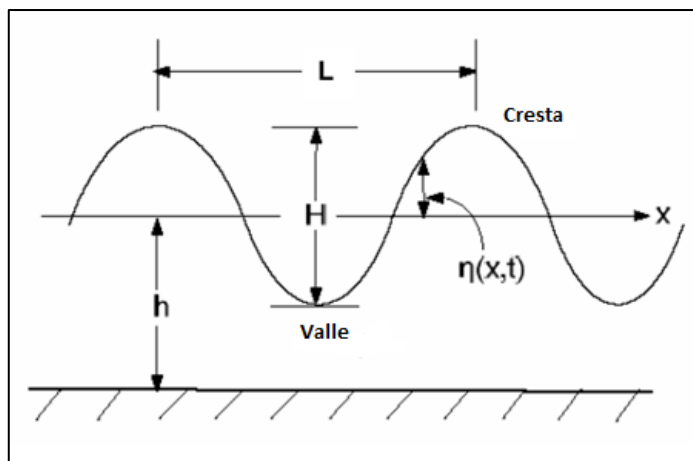


Figura 1.2 Parámetros de una onda senoidal.
[Horko, 2007]

Partiendo de estos parámetros, la potencia de una ola pasando por un plano vertical fijo de ancho b es (Kraemer & McCormick, 2019):

$$P = \frac{1}{8} \rho g H^2 b c_g \quad (1.7)$$

Donde:

ρ = Densidad de la masa de agua,

g = Aceleración de la gravedad,

c_g = Velocidad de grupo de una ola

Como se indicó anteriormente en la tabla 1.1, la velocidad de grupo para aguas someras está dada por,

$$c_g = c = \sqrt{gh} = g^{1/2} h^{1/2} \quad (1.8)$$

Por tanto, la potencia por ancho de cresta de una ola en agua somera es,

$$P = \frac{1}{8} \rho g H^2 b g^{1/2} h^{1/2} \quad (1.9)$$

Reduciendo términos,

$$P = \frac{1}{8} \rho g^{3/2} H^2 h^{1/2} b \quad (1.10)$$

Hasta este punto, se ha dirigido el análisis para olas de una sola frecuencia, las cuales se conocen como olas regulares, pero en realidad el océano está compuesto de una superposición de olas con direcciones y frecuencias diferentes, es decir olas irregulares. Para esto, se define una altura de ola significativa H_s , la cual corresponde a la altura promedio de la tercera parte de las olas más altas en un registro de medición (Kraemer & McCormick, 2019). Se puede relacionar la altura significativa y la altura de la ola como un valor cuadrático medio, de la siguiente manera (Rodríguez & Caicedo, 2019).

$$H^2 = \frac{H_s^2}{2} \quad (1.11)$$

De tal manera que la ecuación de potencia por ancho de cresta de ola en agua somera ($\frac{h}{L} < \frac{1}{25}$) queda expresada por:

$$P_{ola} = \frac{1}{16} \rho g^{3/2} H_s^2 h^{1/2} b \quad (1.12)$$

1.4.6 Energía Undimotriz

La energía undimotriz, es la captura de energía del movimiento de las olas por acción del viento, con el fin de realizar un trabajo útil. Cabe considerar, por otra parte, que este tipo de energía es similar a la energía eólica y en contraste con la energía de las mareas, la energía de las olas es una forma estocástica de generación de electricidad, ya que cualquier planeación a largo plazo, se debe basar en tendencias estadísticas como la variabilidad estacional, siendo este, uno de los desafíos para su implementación (Neill & Hashemi, 2018). Sin embargo, la energía de las olas tiene una alta densidad de potencia, e incluso, aunque el límite explotable sea solo de alrededor del 20%(Mørk et al., 2010b), esta es muy grande en comparación con el consumo actual de electricidad mundial, por lo que, actualmente sigue siendo un tema de mucho interés y desarrollo tecnológico.

1.4.7 Tecnologías de Aprovechamiento

Existen diferentes tipos de dispositivos convertidores de energía para el aprovechamiento energético del recurso del mar. Actualmente, se estima que existen más de mil patentes de dispositivos, los cuales pueden ser clasificados en dos grandes grupos: Dispositivos ubicados en la costa o su cercanía y dispositivos ubicados fuera de la costa (Carta González et al., 2009).

1.4.7.1 Dispositivos Ubicados en la Costa o su Cercanía

Este tipo de dispositivos de estructura fija se anclan al fondo del mar o en la costa, de manera que la estructura principal no se mueve, sin embargo, disponen de elementos que se mueven respecto de ella por acción de las olas, convirtiendo la energía del oleaje en energía mecánica, que posteriormente es transformada en energía eléctrica. Entre este tipo de sistemas se encuentran (Carta González et al., 2009):

Columnas Oscilantes de Agua

Las columnas de agua oscilantes, OWC por sus siglas en inglés, consisten en una estructura hueca, parcialmente sumergida, que está

abierta al mar por su parte inferior (Figura 1.3), encerrando aire en la parte superior de una columna de agua (Carta González et al., 2009). Las olas hacen que esta columna suba y baje, actuando como un pistón, comprimiendo y descomprimiendo el aire, el cual es canalizado por una turbina para generar electricidad. (Neill & Hashemi, 2018)



Figura 1.3 Planta de LIMPET OWC de 500 KW, instalada en el año 2000 en Islay, Escocia, Reino Unido. [Falcão & Henriques, 2016]

Alerones Oscilantes

Consisten en una puerta articulada en su parte superior y que se encuentra conectada con un cilindro hidráulico. La energía de las olas se extrae cuando éstas mueven la puerta y ésta, a su vez, acciona al cilindro hidráulico. El dispositivo más conocido de este tipo es el denominado Pendulor (Figura 1.4). (Carta González et al., 2009)

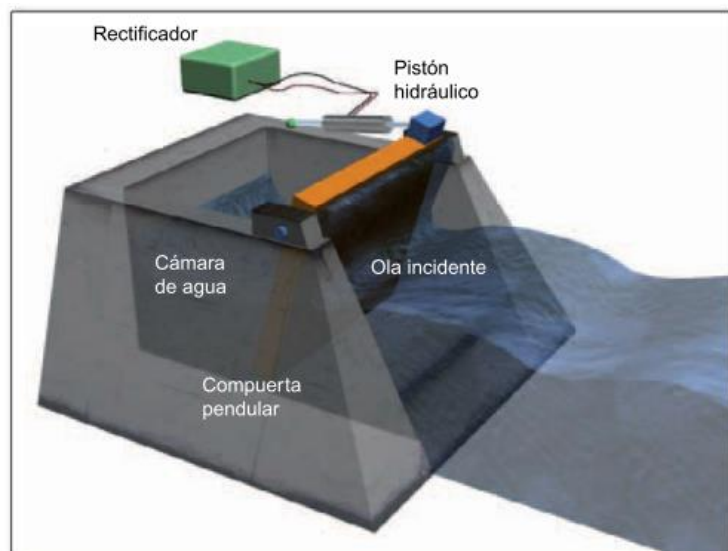


Figura 1.4 Esquema de un dispositivo tipo Pendulor. [Carta González et al., 2009]

Canales Ahusados

Los dispositivos que utilizan este principio se sitúan en la línea de costa y cuenta con una estructura construida en un canal que concentra las olas, conduciéndolas a un depósito elevado (Figura 1.5). Estos dispositivos usan y amplifican la altura de una ola para accionar una turbina y generar electricidad (Carta González et al., 2009).

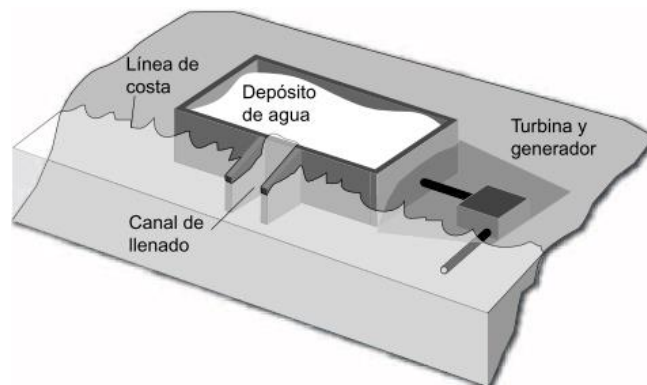


Figura 1.5 Esquema de un dispositivo tipo canal ahusado. [Carta González et al., 2009]

1.4.7.2 Dispositivos Ubicados Fuera de la Costa

Este tipo de dispositivos, son fundamentalmente aparatos flotantes que necesitan disponer de un armazón estable de soporte. Existen diversos diseños, los cuales se pueden agrupar en categorías como se muestra en la Figura 1.6.

DISPOSITIVOS UBICADOS FUERA COSTA

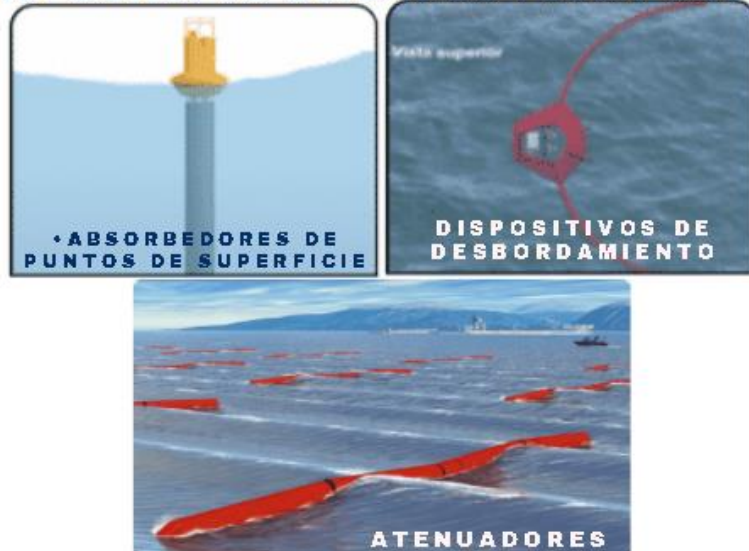


Figura 1.6 Dispositivos ubicados fuera de la costa. [Celis, 2015]

1.4.8 Sistemas de Transmisión de Potencia

En un sistema undimotriz para lograr un mejor aprovechamiento del recurso se debe incorporar el sistema de un diseño de potencia mecánica. El sistema dinámico debe aprovechar todas las condiciones de entrada para tener una salida unidireccional, de forma que aproveche el recurso en su totalidad. (Alejandro et al., 2019)

Sistema Transmisión Mecánica

Este sistema de Transmisión considera el uso de energía potencial y cinética, y corresponde a los sistemas de mayor uso en la tecnología de conversión de energía. La transmisión mecánica aprovecha la fuerza de las olas para el convertidor de energía undimotriz. Debido a que este sistema tiene a la entrada la fuerza de las olas, poca revolución y constante cambio de dirección, es que estos sistemas hacen uso de diferentes elementos mecánicos que permiten acoplarse a estas condiciones para tener una salida unidireccional, mayor velocidad angular y constante. (Alejandro et al., 2019)

Sistema de Transmisión Hidráulica

Este sistema aprovecha la energía potencial de un fluido para provocar el movimiento de un sistema. Debido a la presión hidrostática se genera la interacción oscilatoria del sistema con las olas del océano, generando una variación en la fuerza hidrostática. A partir de la de la teoría lineal se asume que los movimientos resultantes son de pequeña amplitud por lo que se ajusta con los sistemas undimotrices que tienen un movimiento que genera una amplitud pequeña, de forma que los efectos viscosos disipativos no sean dominantes en la dinámica del dispositivo. Este sistema usa el movimiento el agua que entra y sale de la bomba e impulsa un generador que produce la electricidad. Finalmente, la corriente eléctrica se transmite a tierra mediante un cable submarino. (Pecher, 2017)

1.4.9 Situación Actual

El desarrollo de la energía oceánica se ha concentrado principalmente en Europa, por ejemplo, en el caso de los dispositivos de corrientes de marea

se ha logrado generar hasta 15 gigavatios-hora (GWh) en 2019 (50% más que en 2018). Sin embargo, el poder del océano ha venido ganando impulso en Canadá, Estados Unidos y China, que ofrecen un generoso apoyo a los ingresos de investigación y programas de desarrollo. (REN21, 2020)

Por otra parte, en la tabla 1.1, se detalla el aporte de potencias obtenidas de convertidores de energía undimotriz por país instalados en el año 2013, se espera que con la nueva generación a instalarse en el periodo de 2022 a 2040 se logre alcanzar un rango de 2-10 GW de potencia instalada. (IRENA, 2014)

Tabla 1.2 Potencia obtenida de convertidores de energía undimotriz. [IRENA, 2014]

PAÍS	POTENCIA
Reino Unido	3.8 MW
Australia	1 MW
Portugal	400 kW
España	296 kW
Noruega	240 kW
Suecia	230 kW
China	220 kW
Italia	150 kW
EE. UU.	30 kW

Dentro del contexto sudamericano podemos mencionar, el proyecto piloto de la Universidad Tecnológica Nacional de Buenos Aires donde están desarrollando un mecanismo de accionamiento para una máquina electromecánica transformadora de energía undimotriz en energía eléctrica, un proyecto en investigación y desarrollo tecnológico, el cual fue aprobado en patente 2019, como se observa en la (Figura 1.8) este equipo consta de un sistema flotante, por medio de una boya que capta la energía proveniente de las olas y la transforma en energía mecánica y posterior en eléctrica, mediante un brazo de palanca y un sistema electromecánico. La potencia que brinda el equipo es de 30kW por boya, pero se estima que

puede escalar a tamaños y potencias superiores. Se trabaja en la instalación de este proyecto en la ciudad de Mar de Plata, Argentina. (Carreras et al., 2019)

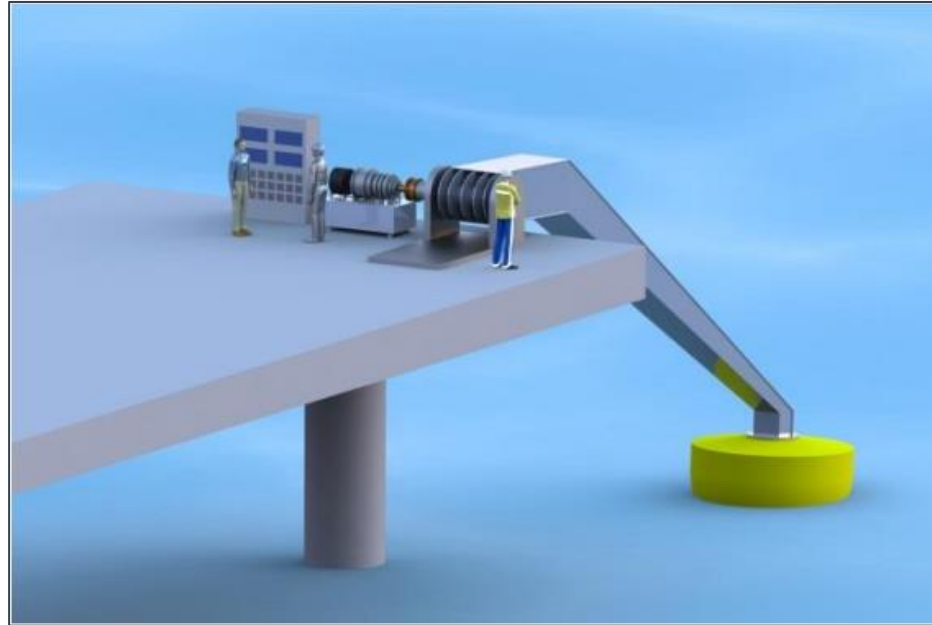


Figura 1.7 Esquema en 3D del conjunto brazo, boya, y sistema electromecánico montado sobre una plataforma en el agua. [Caso, 2017]

Así mismo, en Colombia se diseñó un prototipo que puede funcionar en cualquier posición y desplazamiento de ondas en zonas lejos de la costa (Offshore), se basó en un estudio realizado en el litoral brasilero por Jonas Takeo Carvalho, PhD; se observa (Figura 1.9) el sistema propone un diseño de generador eléctrico cuyo principio de funcionamiento es el movimiento lineal de un solenoide que está en el interior de una boya flotante a través de un imán que hace parte del eje de la boya. Este desarrollo se espera que pueda trabajar para las diferentes estaciones del año, pudiendo captar el 99.9% de la energía disponible (Caso, 2017).

Actualmente en Ecuador, la energía oceánica no ha sido explotada en ninguna de sus variables y no se encuentra dentro de proyectos de desarrollo tecnológico en nuestro país; los pocos estudios existentes, están asociados al estudio del potencial energético del mar y su aplicabilidad en el territorio costanero. El principal documento relacionado es el *Estudio de la Energía de las olas, corrientes y energía cinética de Ríos en Ecuador*

para la *generación Eléctrica* del INP, el cual provee información referencial asociada al potencial energético promedio de 14kW/m disponible de la energía de las mareas, por medio de este estudio se indica que el mar territorial ecuatoriano tiene condiciones favorables para la conversión de la energía del oleaje por las características de sus corrientes, sin embargo, la tecnología mundial existente actualmente no podría ser aplicada porque no considera la bidireccionalidad de las corrientes de marea que afectan las costas ecuatorianas (Instituto Nacional de Preinversión, 2013).

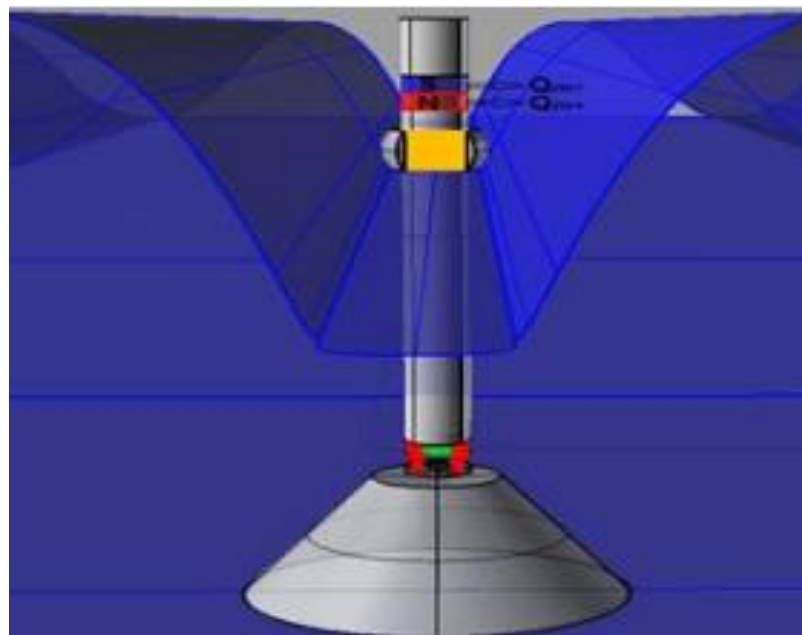


Figura 1.8 Modelo de generador de electricidad por inducción magnética. [Caso, 2017]

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

El presente capítulo describe como se desarrolló el diseño de un sistema prototipo que permita el fomento y la divulgación del aprovechamiento de la energía undimotriz y su posible aplicación en zonas costeras del Ecuador. Para ello, se dimensionó el prototipo a escala de laboratorio con el fin de estimar la densidad de potencia teórica, simulando bajo condiciones existentes en las olas del mar por medio de un canal hidráulico. Por otra parte, el diseño consideró valores referenciales de desplazamiento del viento y tiempo que recorre la superficie de la ola dentro del sistema de captación de energía undimotriz.

Es importante recalcar que “La energía que una ola adquiere depende, básicamente, de la intensidad del viento que sopla sobre la superficie del océano, del tiempo en que el viento está soplando y del alcance o superficie sobre la cual sopla el mismo” (González et al., 2009).

2.1 Metodología para el Diseño del Prototipo

Para el diseño del prototipo, se utilizó la metodología de las actividades de diseño, la cual cuenta tanto con el diseño conceptual como el diseño del ensamblaje. En el esquema de la figura 2.1, se detalla un diagrama de flujo de la metodología utilizada para el desarrollo del proyecto.

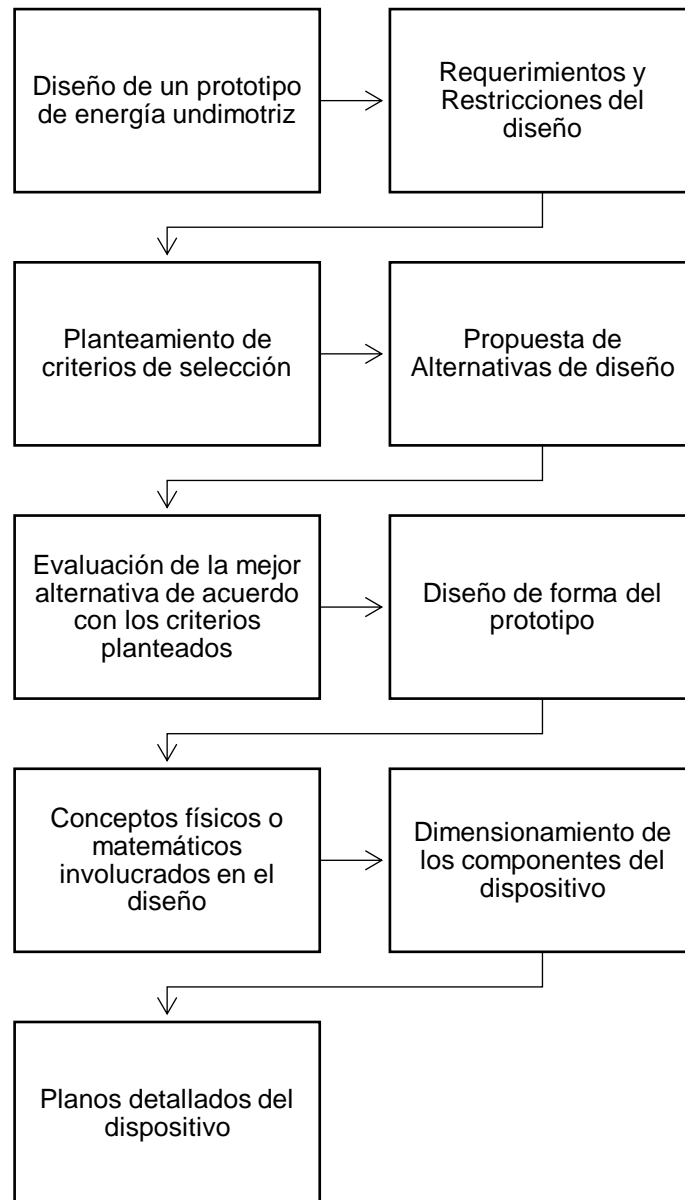


Figura 2.1 Diagrama de flujo de la metodología del diseño.
[Elaboración Propia]

2.1.1 Requerimientos y Restricciones del Diseño

Con relación al clima de oleaje de la zona se estableció como valor referencial la moda del potencial energético y la velocidad promedio existente en el estudio de la energía de olas, corrientes y energía cinética de ríos en el Ecuador para generación eléctrica del Instituto Nacional de Preinversión (Instituto Nacional de Preinversión, 2013).

Para el desarrollo del diseño se consideraron los siguiente requerimientos y restricciones:

- El prototipo deberá ser capaz de convertir la energía de las olas a energía mecánica, obteniendo como salida un eje de rotación estándar para la medición de potencia.
- Las dimensiones del prototipo estarán limitadas por el canal hidráulico, el cual tiene una sección transversal de 309 X 450 mm y una longitud de 10 m.

2.1.1.1 Criterios de Selección y Planteamiento de Alternativas para el Diseño del Sistema de Aprovechamiento de Energía de las Olas

Para la selección del tipo de dispositivo, se partió de los requerimientos de diseño, y se establecieron los criterios para la selección de la mejor alternativa de modelo convertidor de energía de olas (WEC por sus siglas en inglés), las cuales se detallan a continuación.

2.1.1.2 Criterios de Selección y Planteamiento de Alternativas del Tipo de Dispositivo WEC

Criterios de Selección

- 1. Facilidad incrementar energía cinética de las olas:** Accesibilidad de implementar modelos o accesorios que permitan variar el flujo agua, de forma que permitan aprovechar toda la fuerza de la ola en el impacto.
- 2. Mecanismo de transferencia mecánica de movimiento:** Dentro de esta variable interviene la complejidad tecnológica que presenta el prototipo en los equipos para convertir la energía.
- 3. Ubicación del sistema de generación eléctrica:** En esta variable se analiza la ubicación del sistema de generación de energía con respecto al sistema mecánico y que tan factible es su instalación.
- 4. Manufactura:** Se refiere a la disponibilidad local de los materiales adecuados para la fabricación y montaje, según las condiciones de dimensiones que debe tener el prototipo de laboratorio.
- 5. Costo:** Contempla el análisis de costos de los materiales requeridos para la fabricación del prototipo.

6. Mantenimiento: Se evalúa la frecuencia y facilidad de realizar mantenimientos periódicos al sistema.

A partir de los criterios descritos anteriormente, se plantearon dos alternativas de diseño, las cuales se analizaron para determinar qué tipo de WEC se asemejaba con los requerimientos y restricciones del diseño. A pesar de que la energía undimotriz sigue siendo un tópico relativamente nuevo en la actualidad, se consideró alternativas cuyas tecnologías han sido bastante estudiadas y puestas en práctica, con el fin de obtener la mayor cantidad de información. Posteriormente, se procedió a analizar cada una de ellas para realizar una comparación por pares con base a la tabla de puntuación 2.1, con el fin de definir los pesos relativos o ponderaciones adecuadas de cada uno de los criterios.

Tabla 2.1 Tabla de puntuación.
[Gutiérrez-Guzmán et al., 2012]

Escala numérica	Escala verbal
9	Extremadamente más importante
7	Fuertemente más importante
5	Notablemente más importante
3	Levemente más importante
1	Igualmente importantes
1/3	Levemente menos importante
1/5	Notablemente menos importante
1/7	Fuertemente menos importante
1/9	Extremadamente menos importante

Tabla 2.2 Comparación por pares de los criterios de selección. [Elaboración Propia]

	Criterios	1	2	3	4	5	6	Total	Pesos relativos
1	Facilidad incrementar energía cinética de las olas	1	1/5	5	7	5	3	21,20	27%
2	Mecanismo de transferencia mecánica de movimiento	5	1	7	1/5	1/5	3	16,40	21%
3	Ubicación del sistema de generación eléctrica	1/5	1/7	1	5	1/3	5	11,68	15%
4	Manufactura	1/7	5	1/5	1	3	3	12,34	16%
5	Costo	1/5	5	3	1/3	1	5	14,53	19%
6	Mantenimiento	1/3	1/3	1/5	1/3	1/5	1	2,40	3%
Total								78,55	100%

Alternativas de Selección de Tecnología:

Alternativa 1: Dispositivo de Columna de Agua Oscilante

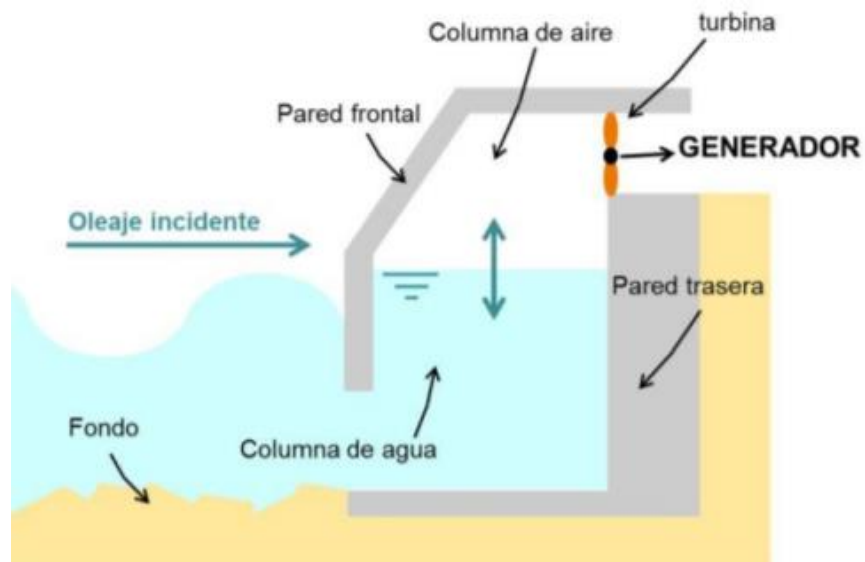


Figura 2.2 Esquema de los componentes de una OWC. [L. Fernández, 2017]

El prototipo de columna de agua oscilante consta de una cámara de aire semisumergida, cuando las olas actúan sobre el aparato, hacen que la columna suba y baje, comprimiendo y descomprimiendo el aire (Carta González et al., 2009). Usualmente la energía es extraída a través de una turbina auto rectificadora, la que es conectada a un generador para así obtener energía eléctrica.

Alternativa 2: Dispositivo Atenuador

Este prototipo consta de una serie de flotadores acoplados a brazos móviles, los cuales son instalados a lo largo de estructuras como muelles; estos flotadores son elevados por acción de las olas y este movimiento, comprime y descomprime pistones hidráulicos, accionando el sistema óleo-hidráulico, el cual está conectado a un generador para producir electricidad.

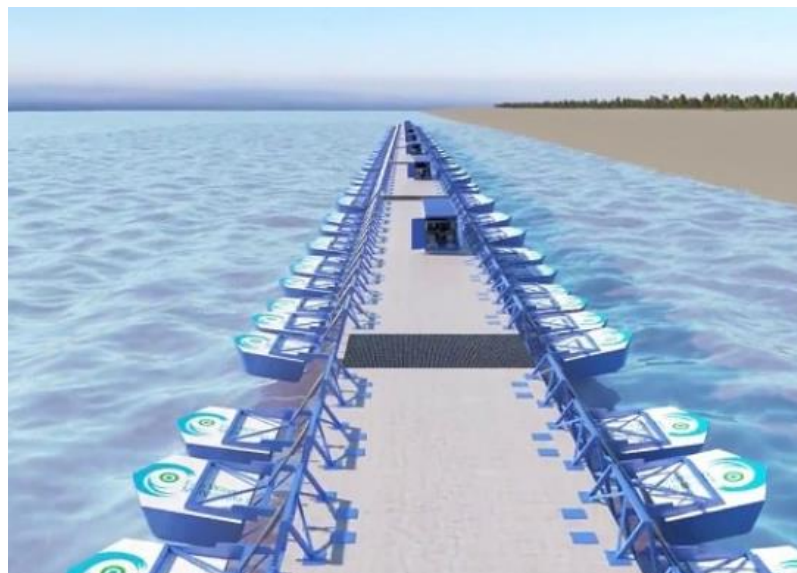


Figura 2.3 Esquema del prototipo atenuador.
[Eco Power Wave,2012]

Con los pesos obtenidos, se compararon las alternativas planteadas y se asignó una segunda puntuación según la tabla 2.3 y así fue posible determinar que alternativa alcanzaba la puntuación más alta para seleccionarla como la que más se adaptaba a los requerimientos.

Tabla 2.3 Escala de puntuación.
[Ortiz & Gallardo, 2019]

Escala numérica	Escala verbal
5	Muy Alto
4	Alto
3	Medio
2	Bajo
1	Muy Bajo

Tabla 2.4 Matriz de selección de la mejor alternativa de diseño.
[Elaboración Propia]

Criterios de selección	Alternativas	Dispositivo de Columna de Agua Oscilante		Dispositivo Atenuador	
		Peso Criterio	Peso Asignado	Peso Relativo	Peso Asignado
Facilidad incrementar energía cinética de las olas	27%	5	1,35	2	0,54
Mecanismo de transferencia mecánica de movimiento	21%	4	0,84	1	0,21
Ubicación del sistema de generación eléctrica	15%	3	0,45	5	0,74
Manufactura	16%	5	0,79	5	0,79
Costo	19%	3	0,56	1	0,19
Mantenimiento	3%	4	0,12	4	0,12
Puntaje	100%		4,09		2,58

De la matriz de selección se escogió como mejor alternativa de trabajo, el diseño de un sistema undimotriz de Columna de Agua Oscilante, por

su apego a los requerimientos establecidos respecto a costo, mantenimiento e implementación.

2.1.1.3 Criterios de Selección y Planteamiento de Alternativas del Sistema de Transmisión.

Una vez seleccionado el tipo de dispositivo convertidor de energía, surgen nuevas variables para la selección del sistema de transmisión mecánico:

Criterios de Selección:

- 1. Rectificación del flujo:** Este criterio toma en consideración si el sistema necesita de mecanismos secundarios para rectificar el flujo bidireccional que se da en la columna de agua, con el fin de mover el eje en un solo sentido de giro. Se dará prioridad al sistema con menor números de piezas, ya que, al estar expuestas a factores ambientales, requerirán de un continuo mantenimiento, lo cual podría elevar los costos a largo plazo y además podrían representar pérdidas de potencia en el sistema.
- 2. Facilidad de optimización del prototipo:** Este criterio se refiere a la facilidad de los sistemas a ser optimizados o modificados sin necesidad de ser reemplazados en su totalidad como por ejemplo la inclusión de nuevos elementos mecánicos para incrementar la producción de energía.
- 3. Control óptimo:** La potencia que puede absorber un convertidor de olas se hace máxima cuando su frecuencia natural de oscilación está cerca de la frecuencia de la ola incidente (sincronizadas), esto se conoce como resonancia. Para lograr esto y realizar un control óptimo del prototipo, será necesario aplicar un control de fase y amplitud de la velocidad de los cuerpos oscilantes. Generalmente se utilizan dos tipos de control diferentes: el control continuo reactivo (control de fase y amplitud) y el control discreto de enclavamiento (control de fase).

4. **Control de la velocidad de giro:** Este criterio se refiere a la capacidad del sistema de mantenerse en el rango de velocidades en que pueda operar correctamente en conjunto con el generador. También, se debe ajustar la velocidad de giro a las condiciones del mar para maximizar la fuerza motriz producida.
5. **Costo:** Contempla el análisis de costos de los materiales requeridos para la fabricación del prototipo.
6. **Mantenimiento:** Se evalúa la frecuencia y facilidad de realizar mantenimientos periódicos al sistema.

Una vez planteados los criterios, se siguió el mismo procedimiento anterior para determinar los pesos relativos y posteriormente la mejor alternativa de selección.

Tabla 2.5 Comparación por pares de los criterios de selección.
[Elaboración Propia]

	Criterios	1	2	3	4	5	6	Total	Pesos relativos
1	Rectificación del flujo	1	7	5	3	5	5	26,00	34%
2	Facilidad de optimización del prototipo	1/7	1	3	1/5	5	3	12,34	16%
3	Control Óptimo	1/5	1/3	1	3	1/5	1/3	5,07	7%
4	Control de la velocidad de giro	1/3	5	1/3	1	1/5	5	11,87	15%
5	Costo	1/5	1/5	5	5	1	5	16,40	21%
6	Mantenimiento	1/5	1/3	3	1/5	1/5	1	4,93	6%
Total								76,61	100%

Alternativas de diseño:

Alternativa 1: Sistema con pistón

En esta alternativa, la implementación del pistón requiere de un sistema hidráulico para la transmisión de potencia o un generador que se acople

directamente y sea lineal lo cual es un mecanismo menos extendido en el mercado y por tanto más costoso.

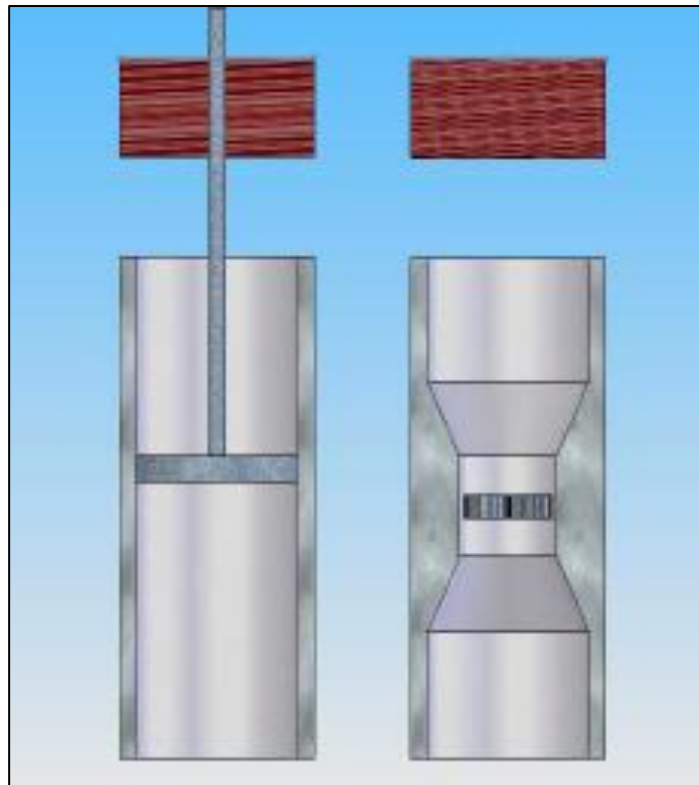


Figura 2.4 Esquema de las alternativas de diseño planteadas. [Agr, 2003]

Alternativa 2: Sistema con turbina

Esta alternativa, consistió en implementar una turbina auto rectificadora de flujo, con el fin de que el sentido de giro de la turbina sea unidireccional y que por tanto no dependa de la dirección del caudal ascendente o descendente.

Alternativa 3: Sistema Turbina-Pistón

Esta alternativa trabaja con un pistón que guía el aire contenido en la cámara por la diferencia de presión formada por la incidencia de las olas, hacia la turbina. Además, se considera la implementación de un flotador para aprovechar la oscilación de las olas

Tabla 2.6 Matriz de selección de la mejor alternativa de diseño.
[Elaboración Propia]

Criterios de selección	Alternativas	Sistema con Pistón		Sistema con Turbina		Sistema con Turbina-Pistón	
		Peso Asignado	Peso Relativo	Peso Asignado	Peso Relativo	Peso Asignado	Peso Relativo
Rectificación del flujo	34%	1	0,34	5	1,70	5	1,70
Facilidad de optimización del prototipo	16%	3	0,48	5	0,81	2	0,32
Control Óptimo	7%	3	0,20	5	0,33	2	0,13
Control de la velocidad de giro	15%	2	0,31	3	0,46	4	0,62
Costo	21%	3	0,64	2	0,43	1	0,21
Mantenimiento	6%	3	0,19	3	0,19	3	0,19
Puntaje	100%		2,17		3,92		3,18

De la matriz de selección se escogió como mejor alternativa un sistema con turbina, ya que representa menor complejidad en el diseño y además menos pérdidas por accesorios complementarios.

2.1.1.4 Criterios de Selección y Planteamiento de Alternativas para la Turbina.

Es de conocimiento que las olas presentan un movimiento de vaivén por lo que, para un mejor aprovechamiento de energía, los sistemas OWC deben implementarse con turbinas unidireccionales, para aprovechar el flujo en ambos sentidos. Para ello se comparó varias turbinas y se seleccionó una que cumpla con los requerimientos de eficiencia, fácil implementación, mantenimiento y bajo costo.

Criterios de Selección:

1. **Giro unidireccional con independencia de flujo:** Este criterio toma en consideración si el sistema es capaz de mover el eje en un

solo sentido de giro sin importar el sentido del flujo de aire dentro de la cámara.

2. **Eficiencia** Este criterio se refiere a la cantidad de energía que puede transmitir la turbina en comparación con otras.
3. **Fácil construcción:** Se dará prioridad al sistema con menor números de piezas, ya que, al estar expuestas a factores ambientales, requerirán de un continuo mantenimiento, lo cual podría elevar los costos a largo plazo y además podrían representar pérdidas de potencia en el sistema.
4. **Costo:** Contempla el análisis de costos de los materiales requeridos para la fabricación del prototipo.
5. **Mantenimiento:** Se evalúa la frecuencia y facilidad de realizar mantenimientos periódicos al sistema.

Tabla 2.7 Comparación por pares de los criterios de selección.
[Elaboración Propia]

	Criterios	1	2	3	4	5	Total	Pesos relativos
1	Giro unidireccional con independencia de flujo	1	7	5	3	5	21,00	39%
2	Eficiencia	1/7	1	5	5	5	16,14	30%
3	Fácil Construcción	1/5	1/5	1	3	1/3	4,73	9%
4	Costo	1/3	1/5	1/3	1	5	6,87	13%
5	Mantenimiento	1/5	1/5	3	1/5	1	4,60	9%
Total							53,34	100%

Alternativas de selección:

Alternativa 1: Turbina de Impulso Axial

Este tipo de turbina opera en un solo sentido de giro independiente del flujo, son de baja eficiencia y velocidad de rotación, éstas necesitan

menor periodicidad de mantenimiento debido a que no presentan mayor desgaste en sus componentes.

Alternativa 2: Turbina Wells

Este tipo de turbina opera en un solo sentido de giro independiente del flujo, por sus perfiles aerodinámicos simétricos dispuestos radialmente, son de fácil mantenimiento, mayor eficiencia y menor costo.

Tabla 2.8 Matriz de selección de la turbina
[Elaboración Propia]

Criterios de selección	Alternativas	Turbina de Impulso Axial		Turbina Wells	
		Peso Asignado	Peso Relativo	Peso Asignado	Peso Relativo
Giro unidireccional con independencia de flujo	39%	5	1,97	5	1,97
Eficiencia	30%	2	0,61	4	1,21
Fácil Construcción	9%	2	0,18	4	0,35
Costo	13%	2	0,26	4	0,51
Mantenimiento	9%	4	0,34	4	0,34
Puntaje	100%		3,35		4,39

El tipo de turbina que más cumple con los requerimientos es la turbina Wells, por su gran eficiencia, fácil mantenimiento y construcción, bajo costo, así como también por la flexibilidad que presenta en su diseño dinámico.

Tabla 2.9 Información del sistema WEC seleccionado.
[Elaboración Propia]

Tipo	Columna de agua Oscilante
Ubicación	En la costa (on-shore)
Mecanismo de Conversión	Sistema con Turbina Wells

2.2 Diseño del Sistema de Columna Agua Oscilante (OWC)

2.2.1 Componentes del sistema OWC

Cámara

La cámara del sistema OWC, es el elemento que capta la energía de las olas. La geometría de la cámara debe de ser de tal forma que permita obtener una máxima energía cinética neumática sobre las condiciones de frecuencia natural del oleaje.

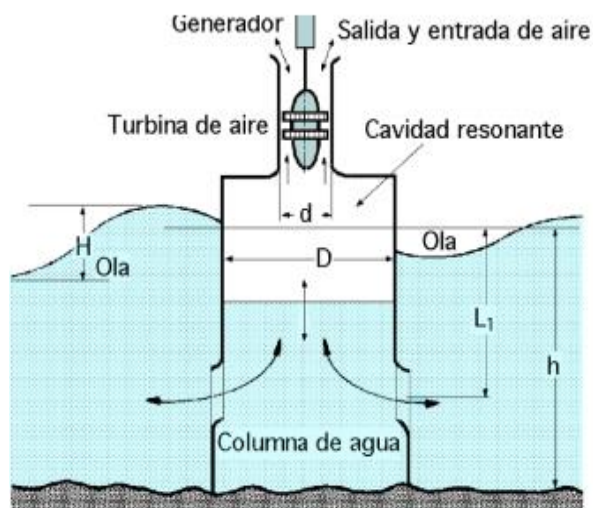


Figura 2.5 Sistema OWC.
[Vilella, 2013]

El impulso del agua dentro de la cámara empujó el flujo de aire presente, generando un diferencial de presión que comprime el aire, por la columna de agua oscilante, hacia la turbina.

El aire que se comprime puede volverse turbulento y provocar fricción en las paredes, reduciendo el volumen de aire comprimido y por ende menos flujo llega a la turbina, por lo que se busca direccionar el flujo directo a la turbina para una mejor obtención de energía, ya que dentro de la cámara el movimiento del fluido no tiene el mismo efecto en ambos sentidos.

Turbina

La turbina es el elemento principal del sistema porque consigue aprovechar la energía mecánica obtenida de las olas para generar una fuerza motriz. Su diseño está condicionado a la bidireccionalidad del flujo de aire dentro de la cámara, así como a las condiciones de oleaje para su funcionamiento.

El diseño de este elemento busca aprovechar los 2 semiciclos del proceso, por lo que la turbina debe ser de giro unidireccional. Para que esto suceda la fuerza de arrastre y de sustentación deben generar siempre un par en la misma dirección.

2.2.2 Diseño de Forma

Cámara

El diseño de la sección rectangular de la cámara junto al ducto permite incrementar la velocidad de flujo dentro de la cámara, siendo favorable para el movimiento del aire dentro de ella hacia la turbina. A continuación, se muestra el diseño de forma en la figura 2.6, sus respectivas dimensiones se encuentran en la sección de Planos en el Anexo C.

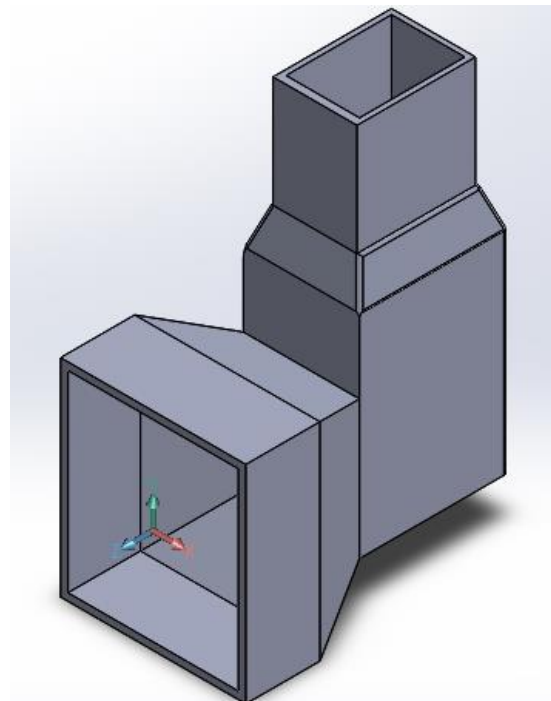


Figura 2.6 Diseño de forma de la cámara OWC. [Elaboración Propia]

Como parte de la propuesta de diseño se generó una placa curva de impacto anexada a la cámara OWC. Por medio de su geometría se buscó suavizar el comportamiento de la ola refractada, cuando ésta interactúa con el sistema. Se esperó que, con esta geometría, el diseño sea favorable para la difracción hidrodinámica, sin embargo, primero fue necesario realizar un

análisis estático que permitió definir el comportamiento estructural del sistema. A continuación, se muestra el diseño en la figura 2.7, las dimensiones correspondientes se encuentran en los planos de construcción en Anexos.

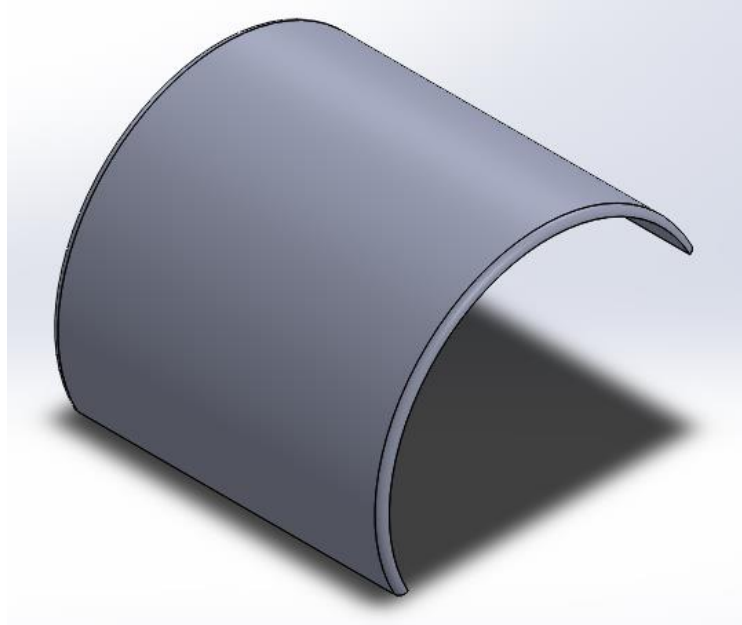


Figura 2.7 Placa Curva.
[Elaboración Propia]

2.2.3 Modelo Matemático General del Sistema

Para analizar los factores que influyen en el dispositivo OWC se establecieron:

- Fundamentos de dinámica de fluidos, para análisis de flujo del sistema.
- Criterio de falla del esfuerzo de tensión de Von Mises máximo, para el análisis de falla estructural. Estas como condiciones para el modelamiento del sistema.

Condiciones de Entorno

- La función de velocidad de entrada de fluido es de carácter sinusoidal de la ola.
- El coeficiente de fricción cinético de las paredes tiende a cero.
- Los flujos de aire y agua son laminar-turbulento.
- Fuerza y velocidad de impacto de las olas con la superficie

- Amplitud de la ola.

La fuerza de impacto aumenta con el frente de ola, ya que la fuerza está asociada con la masa, en referencia a la tercera ley de Newton acción-reacción. Mientras mayor sea el ancho de la placa de impacto mayor será la fuerza y velocidad a la entrada de la cámara.

Análisis del Movimiento de Olas

Para analizar el comportamiento de las olas, existen variadas teorías que las describen de acuerdo con el nivel de profundidad donde se analice. Para el presente proyecto, se analizó el comportamiento de las olas en aguas someras, para lo cual la teoría de la onda solitaria deriva ecuaciones de la conservación de masa y conservación del momento (Ecuaciones de Navier-Stokes) para el caso en el que la longitud horizontal es mucho mayor a la vertical (Dawson & Mirabito, 2008), que es precisamente lo que sucede en aguas someras, donde las olas presentan una longitud de onda mayor que su altura.

De forma conservativa, estas ecuaciones pueden ser expresadas de la siguiente manera:

$$\frac{\delta(\rho\eta)}{\delta t} + \frac{\delta(\rho\eta u)}{\delta x} + \frac{\delta(\rho\eta v)}{\delta y} = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\delta(\rho\eta u)}{\delta t} + \frac{\delta}{\delta x} \left(\rho\eta u^2 + \frac{1}{2} \rho g \eta^2 \right) + \frac{\delta(\rho\eta uv)}{\delta y} = 0, \quad (2.2)$$

$$\frac{\delta(\rho\eta v)}{\delta t} + \frac{\delta(\rho\eta uv)}{\delta x} + \frac{\delta}{\delta y} \left(\rho\eta v^2 + \frac{1}{2} \rho g \eta^2 \right) = 0. \quad (2.2)$$

Donde:

η : Profundidad instantánea del fluido.

(u, v) : Componentes de velocidad del fluido.

g : Aceleración debido a la gravedad.

ρ : Densidad del fluido.

Análisis del Movimiento de los Flujos de Agua y Aire Dentro de la Cámara OWC

Para analizar y posteriormente simular el comportamiento del fluido a través de la entrada de la cámara, fue necesario conocer si esta seguía un modelo laminar o turbulento, para lo cual se utilizó el número de Reynolds:

$$Re_D = \frac{\rho \bar{V} D_h}{\mu} \quad (2.3)$$

Donde:

ρ : Densidad del fluido

V : Velocidad del fluido

D_h : Diámetro hidráulico

μ : Viscosidad del fluido

Para ductos cuadrados se usa un diámetro hidráulico

$$D_h = \frac{4A_c}{P} \quad (2.4)$$

Donde:

A_c = Área de la sección transversal m²

P : Perímetro húmedo

Si $Re_D < 2300$ Flujo Laminar

Si $Re_D > 4000$ Flujo Turbulento

La cámara del sistema OWC debió diseñarse para satisfacer condiciones bajas y altas de oleaje para evitar tanto que, en condiciones de oleaje alto, el agua entre en contacto con la turbina, y en condiciones de oleaje bajo no se genere suficiente diferencial de presión de aire sobre la turbina. Para el sistema OWC que trabaja con un mecanismo de conversión de turbina, la velocidad y altura del aire es una variable dependiente de la fuerza de llegada de la ola, para su cálculo se analizó el comportamiento del agua

dentro de la cámara. Para ello se definió volúmenes de control que permitieron el análisis de puntos específicos de entrada y salida de flujo. Para determinar la altura máxima del agua y su velocidad. Se despreció la presencia de la turbina y pérdidas asociadas a accesorios para el cálculo de un modelo ideal, en el análisis instantáneo de altura que alcanza la ola al entrar en la cámara.

$$P_1 + \frac{1}{2} \frac{V_0^2}{g} + Z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + Z_2 \quad (2.5)$$

$$Z_2 - Z_1 = \frac{P_2 - P_1}{\rho g} + \frac{1}{2} \frac{V_0^2}{g} \quad (2.6)$$

En donde:

P1: Presión a la entrada del dispositivo (Pa).

Vo: Velocidad de entrada del flujo al dispositivo (m/s).

Z1: Altura del dispositivo respecto del suelo (m).

P2: Presión a la salida el dispositivo (Pa).

Z2: Altura del nivel de agua en la cámara.

La ecuación de Bernoulli no es aplicable en un análisis a través de la turbina, sin embargo, es posible si se definen volúmenes de control (figura 2.8), que permiten el análisis de puntos específicos de entrada y salida de flujo. Se define un volumen de control alrededor de la turbina, para el análisis de un modelo ideal, donde la velocidad antes y después ($V_3=V_4$) de la turbina se mantiene constante, así como su área ($A_3=A_4=A$), se observa un infinitesimal de volumen de control, analizando a la turbina como una sección plana, por lo tanto, en este punto se podría decir que el aire que atraviesa el área de la turbina actúa como un fluido incompresible, considerando que no hubo alteración de volumen. Esta asunción sería válida justo en los puntos antes y después de la turbina.

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_3}{\rho g} + \frac{V_3^2}{2g} + z_3 \quad (2.7)$$

$$\frac{P_4}{\rho g} + \frac{V_4^2}{2g} + z_4 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 \quad (2.8)$$

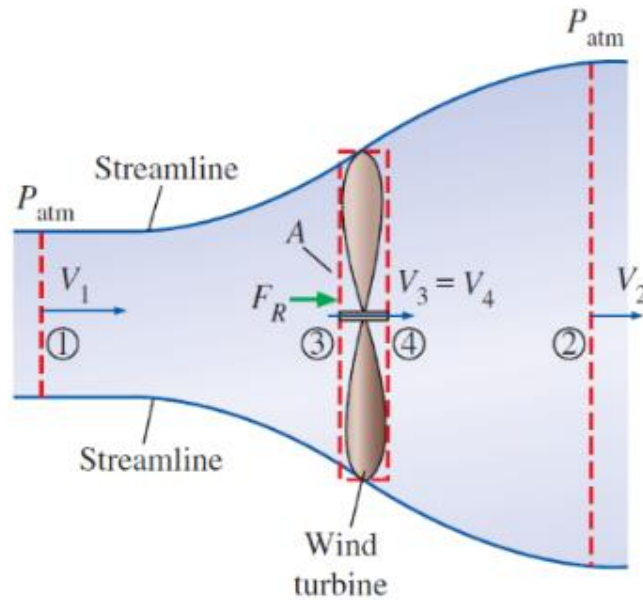


Figura 2.8 Volumen de control para el análisis de una turbina de viento ideal. [Yunus & Cimbala, 2012]

Análisis de la Turbina

El caudal de aire que se transporta dentro de la cámara representa el flujo másico que atraviesa la turbina. Para el análisis del funcionamiento fue necesario determinar la cantidad de energía total que transporta el fluido.

En condiciones uniformes:

- Cantidad energía transportada:

$$E_{masa} = m \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (kJ) \quad (2.9)$$

- Tasa de energía transportada:

$$\dot{E}_{masa} = \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (kW) \quad (2.10)$$

Debido a que las propiedades de la masa (fluido) pueden cambiar en función del tiempo, se consideró para el análisis un diferencial de masa, el cual presenta condiciones uniformes, donde la energía cinética y potencial de la corriente de flujo son insignificantes. Los flujos en la práctica son considerados estacionarios y unidimensionales, con todos estos criterios es posible representar la energía que transporta el fluido de la siguiente manera.

$$E_{masa} = mh \quad (2.11)$$

$$\dot{E}_{masa} = \dot{m}h \quad (2.12)$$

Dimensionamiento de la Turbina

El dimensionamiento de una turbina Wells, parte de un análisis de variables que caracterizan tanto su diseño aerodinámico como su rendimiento. Estas variables pueden ser expresadas como σ , h , AR , τ , τ_e . (Raghunathan, 1995)

- Solidez de la turbina (σ): Es una medida del bloqueo del flujo de aire dentro de la turbina; el incremento de la solidez incrementa las fuerzas axiales, la caída de presión, y las pérdidas de energía cinética a la salida, reduciendo la eficiencia aerodinámica. Valores de $\sigma < 0.5$ se recomiendan para turbinas de un solo plano, pero se debe considerar que, las turbinas de baja solidez no pueden llegar a una velocidad operacional partiendo del reposo.
- Relación base-punta (h): Este parámetro controla el flujo volumétrico a través de la turbina. Además, está relacionado con las condiciones de estancamiento, las pérdidas cerca de la punta y la habilidad de la turbina para trabajar a una velocidad operacional. Se recomiendan valores de $h < 0.6$ para el diseño.
- Relación de Aspecto (AR): Este parámetro influye en la eficiencia y en la tasa de flujo a la cual la turbina se estanca. Al reducir la relación de aspecto, también se retrasa el estancamiento. Un valor de $AR=0.5$ es un valor recomendable para el diseño de una turbina Wells.
- Espacio libre de la punta (τ_e): La reducción del espacio libre, reduce las pérdidas por fugas y por ende podría mejorar la eficiencia de la turbina. Se recomiendan valores de $\tau_e < 2\%$ para el diseño.
- Perfil de las aspas de la turbina y la relación de espesor (τ): Los coeficientes de fuerza aerodinámica, dependen del perfil de las aspas. Dado que, para esta aplicación en particular, es necesario que la turbina se mueva en un solo sentido independientemente del sentido del flujo, se necesitan perfiles simétricos para lograrlo. Es recomendable escoger un perfil de mayor espesor para turbinas de pequeña escala y, por el

contrario, perfiles de menor espesor para turbinas de mayor escala. Los perfiles NACA0012 y NACA0015 se recomiendan para esta aplicación.

En la tabla 2.10 se encuentran resumidos los parámetros descritos anteriormente con las ecuaciones para obtener sus valores.

Tabla 2.10 Parámetros de una Turbina Wells. [Das et al., 2017]

Parámetro	Descripción Analítica	Comentarios
Perfil	NACA 00XX	Se recomienda escoger un perfil de mayor espesor para turbinas de pequeña escala
Solidez de la turbina (σ)	$\frac{2Nc}{\pi D_t(1+h)}$	Valores de $\sigma < 0.5$ se recomiendan para turbinas de un solo plano
Relación base-punta (h)	D_h/D_t	Se recomiendan valores de $h < 0.6$ para el diseño.
Relación de Aspecto (AR)	b/c	Un valor de AR=0.5 es un valor recomendable para el diseño de una turbina Wells.
Espacio libre de la punta (τ_e)	% de c	Se recomiendan valores de $\tau_e < 2\%$ para el diseño.

Hipótesis de Trabajo:

- Flujo incompresible (densidad constante)
- Régimen constante, donde el balance de entrada es igual al de salida.
- Volumen de control definido sin variación en el tiempo, no deformable e inercial.

El caudal mínimo de aire necesario para mover la turbina se calcula a partir del valor de velocidad de entrada flujo. Velocidad de flujo en función de la sección de paso en la turbina.

$$Q = v * A = v' * A' \quad (2.13)$$

$$v' = \frac{v * A}{A'} \quad (2.14)$$

Donde:

v' : velocidad entrada mínima flujo

v : velocidad flujo en función de sección

A' : Área Turbina

A : Área aspa

$$Q_{aire} = v' * A_{ducto} \quad (2.15)$$

Análisis de Potencia Generada

Como el sistema que se analizó es de flujo estacionario con una sola entrada y salida, el balance de energía es:

$$\dot{E}_{entrada} - \dot{E}_{salida} = \frac{dE}{dt} \quad (2.16)$$

$$\dot{E}_{entrada} = \dot{E}_{salida} \quad (kW) \quad (2.17)$$

$$\dot{Q}_{entrada} + \dot{W}_{entrada} + \sum_{entrada} \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) = \dot{Q}_{salida} + \dot{W}_{salida} + \sum_{salida} \dot{m} \left(h + \frac{v^2}{2} + gz \right) \quad (2.18)$$

Para el sistema:

- No se transfiere calor ni se entrega calor al sistema
- No se añade trabajo al sistema
- Cambios insignificantes energía potencial y cinética.

$$\dot{W}_{salida} = \dot{m}(h_{entrada} - h_{salida}) \quad (W) \quad (2.19)$$

Cálculo de la Eficiencia del Equipo

Para la medición de la eficiencia del prototipo, se calculará la eficiencia mediante la siguiente ecuación:

$$\eta = \frac{\dot{W}_{salida}}{\dot{W}_{entrada}} \quad (2.20)$$

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Introducción

Este capítulo se desarrolló con el uso de herramientas como Simulation, Flow Simulation y ANSYS Fluent de SolidWorks y ANSYS, para una simulación estática por medio del método de elementos finitos y dinámica de fluidos computacional (CFD por sus siglas en inglés) con el fin de realizar un análisis global del prototipo. Por medio de ANSYS se realizó un estudio hidrodinámico del comportamiento de las olas cuando éstas interactúan con una superficie y con el software de SolidWorks, se modeló y analizó la geometría del dispositivo de energía undimotriz (WEC) de columna de agua oscilante (OWC). El análisis de cualquier flujo en una herramienta CFD como un proceso iterativo, consiste en cuatro pasos básicos que incluyen: la creación de proyecto, definición de dominio computacional, definición del modelo matemático con sus respectivas condiciones de entorno y la evaluación de resultados; secuencia que se siguió para las simulaciones realizadas.

3.2 Modelo del Canal Generador de Olas

3.2.1 Definición del Dominio y Mallado

El tanque de olas es el elemento sobre la cual se basó el modelamiento posterior del OWC. Por lo que, fue de fundamental importancia que provea resultados con un apropiado nivel de exactitud y evitar posteriores errores. Para la simulación, se tomaron las dimensiones del canal experimental ubicado en el campus de la Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), el cual tiene una longitud de 10 m y una altura de 45 cm.

Para facilitar la simulación, fue apropiado colocar el dispositivo OWC a una distancia de 2.5m desde el generador de olas, esto para obtener una característica de la interacción de la ola con el dispositivo captador de

energía undimotriz. No fue posible extender su ubicación debido a la tolerancia del procesador para simular.

Posteriormente, se realizó el mallado del modelo, el cual es una parte importante del proceso de simulación, ya que permite dividir la geometría en elementos simples que se pueden usar como aproximaciones locales del dominio completo, su calidad influye en la precisión y convergencia de los resultados obtenidos en la simulación.

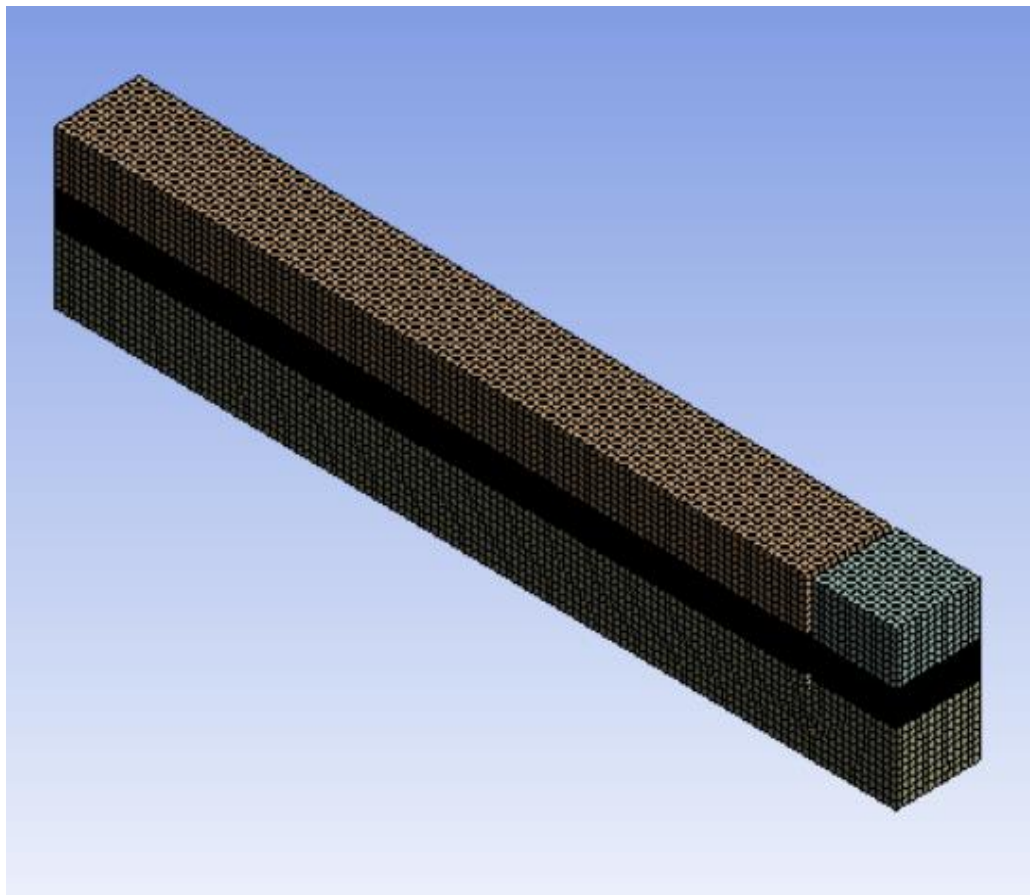


Figura 3.1 Mallado del canal generador de olas.
[Elaboración Propia]

Para el mallado de la geometría, se utilizaron tres controles para conseguir un mallado aceptable; en la sección de la interfaz, se utilizó un tamaño de elementos menor que en el resto de la malla para aumentar su calidad, y así modelar satisfactoriamente la forma de las olas generadas. Una vez obtenida una calidad de mallado adecuado, se procedió a definir las caras

de entrada de velocidad, salida de presión y atmósfera de acuerdo con el esquema de la figura 3.3.

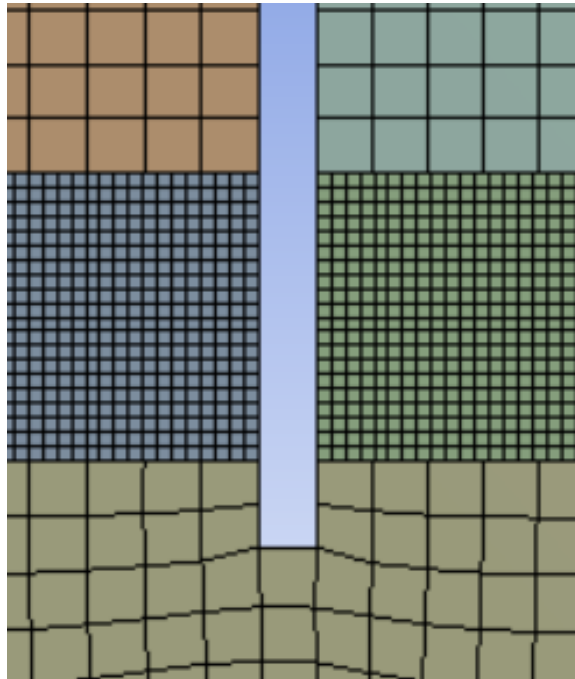


Figura 3.2 Mallado de la interfaz entre aire y agua. [Elaboración Propia]

3.2.2 Definición del Modelo Matemático y Condiciones de Borde

Para la generación de olas, se definió un modelo en estado transitorio que incorpora el método multifásico de Volumen de fluido (VOF por sus siglas en inglés), con submodelos de flujo de canal abierto y condiciones de borde de olas en canal abierto.

Se definieron aire y agua como fluidos de trabajo, cuyas propiedades se encuentran detalladas en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Propiedades de los fluidos involucrados.
[Elaboración Propia]

Fluido	Fase	Densidad (kg/m ³)	Viscosidad Dinámica (kg/m*s)	Temperatura (C)
Aire	Primaria	1.225	1.7894 x 10 ⁻⁵	20
Agua	Secundaria	998.2	0.001003	20

Para las condiciones de operación, se definió la presión atmosférica y una densidad igual a la del aire, asimismo, las condiciones de borde, se definieron parámetros para cada una de las caras definidas previamente.

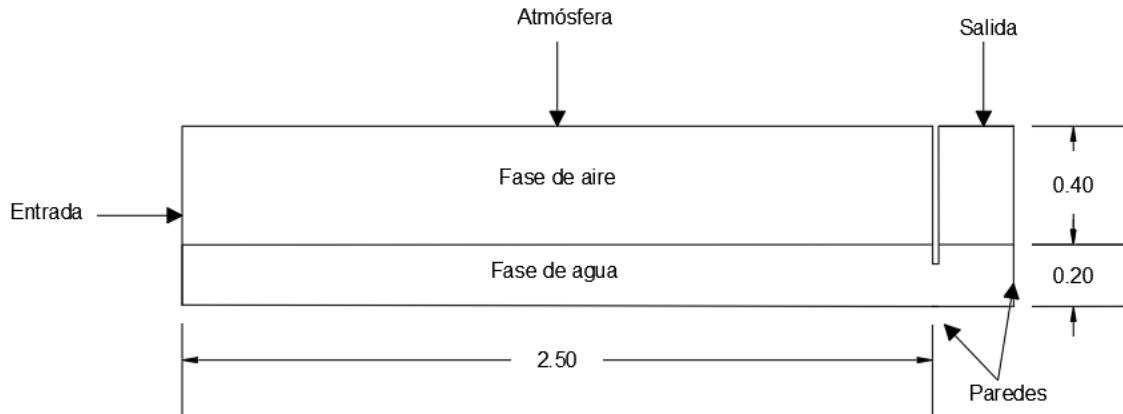


Figura 3.3 Esquema del canal generador de olas.
[Elaboración Propia]

Tabla 3.2 Condiciones de Borde.
[Elaboración Propia]

Entrada	Velocidad
Salida	Presión
Atmósfera	Presión Atmosférica

La simulación tiene como objetivo estudiar el comportamiento del prototipo en aguas someras, para la simulación, se establecieron condiciones de entrada detalladas en la tabla 3.3. Para los parámetros de caracterización de olas, se utilizaron datos experimentales registrados en pruebas en el canal de olas de la Escuela Superior Politécnica del Litoral. Estos datos se definieron para un grupo de dos olas.

Tabla 3.3 Condiciones de entrada de las olas.
[Elaboración Propia]

Condiciones de Borde de ola	Olas Poco Profundas
Teoría de onda	Teoría de onda solitaria
Altura de onda (m)	0.1
Longitud de onda (m)	1.5

Para las caras que se encuentra a condiciones atmosféricas y salida de la figura 3.3, se activaron las condiciones para canal abierto multifásico y se estableció el nivel del fondo y de la superficie libre del canal. Por último, se seleccionó el método de solución híbrida, con un paso de tiempo de 0.001 segundos en 200 iteraciones para estabilizar la simulación. Posteriormente se aumentó el paso a 0.005 segundos en 200 iteraciones adicionales y 0.01 segundos en 500 iteraciones, para un total de 5.46 segundos de simulación.

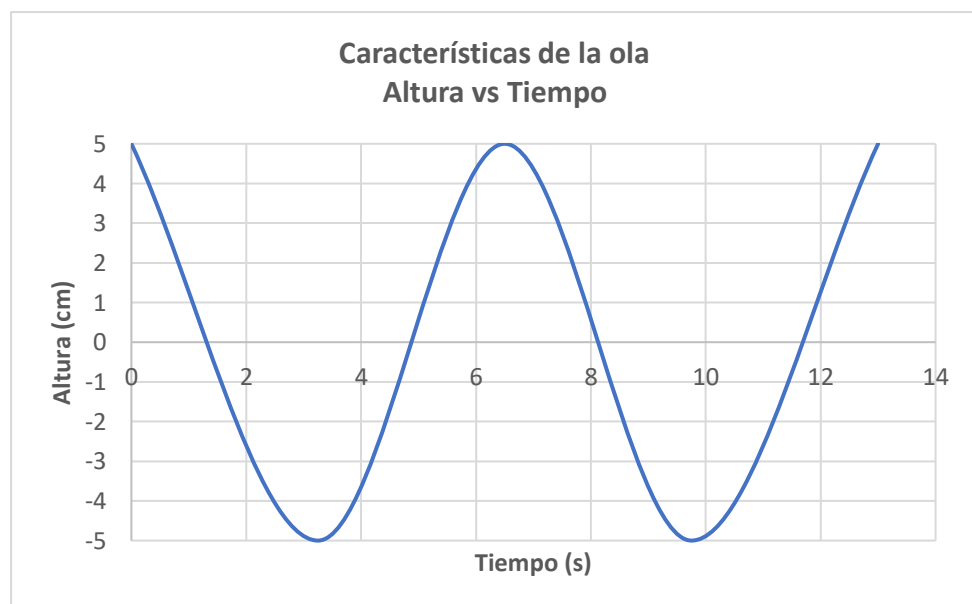


Figura 3.4 Características experimentales de las olas en el canal.
[Elaboración Propia]

3.2.3 Resultados Obtenidos

Al finalizar la simulación, se generaron las gráficas de contornos de velocidad para visualizar el comportamiento del fluido de dos longitudes de onda a la entrada de la cámara, como se visualiza en la figura 3.5. Posteriormente, se obtuvieron las gráficas de las componentes de velocidad tanto en el eje X como se observa en la figura 3.8; en Y, gráfico 3.9 y también su magnitud en el gráfico 3.10, todas con respecto al tiempo. Para esto, se ubicó un punto cercano a la entrada de la cámara y así obtener los datos en cada tiempo de paso.

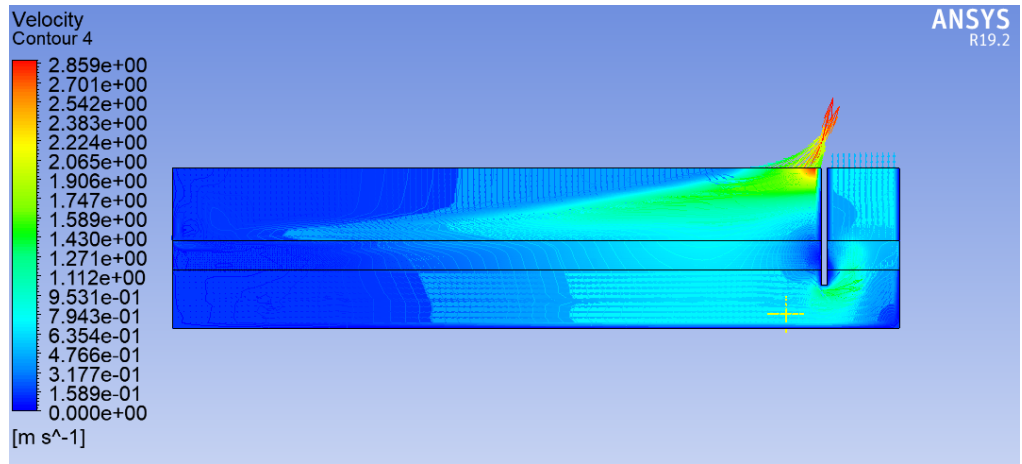


Figura 3.5 Contornos de Velocidad. [Elaboración Propia]

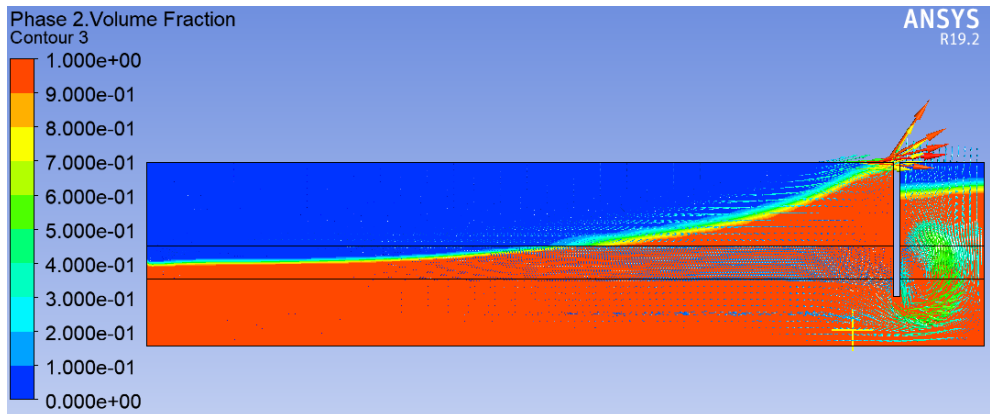


Figura 3.6 Fracción de Volumen. [Elaboración Propia]

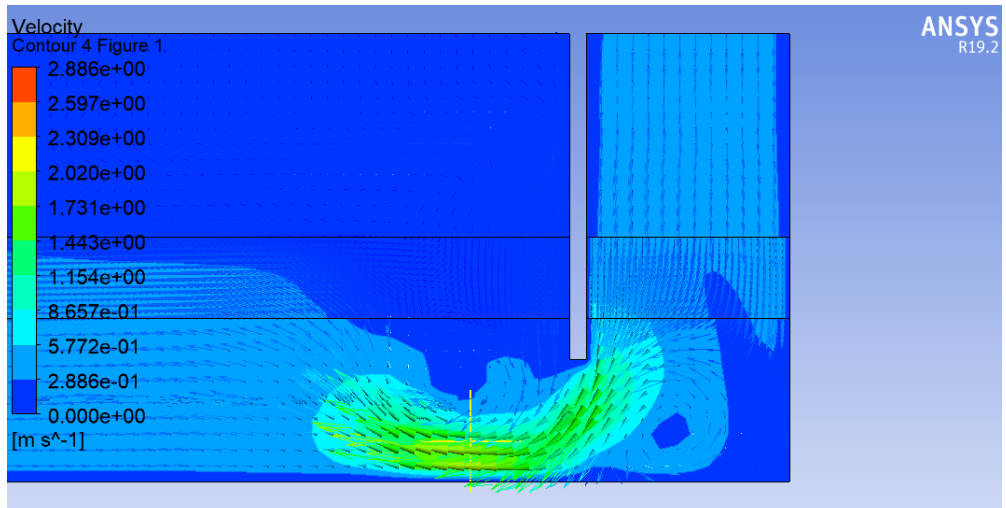


Figura 3.7 Vectores de velocidad en t=3.3. [Elaboración Propia]

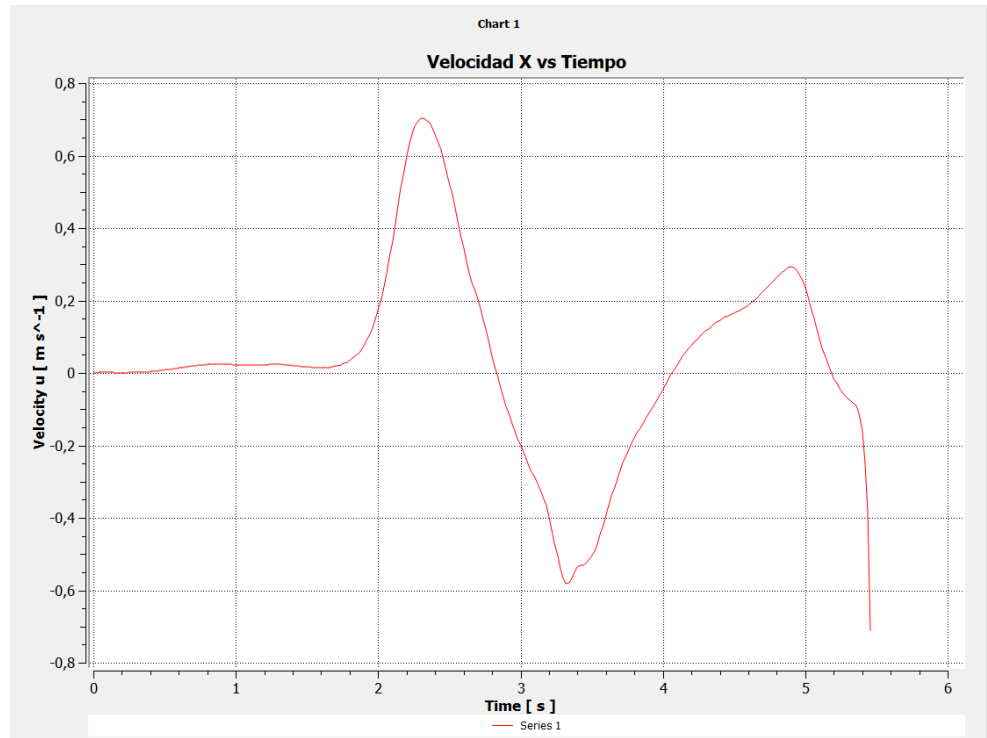


Figura 3.8 Velocidad X vs Tiempo. [Elaboración Propia]

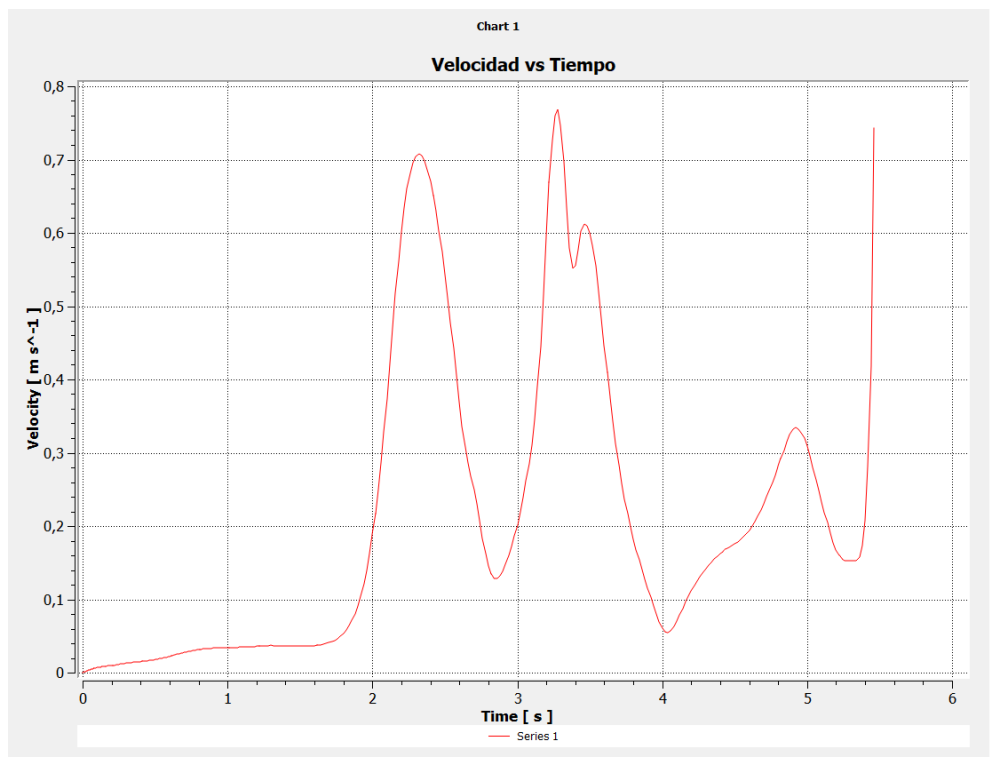


Figura 3.9 Velocidad Y vs Tiempo. [Elaboración Propia]

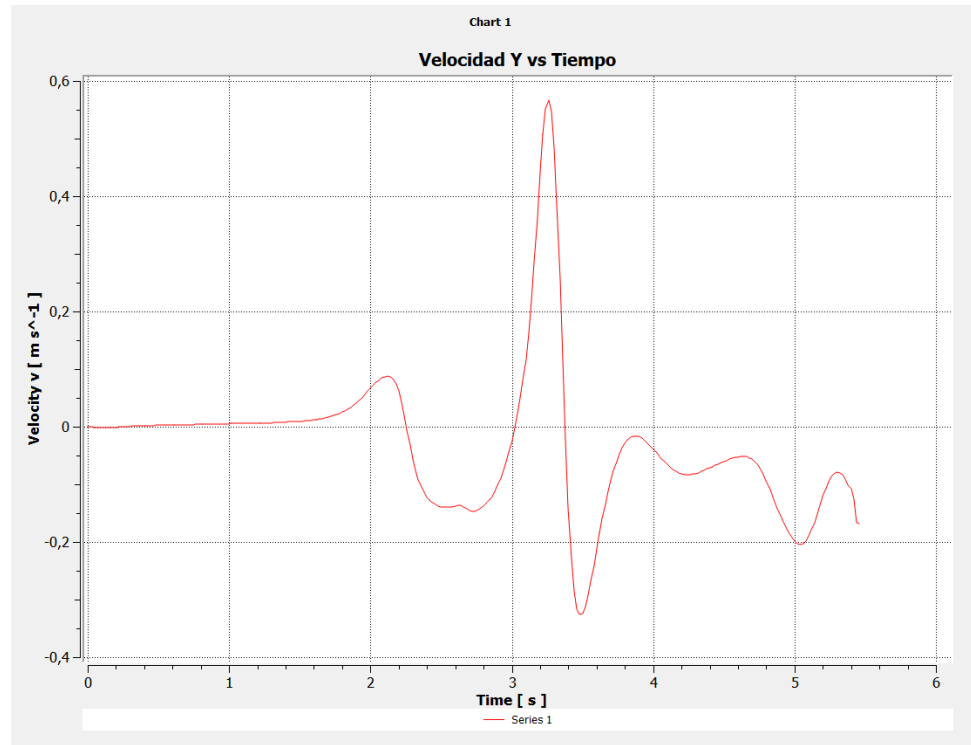


Figura 3.10 Velocidad vs Tiempo. [Elaboración Propia]

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

$$\lambda = 1,5 \text{ m}$$

$$v = 0,2337 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$v = \frac{\lambda}{T} \quad (3.1)$$

$$T = \frac{\lambda}{v} = \frac{1,5 \text{ m}}{0,2337 \text{ (m/s)}}$$

$$T = 6,42 \text{ s}$$

$$f = \frac{1}{T} \quad (3.2)$$

$$f = 0,16 \text{ Hz}$$

3.2.4 Análisis de los Resultados

Luego de realizar la configuración de la simulación, se observó que el modelo presentaba un comportamiento muy cercano a las olas de viento convencionales, por lo que el mallado realizado a la geometría y la configuración de las condiciones de borde, fueron aceptables para la obtención de datos válidos del perfil de velocidad, los cuales posteriormente

serían exportados a SolidWorks para analizar en detalle comportamiento del flujo de agua a través del dispositivo de columna de agua oscilante.

En la figura 3.4 se pueden observar los contornos de velocidad obtenidos en un punto cercano a la entrada de la cámara. Dado que la simulación duro 5.46 segundos, solo fue posible analizar el comportamiento de dos longitudes de onda debido a las limitaciones del dispositivo de trabajo donde se realizó la simulación. Para que la primera onda completa llegara a la cámara, transcurrió un lapso de 2.3 segundos y para la segunda, aproximadamente 5 segundos, lo que quiere decir que no tienen el mismo período; esto se debe a que las olas no tienen un comportamiento homogéneo ni estacionario, y como se indicó en secciones anteriores, cada ola tiene sus propias características. En las figuras 3.7 y 3.8 se observan las componentes de velocidad en X y Y con respecto al tiempo, se identificaron valores máximos de velocidad tanto positivos como negativos. La máxima velocidad se dio en el momento en que la ola impactó la pared de la cámara generando que la columna de agua se eleve en el ducto del prototipo como se observa en la figura 3.6 de la fracción de volumen del modelo, en donde se puede visualizar la separación de las fases de aire y agua. Por otra parte, los picos de velocidades negativas son productos al retorno del agua y a la descompresión del fluido dentro de la cámara en el momento en que la ola se empieza a disipar. En la figura 3.7, se pueden visualizar los vectores de velocidad en aproximadamente 3.3 segundos que es donde se presenta esta situación.

En la figura 3.10 se muestra la magnitud de velocidad con respecto al tiempo, se observa que existen caídas de velocidad abruptas a lo largo de la figura, estas correspondían al ingreso de olas de menor altura y viceversa, puesto que cuanto mayor sea la altura, es posible extraer más energía del viento.

3.3 Modelo de la Cámara OWC

3.3.1 Metodología de Diseño y Simulación en SolidWorks

Por medio de la herramienta Simulation y Flow Simulation de SOLIDWORKS se procedió a realizar la simulación del dispositivo

undimotriz, la cual incluyó el análisis estático del sistema, así como el análisis del comportamiento de los fluidos (aire y agua) dentro de la cámara OWC con el fin de dimensionar y seleccionar adecuadamente el sistema de una turbina que permita absorber mayor potencia del flujo para generar electricidad proveniente de la energía de las Olas.

3.3.1.1 Definición de Dominio

Se asumieron como los ejes de trabajo, el eje Z como vertical que nace de la superficie, el eje X en el sentido del flujo incidente, y el eje Y perpendicular a los otros ejes. Para diseñar la cámara OWC se trabajó en el perfil XZ que en SolidWorks se define como Vista de Planta, donde se crea un croquis. Para sus dimensiones se tomaron en cuenta los criterios de diseño establecidos para el dispositivo de aprovechamiento de energía undimotriz.

3.3.1.2 Configuración Mallado

Simulación

Se realizó un análisis estático lineal por lo que se trabajó con un mallado mixto estándar con una tolerancia de 1.33 mm, con un número total de 26993 nodos y 13564 elementos en total. A continuación, en la figura 3.11 podemos observar el mallado. El tiempo total del mallado fue de 4 segundos.

Simulación del flujo

El mallado es un paso crucial en el análisis de diseño, se creó el mallado con un criterio de tolerancia de 0.026 m y un criterio de curvatura de 0.390 rad, con un total de 7055 celdas generadas donde 4236 celdas están en contacto con el fluido y el sólido. A continuación, en la figura 3.11 y 3.12 podemos observar mallado realizado. Para empezar la simulación, en las opciones de control de cálculo, se configuró el tiempo de paso de 0.02 segundos, así como las iteraciones y tipo de cálculo.

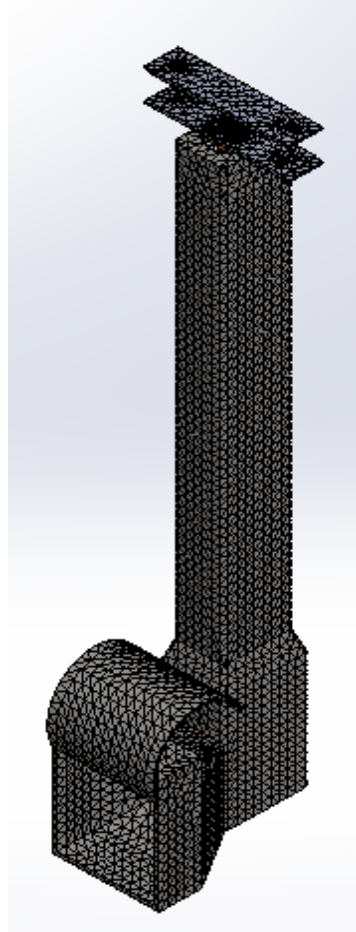


Figura 3.11 Mallado del modelo OWC
[Elaboración Propia]

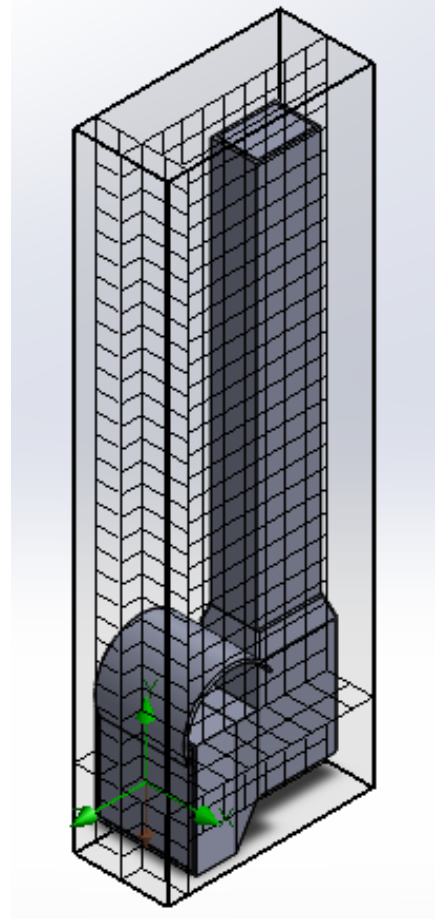


Figura 3.12 Mallado del modelo OWC.
[Elaboración Propia]

3.3.1.3 Condiciones de Borde

Simulación

Se seleccionó las propiedades del material de la estructura a analizar. Al seleccionar acero como material, se definió un modelo isotrópico con un criterio de falla de Esfuerzo de Von Mises que es para materiales dúctiles.

Las condiciones de simulación fueron las sujeciones que permitieron restringir estados de movimiento del sistema, a fin de obtener datos de tensión máxima, desplazamiento, deformaciones unitarias y factor de seguridad del sistema OWC. Respecto a las fuerzas externas a las cuales se encuentra sometido el sistema se decidió usar el análisis

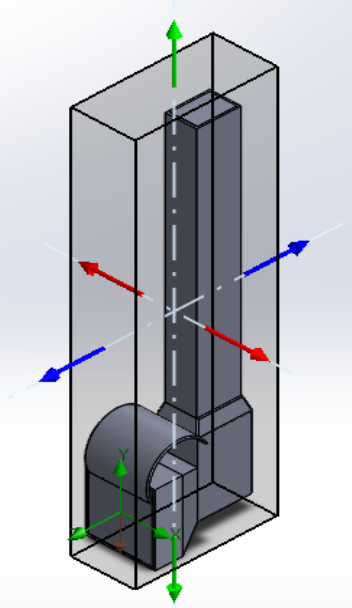
energético presentado en (Rodríguez Flores & Caicedo Cevallos, 2019), donde se estableció una fuerza de impacto de 2N.

Simulación del Flujo

Se seleccionaron los valores detallados en la tabla 3.4, con el fin de evaluar el comportamiento del fluido, su fracción de masa aire-agua, velocidad y presión, para posteriormente calcular la potencia promedio que entrega el fluido a la turbina.

Tabla 3.4 Dominio Computacional y Objetivos de la Simulación.

[Elaboración Propia]

Dominio Computacional		Valores
 <p data-bbox="464 1675 703 1760">Figura 3.13 Dominio Computacional. [Elaboración Propia]</p>	1	Valor promedio de la fracción de masa de aire (1)
	2	Valor promedio de la fracción de masa de agua (1)
	3	Valor promedio de la fracción de Volumen de aire (1)
	4	Valor promedio de la fracción de Volumen de agua (1)
	5	Masa de aire 1
	6	Masa de agua 1
	7	Valor promedio de Presión estática
	8	Valor promedio de Presión Total
	9	Valor promedio de Presión Dinámica
	10	Valor promedio de Velocidad 1
	11	Valor promedio de Velocidad 2
	12	Valor promedio de Velocidad (X) 1
	13	Valor promedio de Velocidad (Y) 1
	14	Máximo Volumen de fracción de agua 1
	15	Máximo Volumen de fracción de aire 1

3.3.1.4 Resultados de la Simulación

Análisis Estático

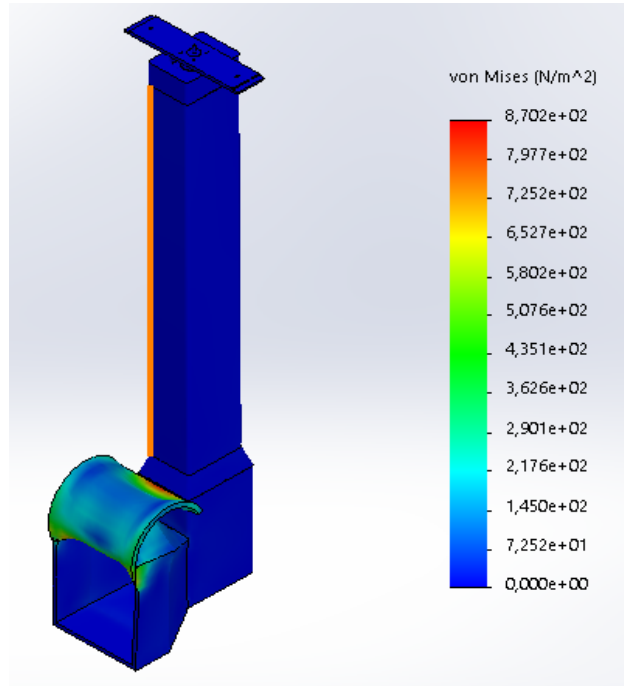


Figura 3.14 Esfuerzo de Von Mises sobre estructura.
[Elaboración Propia]

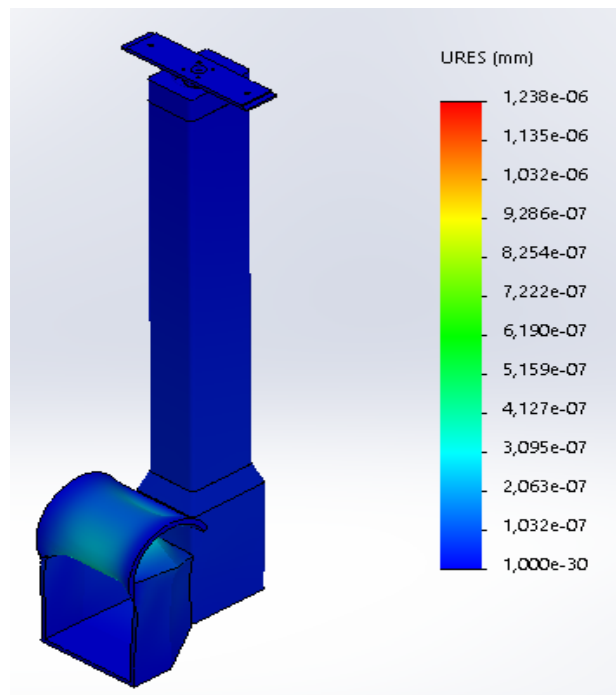


Figura 3.15 Desplazamiento de la estructura.
[Elaboración Propia]

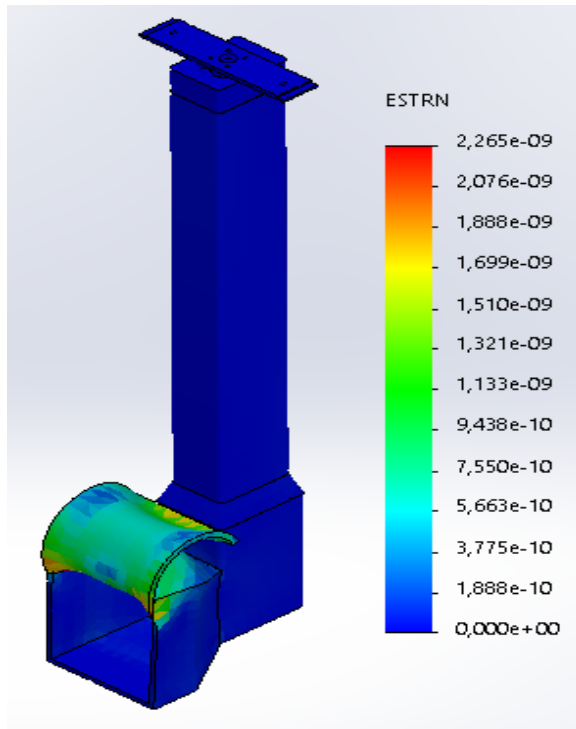


Figura 3.16 Deformación unitaria de la estructura.
[Elaboración Propia]

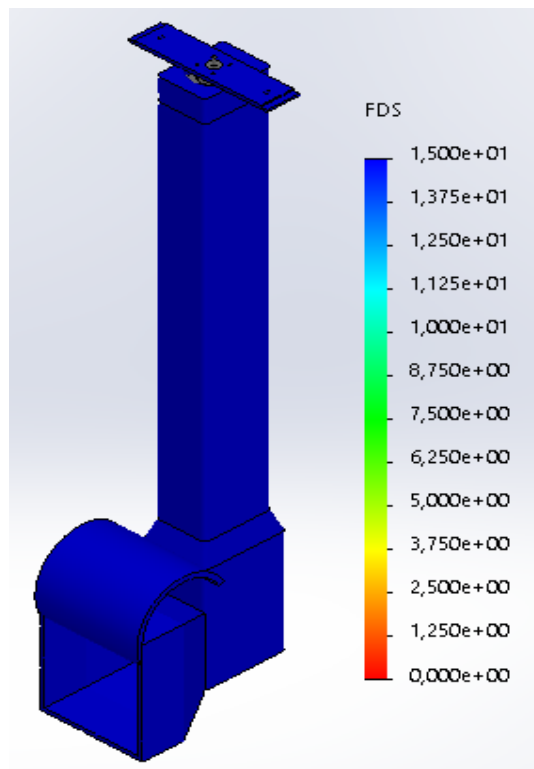


Figura 3.17 Factor de seguridad.
[Elaboración Propia]

Simulación del Flujo

De la simulación en ANSYS se generan los datos de comportamiento de la ola curva característica del perfil de velocidad (figura 3.18), en la tabla A.1, se encuentran dichos datos. A partir de estos datos se simuló el comportamiento del fluido dentro de la cámara, obteniendo datos de flujo volumétrico, velocidad X, velocidad Y, presión, entalpía, flujo másico.

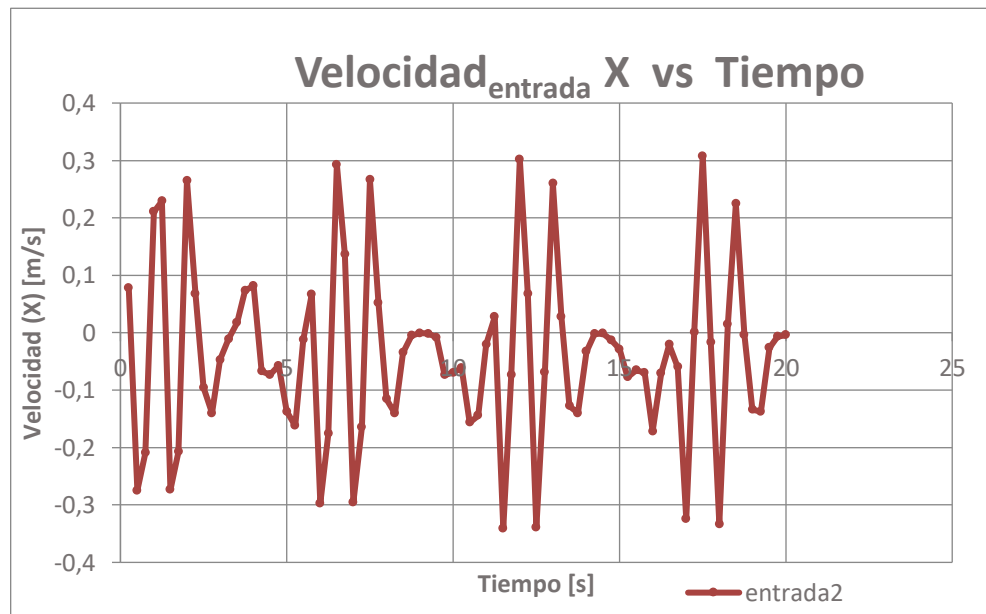


Figura 3.18 Perfil de velocidad de la ola vs Tiempo. [Elaboración Propia]

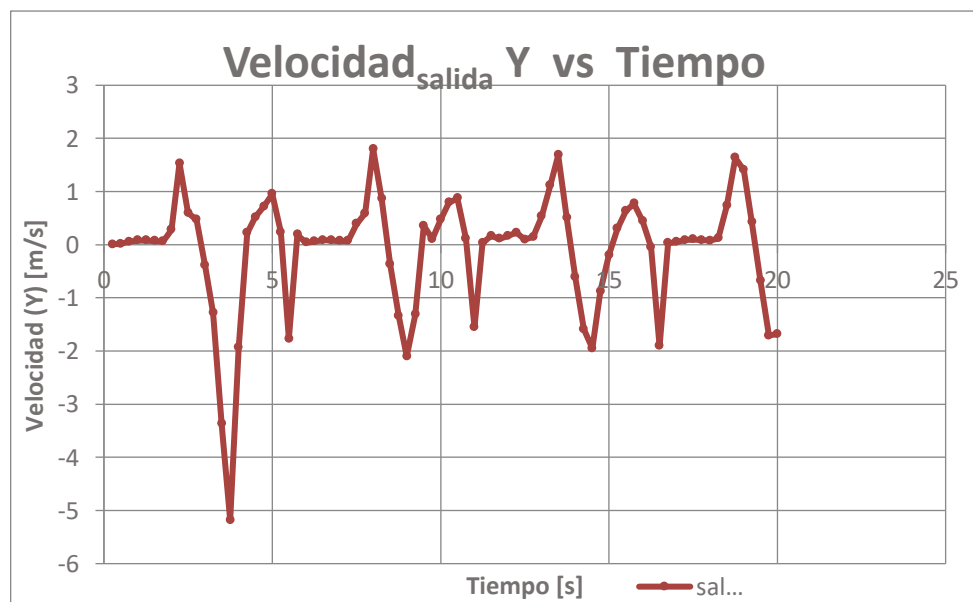


Figura 3.19 Velocidad de Salida vs Tiempo. [Elaboración Propia]

Se observa la curva de velocidad en X del fluido a la entrada de la cámara, y la curva de velocidad en Y del fluido a la salida, durante un tiempo de simulación de 20 segundos. Se puede observar las curvas de velocidad y presión en detalle en la sección del Anexo B.

Tabla 3.5 Velocidades Obtenidas. [Elaboración Propia]

	Valor mínimo	Valor máximo
Velocidad X entrada (m/s)	-0,333	0,307
Velocidad Y salida (m/s)	-5,78	1,634

El flujo de agua desplaza el aire dentro de la cámara, con una velocidad máxima del aire de 1,634 m/s en la salida del ducto. En la sección de Anexos se observan gráficas del fenómeno de desplazamiento de los fluidos obtenidos por medio de la simulación. De igual manera, por medio de la simulación se logró determinar los valores de entalpía y flujo másico de aire, los cuales nos permiten estimar, por medio de un balance de energía, la potencia mecánica que el fluido podrá entregar al dispositivo mecánico de trabajo.

Los datos obtenidos de potencia de flujo también nos permitieron determinar que existen momentos donde se produce mezcla de fluidos, generando así valores por encima del promedio. Por esto se definió un estado aceptable de calidad de mezcla de aire de 0,95 hasta 1, para determinar la potencia promedio generada. En la tabla 3.6 se presentan los resultados de valores promedios de entalpía y flujo másico.

Tabla 3.6 Valores promedio de entalpía y Flujo másico. [Elaboración Propia]

$\Delta t(seg)$	Entalpía total Mínima h_{min} (J/kg)	Entalpía total Máxima h_{max} (J/kg)	Entalpía total Promedio \bar{h} (J/kg)	Delta Entalpía Δh [J/g]	Flujo Másico de aire (kg/s)
20	367314,86	747571,69	505898,62	205,90	0,0096

Se presenta a continuación en la figura 3.20 la curva de superficie de los valores de Potencia de flujo generada por los datos de la simulación de entalpia y flujo másico, para las diferentes fracciones de mezcla aire-agua. Para el análisis lo ideal es que la concentración de flujo para la toma de datos sea únicamente aire.

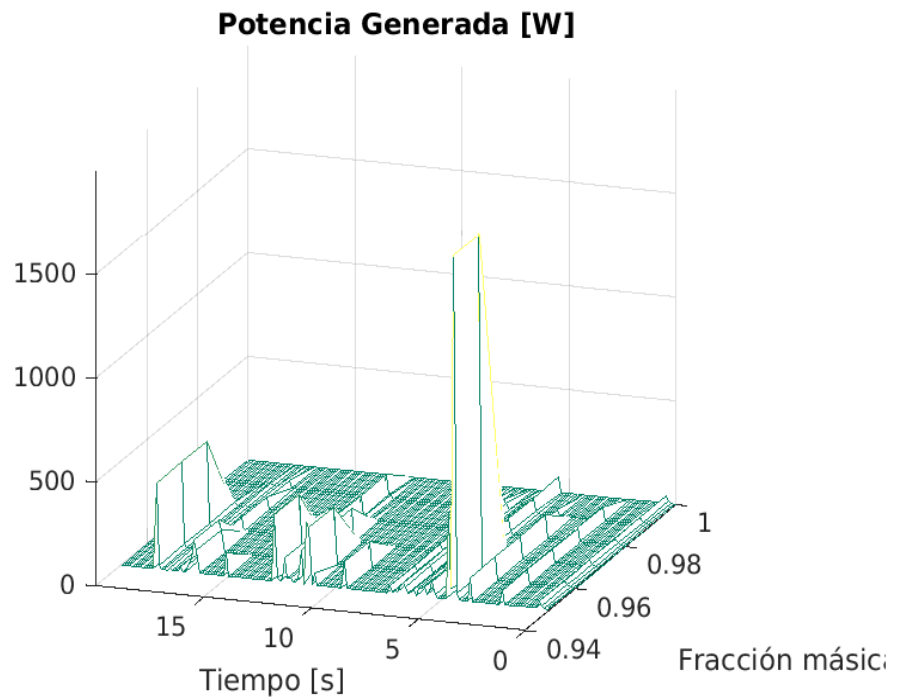


Figura 3.20 Potencia entregada por el Flujo. [Elaboración Propia]

Tabla 3.7 Potencia Promedio generada con diferentes fracciones de mezcla F=1(aire); F<1 (mezcla aire-agua). [Elaboración Propia]

Potencia Promedio de Flujo (W)					
F=0,95	F=0.96	F=0.97	F=0,98	F=0.99	F=1
68,22	61,05	26,38	18,28	16,14	8,61

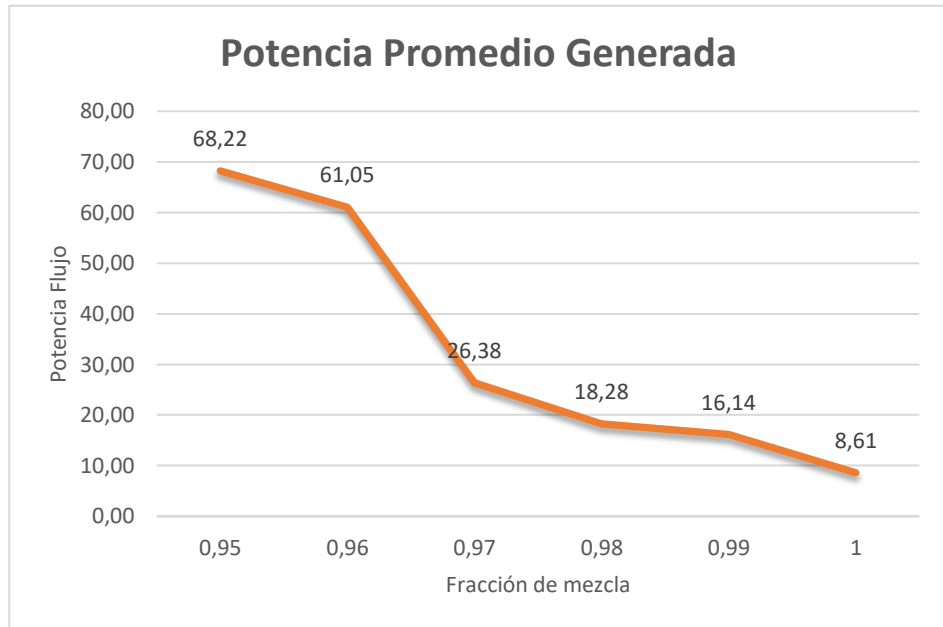


Figura 3.21 Curva de Potencia Promedio Generada.
[Elaboración Propia]

3.3.1.5 Análisis de los Resultados

Los resultados obtenidos del análisis estático en la figura 3.14, nos indican que el sistema está sometido a un esfuerzo máximo de 870 Pa aproximadamente en pequeñas zonas donde la placa curva está en contacto con la cámara, se pudo observar en la figura 3.15 que la deformación del sistema se ubica en la parte central de la placa curva del sistema, debido a que es la que se encuentra sometida al impacto de la ola. De forma general se observa en la figura 3.17 el factor de seguridad del sistema mayor a 1 lo que nos indica que el sistema soporta con seguridad la carga a la que se encuentra sometido.

Los resultados del trabajo de simulación de fluidos obtenidos se presentan en diferentes gráficas y tablas en la sección de Anexos, estos datos permiten describir el comportamiento del fluido dentro del dispositivo OWC. El detalle de resultados mostrado a continuación nos permite estimar el valor de potencia que puede entregar el fluido a la turbina y posteriormente de la turbina al generador.

Como se puede observar en las figuras 3.18 y 3.19, las cuales corresponden a datos de velocidad en X y Y, durante el primer tramo de

5 segundos la curva tiene un comportamiento diferente, podemos observar picos de valores muy oscilantes, por lo que se determinó el número de Reynolds ($Re = 11972,95$), por lo tanto entra en la definición de un fluido turbulento, esto como resultado del impulso de la onda al interactuar con el dispositivo, hasta estabilizarse, como se observa después de los 5 segundos, podemos decir que el fluido empezó a tener un comportamiento oscilatorio periódico.

El sistema OWC debe satisfacer dos condiciones de funcionamiento, oleaje alto y oleaje bajo. En la definición de oleaje alto implicó que la cámara quedó totalmente sumergida, es decir, toda la superficie de entrada quedó ocupado por el volumen del fluido. Para ello se realizaron simulaciones para determinar la altura en que se debería colocar la turbina. Se simuló el fluido de agua teniendo como datos iniciales una altura de ola de 100 mm para conocer la altura de agua dentro de la cámara, teniendo una altura inicial de cámara de 285.86 mm. Se pudo observar en la figura 3.23 que el agua dentro de la cámara sobrepasa dicha altura, por lo que se procedió a extender el ducto de salida 1 m, esto con el fin de poder visualizar hasta qué altura llegaría el agua.

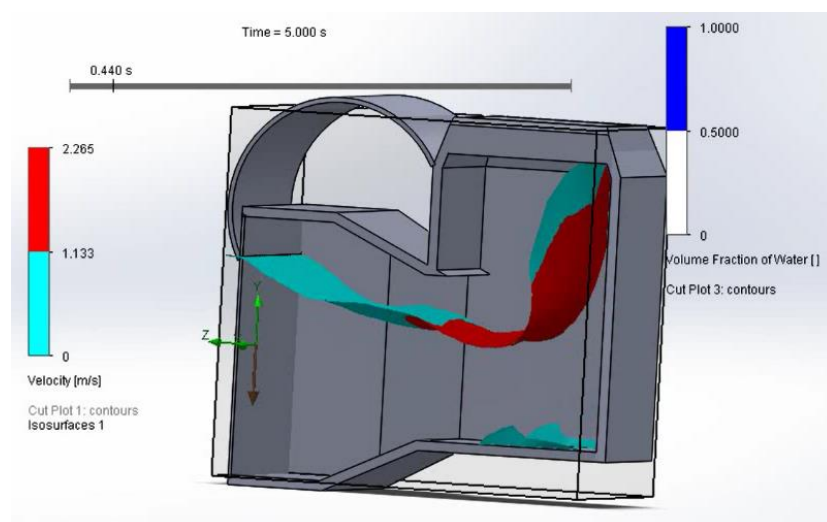


Figura 3.22 Simulación del agua dentro de la cámara.
[Elaboración Propia]

En la figura 3.22, se observa el comportamiento de los fluidos en el interior del ducto de OWC, aquí se comprobó la interacción de los fluidos

en el interior, donde el flujo de agua desplaza el aire contenido dentro de la cámara. De los resultados obtenidos grafica 3.23 podemos concluir que existen momentos donde se produce mezcla de fluidos, los valores de potencia obtenidos varían de acuerdo con la fracción de mezcla del fluido, validando como dato útil instantes donde no se produce mezcla. A partir de este análisis se determina la ubicación de la turbina, con el fin de evitar el contacto con el fluido de agua.

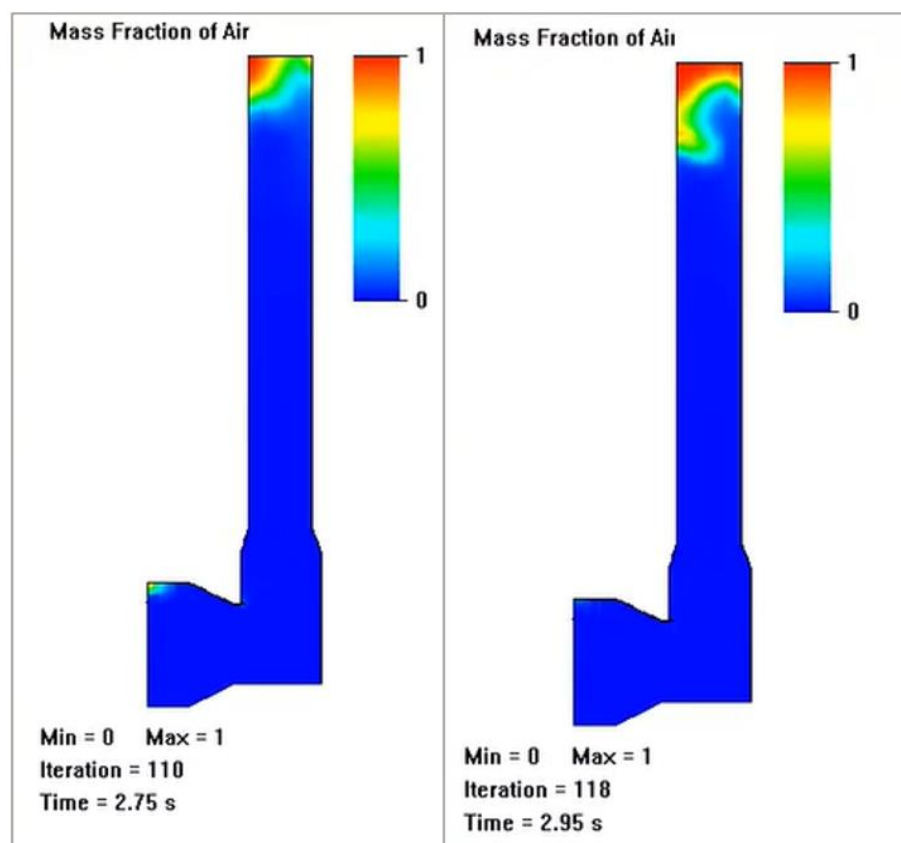


Figura 3.23 Fracción de Aire dentro de la cámara.
[Elaboración Propia]

Para definir el funcionamiento de la cámara en oleaje bajo fue necesario analizar el funcionamiento de la turbina y conocer el caudal mínimo de aire que se debe transportar dentro de la cámara para mover la turbina. Para hallar el caudal mínimo de aire, fue necesario obtener los resultados de dimensionamiento de la turbina.

3.4 Dimensionamiento de la Turbina

Con los parámetros de dimensionamiento descritos en la sección anterior, se obtuvo el resultado del dimensionamiento de la turbina Wells en la tabla 3.8. Se consideró como criterio limitante las dimensiones establecidas del ducto de la cámara con una sección transversal de 99.06 mm X 142,32mm, por lo que el diámetro deberá ser menor que 99.06 mm. Los cálculos realizados se encuentran en el Apéndice A.

3.5 Resultados Obtenidos

**Tabla 3.8 Resultados del dimensionamiento de la turbina.
[Elaboración Propia]**

Parámetro	Dimensiones
Perfil	NACA 0015
Solidez de la turbina (σ)	0,56
Relación base-punta (h)	0,66
Relación de Aspecto (AR)	0,56
Espacio libre de la punta (τ_e)	2 mm
Diámetro hasta la punta (D_{tip})	97,06 mm
Diámetro de la base (D_{hub})	64,06 mm
Longitud del perfil de la turbina (b)	16,50 mm
Longitud de la cuerda del perfil (c)	29,46 mm
Cantidad de aspas (N)	5

Una vez dimensionada la turbina, se calculó el caudal mínimo de aire necesario para mover la turbina usando datos de la tabla 3.8, obteniendo los resultados detallados en la tabla 3.9.

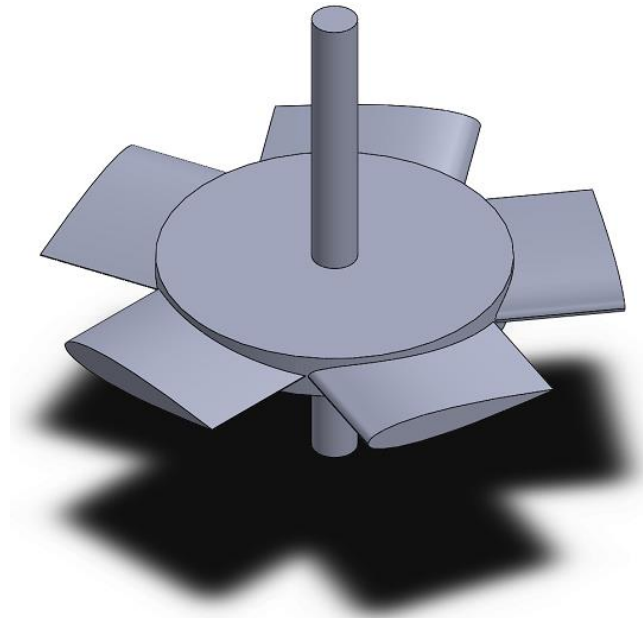


Figura 3.24 Modelo de la Turbina Wells.
[Elaboración Propia]

Tabla 3.9 Datos sección de cálculo.
[Elaboración Propia]

Área aspa A	0.00070 m ²
Área Turbina A'	0.00297 m ²
Área Ducto	0.01409 m ²
Velocidad de flujo aire	1.634 m/s

Tabla 3.10 Valores de Velocidad y Caudal mínimos necesarios. [Elaboración Propia]

Velocidad de entrada mínima de flujo	0.1768 m/s
Caudal de aire mínimo	0.0025 m ³ /s

Se observa en la figura 3.25 una representación del movimiento del flujo de aire a través de la turbina.

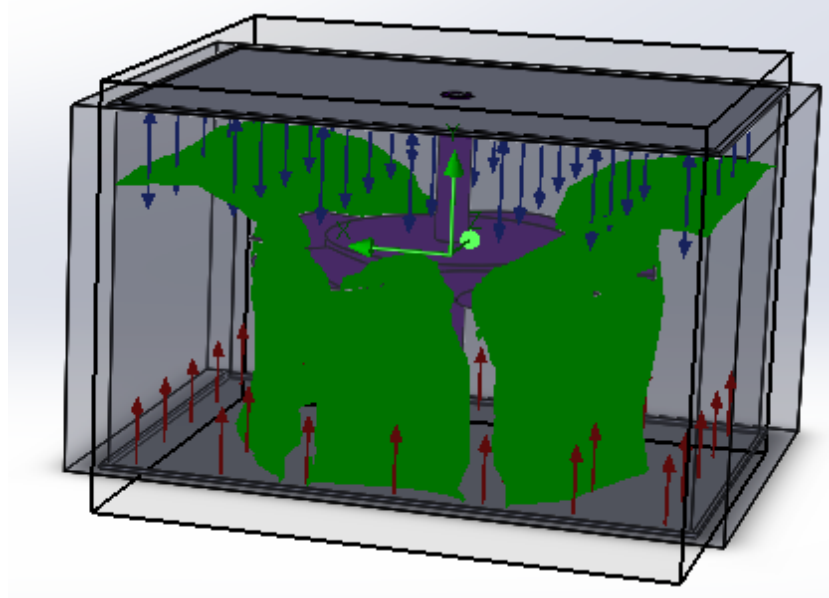


Figura 3.25 Flujo aire a través de la turbina.
[Elaboración Propia]

Potencia Entregada al Generador

Tabla 3.11 Potencia entregada al generador.
[Elaboración Propia]

Eficiencia de la turbina (η)	Potencia flujo (W)	Potencia entrega Turbina (W)
33%	8,61	2,84

La selección del generador que mejor se adapte para la generación no corresponde al alcance de este proyecto.

3.6 Análisis de Costos

Para la manufactura del prototipo, se decidió emplear plancha de acero resistente a la corrosión para la construcción de la cámara. Por otra parte, para la manufactura de la turbina, se decidió acudir a la manufactura aditiva por extrusión con filamento de PLA, ya que al tener geometrías complejas en las aspas de la turbina, sería muy costosa la fabricación por métodos convencionales como el mecanizado. El PLA es fácil de trabajar, su costo es de 18-30 dólares por kilogramo.

Para estimar el costo de la manufactura del prototipo, se debe tomar en cuenta todo el proceso de manufactura de la pieza. A continuación, los factores que intervienen en el costo de manufactura son:

Tabla 3.12 Análisis de Costos de la Cámara.
[Elaboración Propia]

Tipo de Material	Acero
Precio Unitario por plancha	\$29,69
Cantidad	3
Mano de Obra	35
Total	\$124,07

Tabla 3.13 Análisis de Costos de la Turbina.
[Elaboración Propia]

Tipo de Material	PLA
Precio del filamento	\$20
Tamaño del espacio de trabajo	20 x 20
Peso de la pieza	40.49gr
Horas Impresión	2 horas
Costo electricidad por kWh	\$ 0.09
Total	\$0.82

La generación de electricidad mediante el uso de las olas del mar como fuente, es un gran avistamiento debido a los diferentes problemas que vienen en su cauce. Su materia prima es una sustancia altamente corrosiva, por lo que el sistema necesita protección extra por su constante contacto, si se desea que el sistema perdure.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

- Se diseñó un prototipo a escala laboratorio de un sistema captador de energía undimotriz de sistema de columna de agua oscilante. Para su desarrollo se respetaron criterios de diseño de ingeniería, criterios de funcionamiento de trabajo, así como condiciones ambientales. Por medio del modelamiento se analizó el comportamiento de las olas utilizando la teoría de la ola solitaria y las ecuaciones en aguas someras.
- De los resultados de la simulación estática del sistema, por medio del análisis de tensión realizada a la estructura, se concluyó que el mayor esfuerzo se da en pequeñas secciones donde está en contacto la placa con la cámara alcanzando un valor máximo de 870 Pa aproximadamente. La estructura sufre deformaciones de orden $1,23 \times 10^{-6}$ mm esto debido a la fuerza de impacto de la ola al sistema, no generando mayores inconvenientes a nivel estructural.
- Del análisis de la estructura en conjunto se obtuvo un factor de seguridad mayor a uno por lo que se concluye que el sistema no fallara ante las cargas a las que se encuentra sometido.
- Por medio del sistema de pruebas se logró modelar el comportamiento de la ola que se propaga en el canal hidráulico hasta la entrada de la cámara y luego el comportamiento del fluido en el interior del dispositivo. Con una simulación de ola de 100 mm de altura se estimó una velocidad promedio de flujo de aire de 1,63 m/s para la superficie de control de la turbina.
- Se seleccionó una turbina tipo Wells, debido a su perfil aerodinámico, simétrico, que gira en un solo sentido, optimizando al máximo el caudal, permitiendo generar ganancia de potencia en todo instante. La salida motriz de la turbina logró generar una potencia promedio estimada de 2,84 W, considerando su eficiencia mínima aproximada del 33%.

- Considerando que el prototipo se diseñó a escala de laboratorio con la finalidad de ser utilizado como un dispositivo didáctico, se concluye que la manufactura aditiva o impresión 3D, es la mejor alternativa para la construcción de elementos de geometría compleja, ya que presenta mayor facilidad de construcción en comparación con el tiempo que con llevaría una construcción manual, con un valor estimado de \$89,99
- El diseño del prototipo considera los criterios del análisis dimensional, por ende, puede ser escalado a tamaño real en ubicaciones de aguas someras con condiciones de olas no muy altas, por lo tanto, cualquier modelo de pruebas podría ser instalado en zonas con estas características donde la escala horizontal es mucho mayor que la vertical, es decir, cuando la longitud de la ola es mucho mayor que su altura.
- Nuestro prototipo está trabajando en condiciones de aguas someras, pero a condiciones de flujo que no son representativas del Ecuador. Se considera esto porque la potencia que se genera en la práctica es mucho menor.
- La selección de elementos mecánicos como el motor y rodamientos del dispositivo, no entra al alcance del estudio de este proyecto por lo que se deja a disposición para futuros estudios.
- Los softwares de dinámica de fluidos computacionales son herramientas muy útiles capaces de reducir costos, ya que nos permitieron optimizar el dispositivo y estimar su potencia sin necesidad de realizar múltiples prototipos para pruebas experimentales.

4.2 Recomendaciones

- Se recomienda empezar la simulación en FLUENT con un tiempo de paso de no más de 0.001 segundos por aproximadamente 200 iteraciones, ya que esto permitirá que la simulación se estabilice y se dé la convergencia entre los resultados obtenidos. Pasadas las 200 iteraciones, se puede subir gradualmente el tiempo de paso hasta completar el tiempo de simulación requerido.
- Para futuros trabajos, se recomienda simular una mayor cantidad de longitudes de onda, ya que esto nos permitirá obtener mejores

resultados del comportamiento de las olas con respecto al tiempo y por lo tanto un perfil de velocidad con menos error.

- Para obtener resultados válidos del flujo a través de la turbina, se recomienda realizar el mallado diferenciado con el método de inflación en el contorno de la turbina para mejorar la calidad.
- En torno al diseño de estos sistemas, se recomienda precisar el análisis de la interacción del frente de ola con la estructura oscilante, ya que este factor interviene en el comportamiento y capacidad del dispositivo para generar energía.
- Analizar la fracción de aire para identificar cuando se produce mezcla aire con agua.
- Se recomienda usar una interfaz como Matlab que permite procesar los datos hidrodinámicos obtenidos en ANSYS, por medio de su herramienta de Simulink es posible modelar sistemas dinámicos por medio de un diagrama de bloques obteniendo así un mejor procesamiento e interpretación de datos.

BIBLIOGRAFÍA

- Agr, I. (2003). Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos Escuela Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y.
- Alejandro, M. F., Hernández, H., Israel, J., Ayrton, M. R., Baldwin, M., Gerardo, E., & Rodolfo, S. C. (2019). Tema A1 Diseño Mecánico : Aprovechamiento energético “ Dinámica de una caja d e velocidad unidireccional para un convertidor de energía undimotriz .”
- Carreras, G., Gyssel, P., Balbiani, M., Maldonado, N., Cirelli, E., Montoneri, M., & Benitez, N. (2019). Energía undimotriz - tecnología argentina para la generación de energía eléctrica. 44, 39–47.
- Carta González, J. A., Calero Pérez, R., Colmenar Santos, A., & Castro Gil, M. A. (2009). Centrales de energías renovables González, José A C Pérez, Roque C Santos, Antonio C Gil, Manuel A C.
- Caso, E. D. E. (2017). Prototype Design for Transformation of Wave Energy in Electricity Energy. 13.
- Das, T. K., Halder, P., & Samad, A. (2017). Optimal design of air turbines for oscillating water column wave energy systems: A review. *The International Journal of Ocean and Climate Systems*, 8(1), 37–49. <https://doi.org/10.1177/1759313117693639>
- Dawson, C., & Mirabito, C. (2008). The shallow-water equations.
- Falcão, A. F. O., & Henriques, J. C. C. (2016). Oscillating-water-column wave energy converters and air turbines: A review. In *Renewable Energy* (Vol. 85, pp. 1391–1424). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.07.086>
- Fernández, J. (2008). Una aproximación al aprovechamiento de la energía de las olas para la generación de electricidad. Universidad Politécnica de Madrid, 147.
- Fernández, L. (2017). Diseño, construcción y aprovechamiento energético de columnas de agua oscilantes ubicadas en nuevo dique proyectado en el puerto de motril. In *Diseño, construcción y aprovechamiento energético de columnas de agua oscilantes ubicadas en nuevo dique proyectado en el puerto de motril*.
- González, J. A. C., Pérez, R. C., Santos, A. C., & Gil, M. A. C. (2009). Centrales de energías renovables González, José A C Pérez, Roque C Santos, Antonio C Gil, Manuel A C.
- Gutiérrez-Guzmán, N., Serra-B., J. A., & Dussan-Sarria, S. (2012). Prioritisation of critical

- factors to implement good agricultural practices among small producers. *Prioritisation of Critical Factors to Implement Good Agricultural Practices among Small Producers*, 9(69), 221–237.
- Horko, M. (2007). CFD Optimization of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter. <https://doi.org/10.1109/ICCSRE.2019.8807608>
- Instituto Nacional de Preinversión. (2013). Estudio de la energía de olas, corrientes y energía cinética de ríos en el Ecuador para generación eléctrica. 1, 20.
- IRENA. (2014). Wave Energy Technology Brief. IRENA Ocean Energy Technology Brief 4 de Junio de 2014, desde www.irena.org
- James, S., & Stull, R. (2016). Wave Characteristics. UBC ATSC 113 - Weather for Sailing, Flying & Snow Sports. Accedido el 3 de Marzo de 2016, desde https://www.eoas.ubc.ca/courses/atsc113/sailing/met_concepts/08-met-waves/8b-wave-characteristics/index.html
- Kraemer, D. R. B., & McCormick, M. E. (2019). Ocean wave-energy conversion. In *Encyclopedia of Ocean Sciences* (3rd ed., Issue August). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.11490-3>
- Mørk, G., Barstow, S., Kabuth, A., & Pontes, M. T. (2010a). Assessing the global wave energy potential. *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*, 3(2008), 447–454. <https://doi.org/10.1115/OMAE2010-20473>
- Mørk, G., Barstow, S., Kabuth, A., & Pontes, M. T. (2010b). Assessing the global wave energy potential. *Proceedings of the International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering - OMAE*, 3, 447–454. <https://doi.org/10.1115/OMAE2010-20473>
- Neill, S. P., & Hashemi, M. R. (2018). Fundamentals of ocean renewable energy: Generating electricity from the sea. In *Fundamentals of Ocean Renewable Energy: Generating Electricity from the Sea*. <https://doi.org/10.1016/C2016-0-00230-9>
- Ortiz, D., & Gallardo, E. (2019). Diseño de elevador de personal y carga para uso en etapa de construcción de edificaciones altas.
- Pecher, A. (2017). Experimental Testing and Evaluation of WECs (pp. 221–260). https://doi.org/10.1007/978-3-319-39889-1_9
- REN21. (2020). Renewables 2020 Global Status Report. In REN21 Secretariat. Accedido el 20 de Enero, 2020 desde <http://www.ren21.net/resources/publications/>
- Rodríguez, C., & Caicedo, F. (2019). Diseño de un prototipo para prueba de conversión

de energía undimotriz. Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Villela, Lucia maria aversa. (2013). Journal of Chemical Information and Modeling, 53(9), 1689–1699.

Yunus, A. cengel, & Cimbala, J. M. (2012). Fluid Mechanics Fundamental and Aplication Third Edition. In Foreign Affairs.

APÉNDICES

APÉNDICE A: Velocidades con respecto al tiempo obtenidas en ANSYS.

Tabla A.1 Velocidades en la entrada de la cámara.
[Elaboración Propia]

t(s)	Velocidad X [m/s]	Velocidad Y [m/s]	Magnitud [m/s]
0,00	-0,0001	-4,10217E-05	0,0001
0,00	0,0000	3,39000E-05	0,0001
0,01	0,0001	-8,11427E-06	0,0001
0,01	0,0002	-6,25633E-05	0,0002
0,02	0,0005	-2,32747E-04	0,0005
0,02	0,0007	-4,21770E-04	0,0008
0,03	0,0011	-6,02115E-04	0,0012
0,04	0,0013	-7,58617E-04	0,0015
0,05	0,0016	-8,76134E-04	0,0018
0,06	0,0017	-8,97756E-04	0,0019
0,06	0,0018	8,58259E-04	0,0020
0,09	0,0019	-1,21856E-03	0,0023
0,14	0,0018	-1,46365E-03	0,0023
0,16	0,0021	-1,39341E-03	0,0025
0,19	0,0019	-1,67699E-03	0,0025
0,25	0,0037	-5,23439E-04	0,0037
0,40	0,0035	1,55073E-03	0,0038
0,50	0,0084	2,67343E-03	0,0088
0,60	0,0135	3,04963E-03	0,0139
0,70	0,0195	3,51521E-03	0,0198
0,80	0,0231	4,14714E-03	0,0235
0,90	0,0237	4,64862E-03	0,0242
1,00	0,0225	5,29669E-03	0,0231
1,06	0,0221	5,56683E-03	0,0228
1,13	0,0222	5,78477E-03	0,0230
1,22	0,0228	6,25931E-03	0,0236
1,40	0,0205	8,22665E-03	0,0220
1,50	0,0165	9,40220E-03	0,0190
1,60	0,0143	1,17822E-02	0,0185
1,70	0,0183	1,63073E-02	0,0245
1,80	0,0343	2,50351E-02	0,0425
1,90	0,0755	4,11072E-02	0,0860
2,00	0,1733	6,69999E-02	0,1858

2,10	0,3631	8,66939E-02	0,3733
2,20	0,5977	6,14389E-02	0,6008
2,22	0,6321	4,25581E-02	0,6336
2,24	0,6599	1,94178E-02	0,6602
2,26	0,6810	-5,98384E-03	0,6811
2,28	0,6948	-3,24196E-02	0,6956
2,30	0,7023	-5,60011E-02	0,7045
2,34	0,6993	-9,17031E-02	0,7053
2,38	0,6771	-1,13223E-01	0,6865
2,40	0,6595	-1,22156E-01	0,6707
2,42	0,6390	-1,26942E-01	0,6515
2,46	0,6147	-1,35492E-01	0,6295
2,50	0,5253	-1,38984E-01	0,5434
2,52	0,4914	-1,39846E-01	0,5109
2,54	0,4560	-1,40009E-01	0,4770
2,56	0,4195	-1,39565E-01	0,4421
2,58	0,3822	-1,38681E-01	0,4066
2,60	0,3439	-1,37166E-01	0,3703
2,62	0,3073	-1,36102E-01	0,3361
2,64	0,2763	-1,36992E-01	0,3084
2,66	0,2501	-1,39258E-01	0,2862
2,68	0,2263	-1,42320E-01	0,2673
2,70	0,2029	-1,45299E-01	0,2495
2,72	0,1772	-1,41170E-01	0,2265
2,74	0,1467	-1,46871E-01	0,2076
2,76	0,1127	-1,44583E-01	0,1833
2,78	0,0792	-1,41472E-01	0,1621
2,80	0,0468	-1,37783E-01	0,1455
2,82	0,0158	-1,33310E-01	0,1342
2,84	-0,0135	-1,27854E-01	0,1286
2,86	-0,0411	-1,21048E-01	0,1278
2,90	-0,0932	-1,02153E-01	0,1383
2,92	-0,1172	-9,00856E-02	0,1478
2,94	-0,1397	-7,63699E-02	0,1592
3,00	-0,2000	-2,39566E-02	0,2015
3,10	-0,2878	1,16810E-01	0,3106
3,20	-0,3985	4,41039E-01	0,5944
3,30	-0,5677	4,84096E-01	0,7461
3,40	-0,5368	-1,41025E-01	0,5550

3,50	-0,5052	-3,24112E-01	0,6002
3,60	-0,3923	-2,12747E-01	0,4462
3,70	-0,2668	-9,28948E-02	0,2825
3,80	-0,1798	-2,87947E-02	0,1821
3,90	-0,1133	-1,72773E-02	0,1146
4,00	-0,0462	-3,89711E-02	0,0604
4,10	0,0228	-6,58728E-02	0,0697
4,20	0,0760	-8,19184E-02	0,1118
4,24	0,0927	-8,34284E-02	0,1247
4,26	0,1007	-8,31596E-02	0,1306
4,30	0,1155	-8,15025E-02	0,1414
4,40	0,1457	-7,12597E-02	0,1622
4,50	0,1648	-6,04223E-02	0,1756
4,60	0,1870	-5,24916E-02	0,1942
4,70	0,2234	-5,66396E-02	0,2305
4,80	0,2635	-9,42444E-02	0,2799
4,90	0,2924	-1,54172E-01	0,3306
5,00	0,2345	-1,99009E-01	0,3075
5,10	0,0937	-1,89954E-01	0,2118
5,20	-0,0140	-1,20781E-01	0,1216
5,30	-0,0711	-7,95211E-02	0,1067
5,40	-0,1609	-1,07160E-01	0,1933
5,42	-0,2492	-1,25289E-01	0,2790
5,44	-0,3829	-1,67339E-01	0,4178
5,46	-0,7101	-1,67584E-01	0,7296

APÉNDICE B: Resultados Numéricos de las Simulaciones en SolidWorks e Inventor.

Simulación Flujo SolidWorks

Tabla B.1 Objetivos de la simulación. [Elaboración Propia]

Nombre de Meta	Unidad	Valor	Valor Promedio	Valor Mínimo	Valor Máximo	Delta	Criterio
SG Pr Velocidad 2	[m/s]	0,519	0,305	0,021	0,628	0,104	0,130
SG Pr Velocidad (X) 1	[m/s]	-0,004	-0,034	-0,333	0,307	0,038	0,047
SG Pr Velocidad (Y) 1	[m/s]	-0,053	-0,023	-0,136	0,000	0,031	0,114
Presión	[Pa]	101737,399	101483,206	101339,880	102029,223	117,519	13,915
Velocidad out	[m/s]	21,971	7,098	1,805	21,971	1,579	0,655
Velocidad out X	[m/s]	0,592	0,112	-0,293	0,592	0,326	0,078
Velocidad out Y	[m/s]	-1,681	0,050	-1,709	1,634	0,596	0,504
Velocidad in	[m/s]	0,519	0,305	0,021	0,628	0,104	0,130
Velocidad in X	[m/s]	-0,004	-0,034	-0,333	0,307	0,038	0,047
Velocidad in Y	[m/s]	-0,053	-0,023	-0,136	0,000	0,031	0,114
SG Tasa de flujo volumétrico 1	[m ³ /s]	-0,333	-0,065	-0,333	0,016	0,043	0,031

Flujo Volumétrico

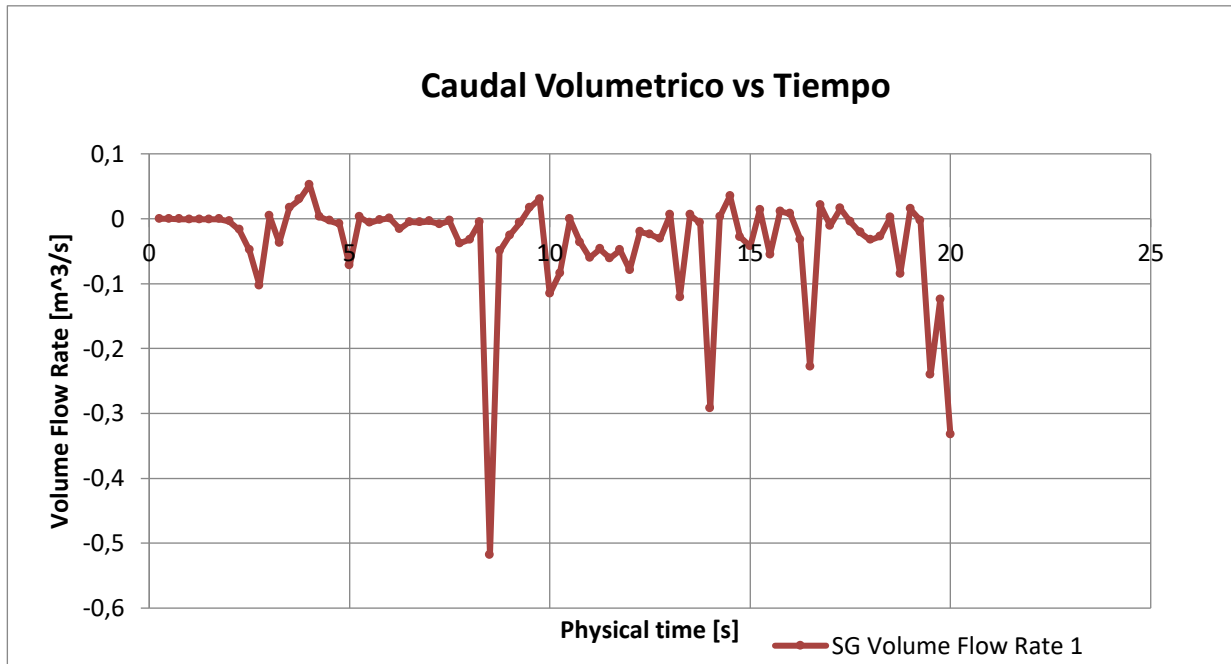


Figura B.1 Curva Caudal Volumétrico vs Tiempo.
[Elaboración Propia]

Velocidades de Entrada

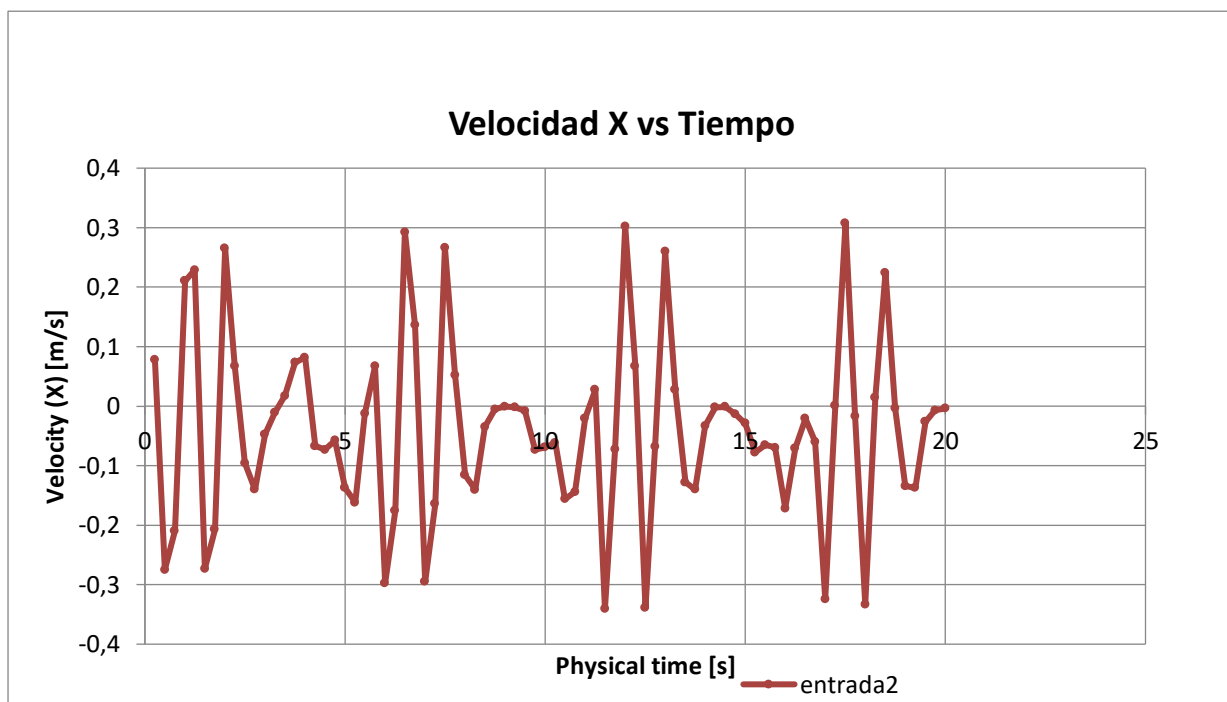


Figura B.2 Velocidad X vs Tiempo.
[Elaboración Propia]

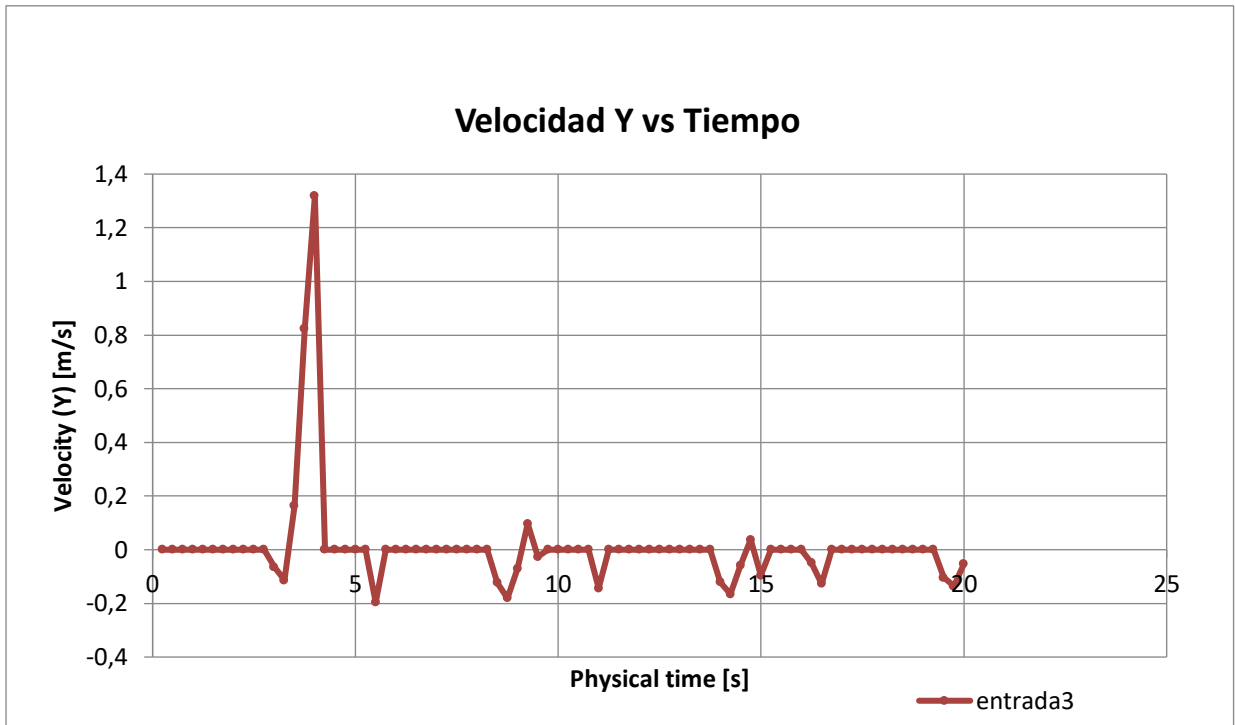


Figura B.3 Velocidad Y vs Tiempo.
[Elaboración Propia]

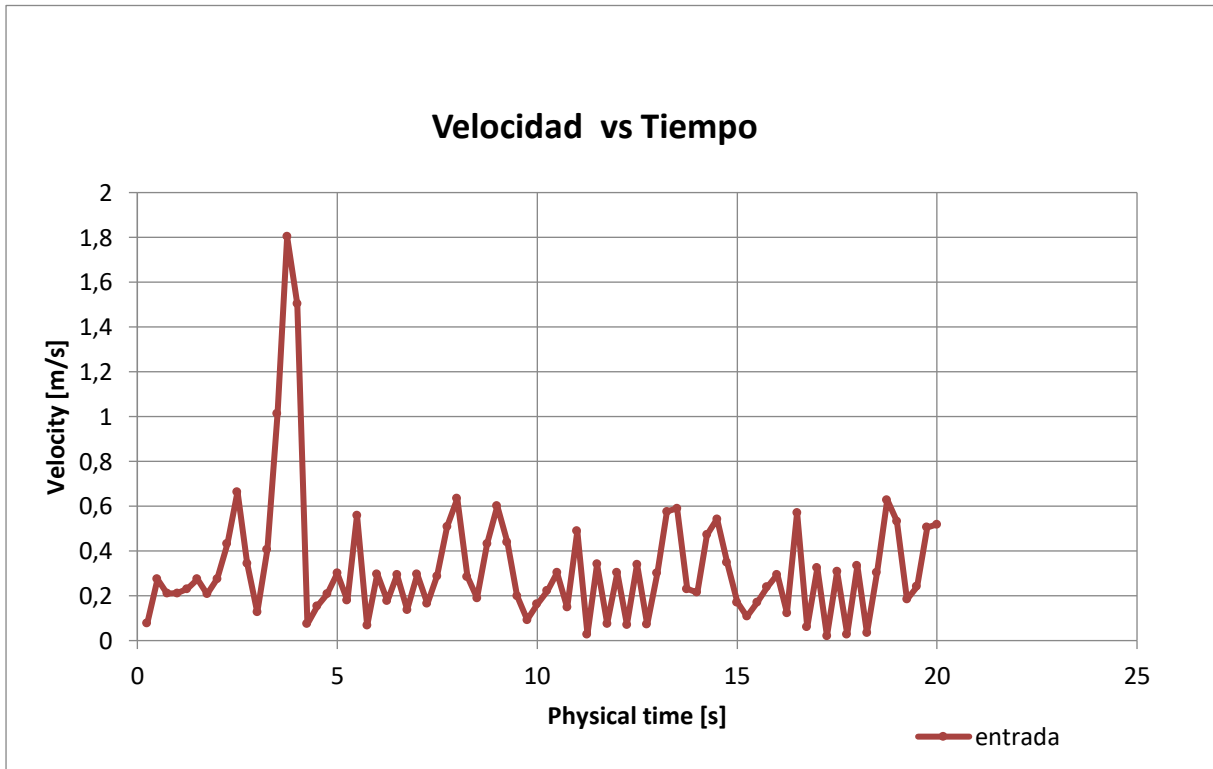


Figura B.4 Velocidad Entrada Promedio vs Tiempo.
[Elaboración Propia]

Velocidades Salida

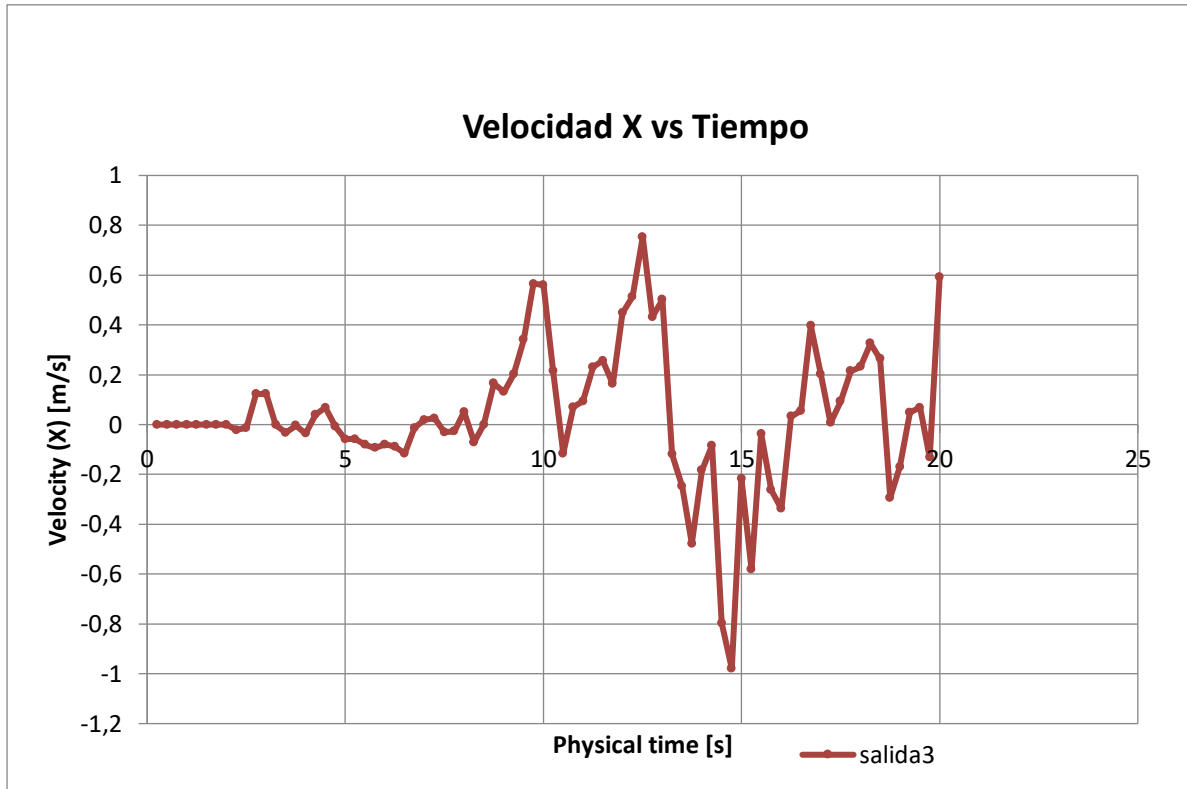


Figura B.5 Velocidad Salida X vs Tiempo. [Elaboración Propia]

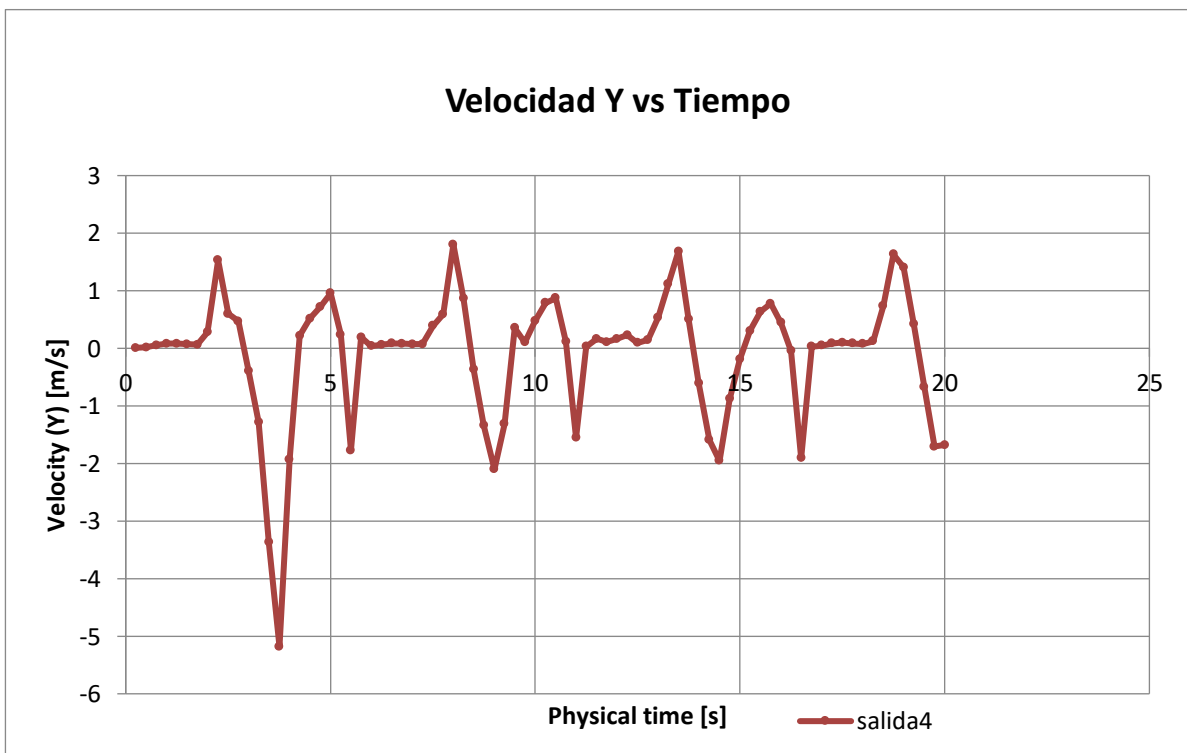


Figura B.6 Velocidad Salida Y vs Tiempo. [Elaboración Propia]

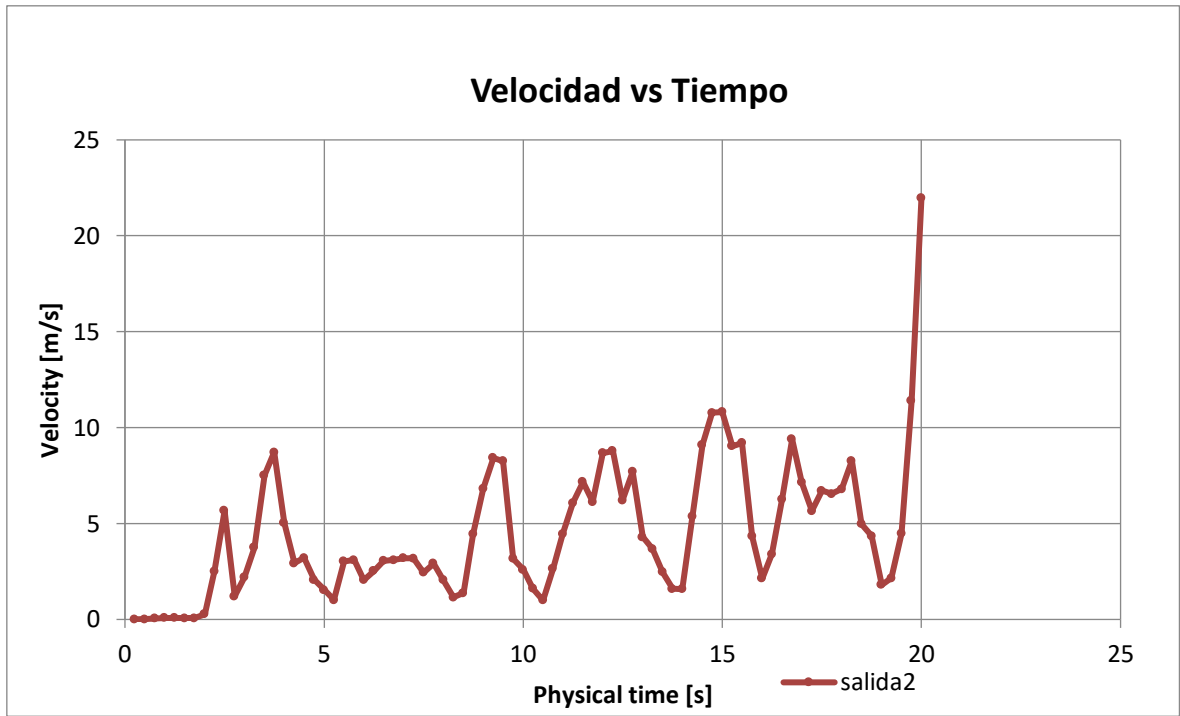


Figura B.7 Velocidad Salida Promedio vs Tiempo.
[Elaboración Propia]

Presión Total

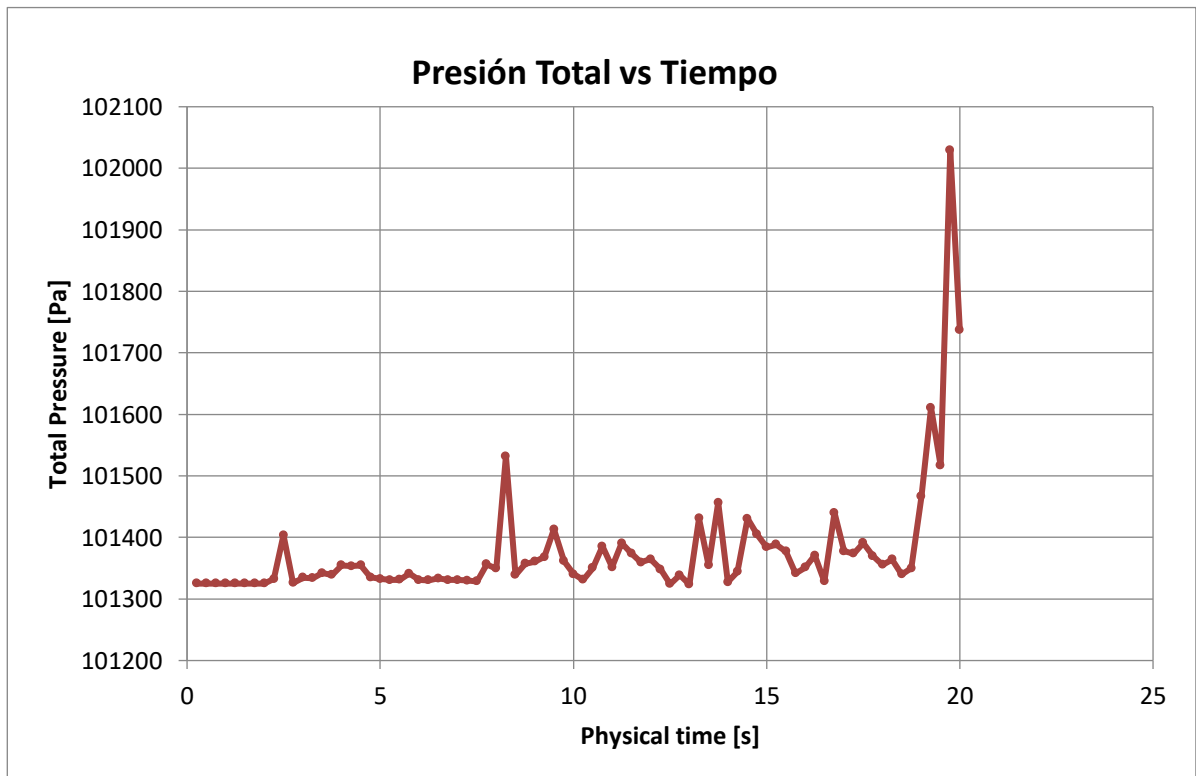


Figura B.8 Presión Total vs Tiempo.
[Elaboración Propia]

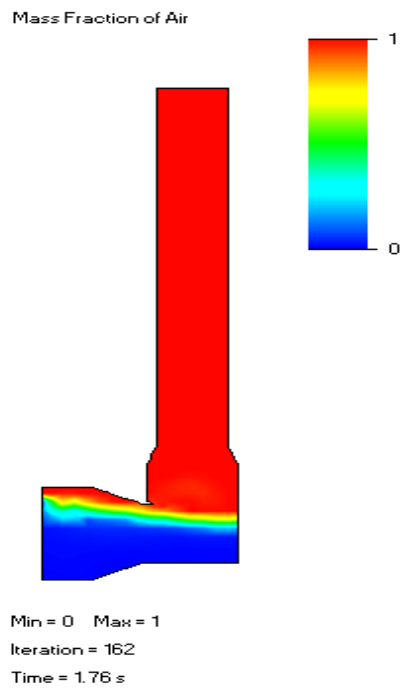


Figura B.9 Fracción de Volumen de Agua subida.
[Elaboración Propia]

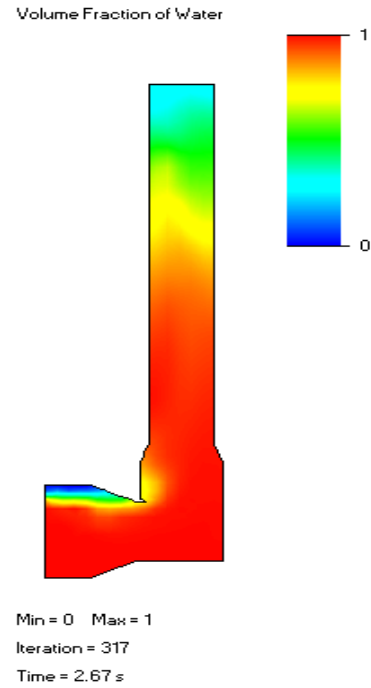


Figura B.10 Fracción de Volumen de Agua bajada.
[Elaboración Propia]

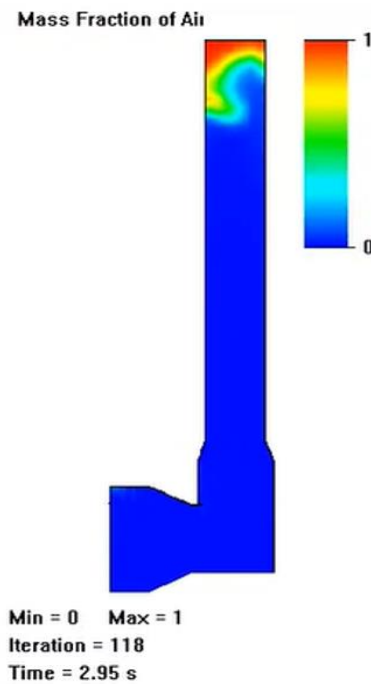
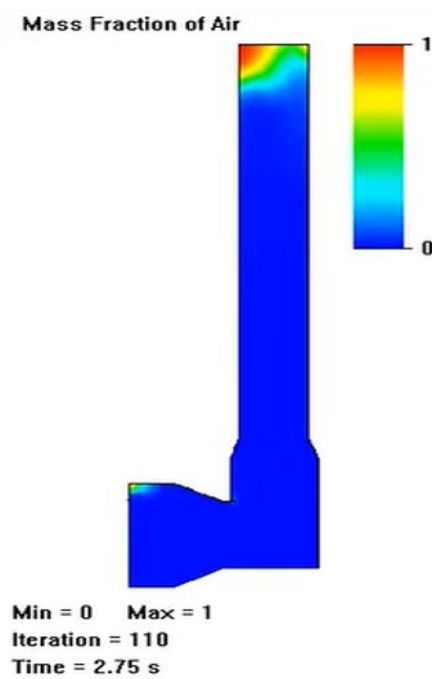


Figura B.11 Fracción de masa de aire. [Elaboración Propia]

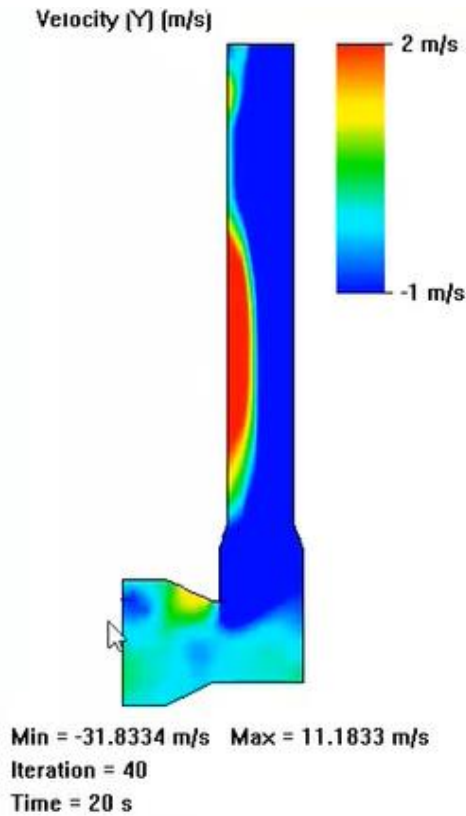


Figura B.12 Velocidad Lateral Y.
[Elaboración Propia]

Tabla B.2 Valores de entalpía y flujo másico de la simulación.
[Elaboración Propia]

Tiempo [s]	Entalpía total Mínima h_{min} (J/kg)	Entalpía total Máxima h_{max} (J/kg)	Entalpía total Promedio \bar{h} (J/kg)	Delta Entalpía Δh	Flujo Másico de aire (kg/s)	Potencia flujo (W)
0,00	298012,66	298012,66	298012,66	1,99	0,0094	18.64
1,00	298012,68	298012,82	298012,78	1,99	0,0013	2.61
2,00	298012,66	298012,66	298012,66	1,99	0,0001	0,28
3,00	297988,83	1213693,04	498978,65	198,36	0,0425	8421,94
4,00	298013,50	374963,18	298824,77	0,68	0,0001	0,0732
5,00	298012,97	507780,07	448259,98	149,43	0,0084	1258,6
6,00	298013,49	315629,63	298764,67	1,52	0,0253	38,45
7,00	298013,50	307909,76	298461,65	1,66	0,0243	40,27
8,00	1224135,46	1229192,07	1228569,96	928,51	0,0020	1829,96
9,00	298019,76	1094092,86	371498,80	71,76	0,0051	364,67

10,00	298014,95	714551,53	335896,37	137,64	0,0033	452,69
11,00	298011,24	964095,60	375197,29	34,23	0,0017	57,96
12,00	298013,52	415346,62	305510,46	5,47	0,0012	6,8
13,00	298013,55	1033607,80	649098,96	409,84	0,0009	371,90
14,00	298013,89	1235808,48	964127,17	682,26	0,0051	3473,93
15,00	298013,54	879709,47	356563,94	71,08	0,0275	1957,1
16,00	298020,94	1161811,11	686431,01	458,55	0,0109	5015,9
17,00	298047,29	426339,99	307349,42	2,47	0,0014	3,38
18,00	298034,92	419480,20	306129,50	2,19	0,0014	2,96
19,00	1235714,83	1236367,44	1236259,84	936,24	0,0094	8781,8
20,00	298026,98	1225891,42	388889,74	233,87	0,0000	5,82

Curvas de Potencia Generada en Función de la Fracción Másica

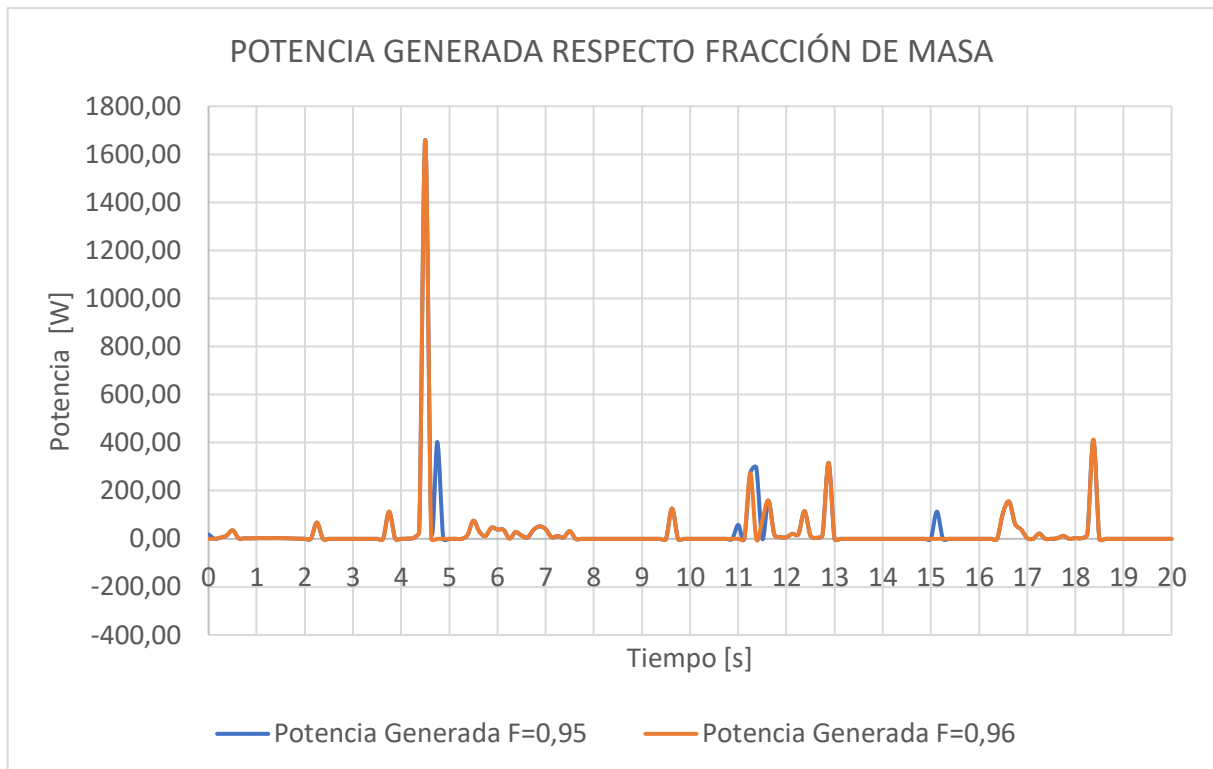
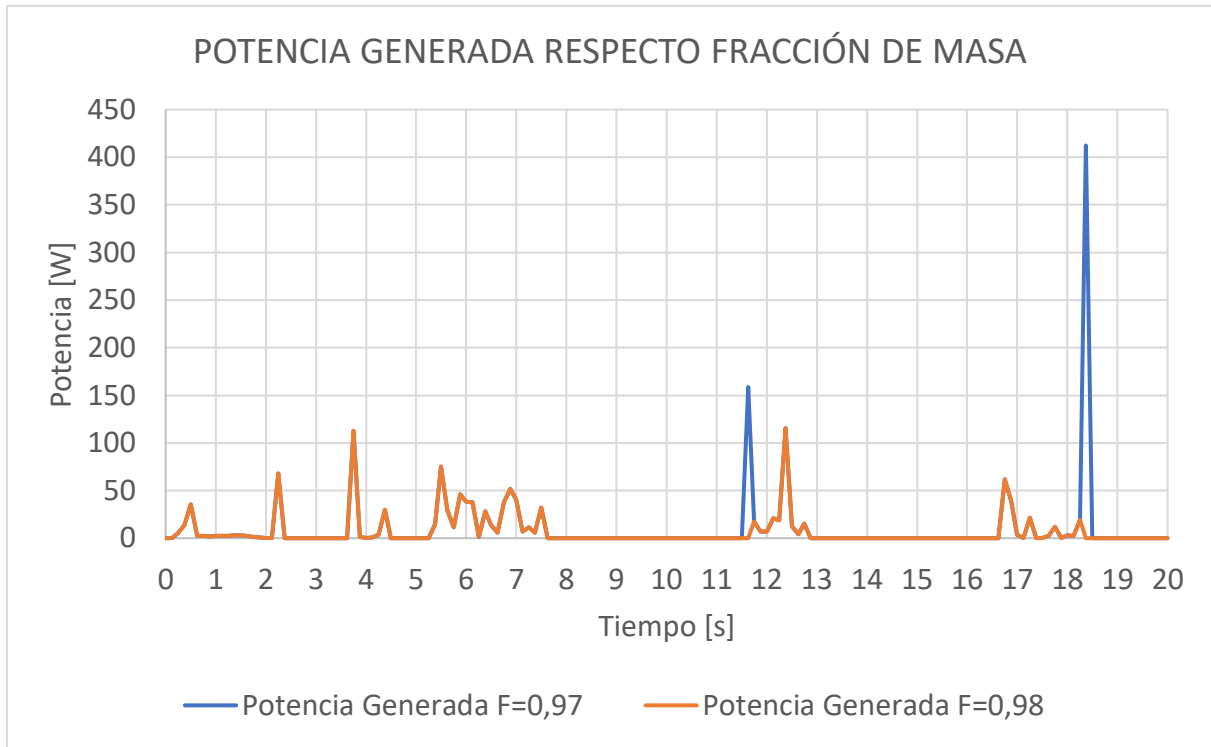


Figura B.13 Curva Potencia vs Tiempo en función de la fracción máxica de aire $0,95 \leq F \leq 0,96$. [Elaboración Propia]



**Figura B.14 Curva Potencia vs Tiempo en función de la fracción másica de aire $0,97 \leq F \leq 0,98$.
[Elaboración Propia]**

APÉNDICE C: Cálculos para el dimensionamiento de la turbina Wells.

Asumiendo un $\tau_e = 2\text{mm}$

$$h = \frac{D_{hub}}{D_{tip}} = 0.6$$

$$D_{hub} = D_{tip} \cdot h$$

$$D_{hub} = (99,06 - 2) \cdot 0,6$$

$$D_{hub} = 58,24 \text{ mm}$$

La b corresponde a la longitud del aspa de la turbina, valor que puede ser deducido de la diferencia de los diámetros mayor y menor de la turbina para así obtener la longitud de cuerda del perfil.

$$b = \frac{(97,06 - 58,24)}{2} = 19,41 \text{ mm}$$

$$AR = \frac{b}{c} = 0,5$$

$$c = \frac{b}{AR} = \frac{19,41}{0,5}$$

$$c = 38,82 \text{ mm}$$

Para determinar el número de aspas z que deberá tener la turbina, se despeja de la ecuación de solidez.

$$\sigma = \frac{2Nc}{\pi D_t(1+h)} = 0.5$$

$$N = \frac{0,5\pi D_{tip}(1+h)}{2c}$$

$$N = \frac{0,5\pi(97,06)(1+0,6)}{2(38,82)}$$

$$N = 3,14$$

El dimensionamiento de una turbina es un proceso iterativo, si el número de aspas no es realista, se debe asumir valores diferentes de σ , h , y AR .

Se realizó una segunda iteración con los siguientes valores:

$$\tau_e = 2 \text{ mm}$$

$$h = 0,66$$

$$AR = 0,56$$

$$\sigma = 0,56$$

Obteniendo los siguientes resultados:

$$D_{tip} = 99,06 \text{ mm} - 2\text{mm} = 97,06\text{mm}$$

$$D_{hub} = D_{tip} \cdot h$$

$$D_{hub} = 97,06 * 0,66$$

$$D_{hub} = 64,06 \text{ mm}$$

$$b = \frac{(97,06 - 64,06)}{2} = 16,50 \text{ mm}$$

$$AR = \frac{b}{c} = 0,56$$

$$c = \frac{b}{AR} = \frac{16,50}{0,56}$$

$$c = 29,46 \text{ mm}$$

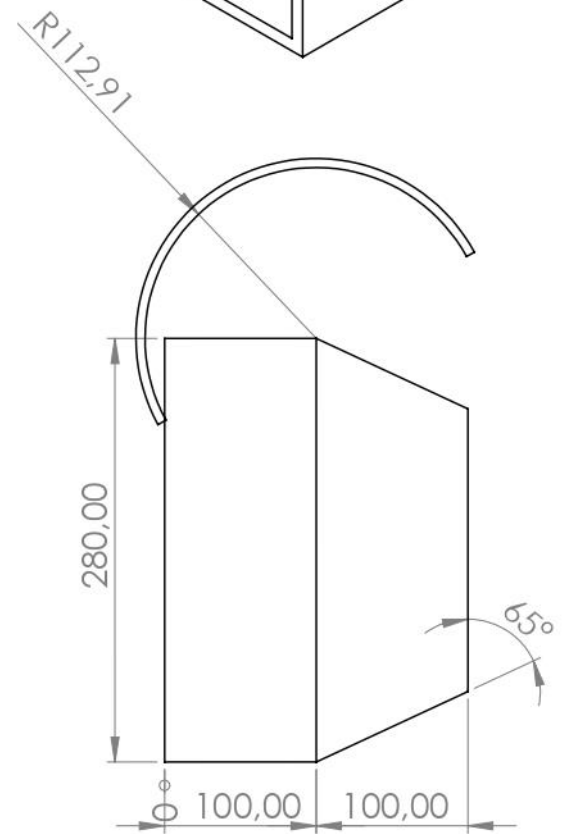
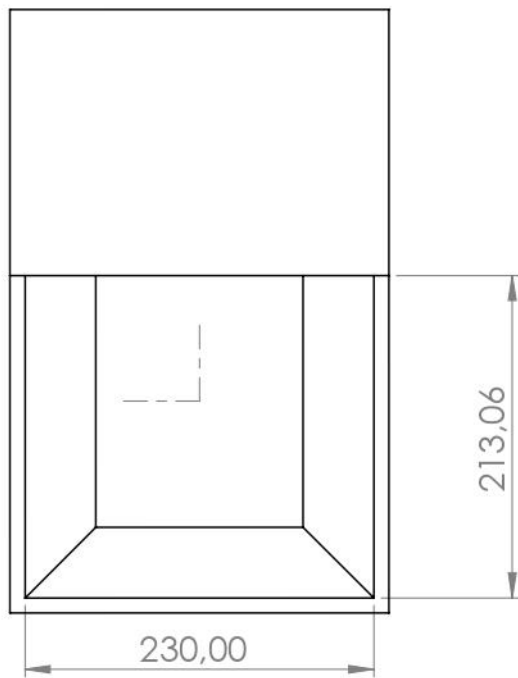
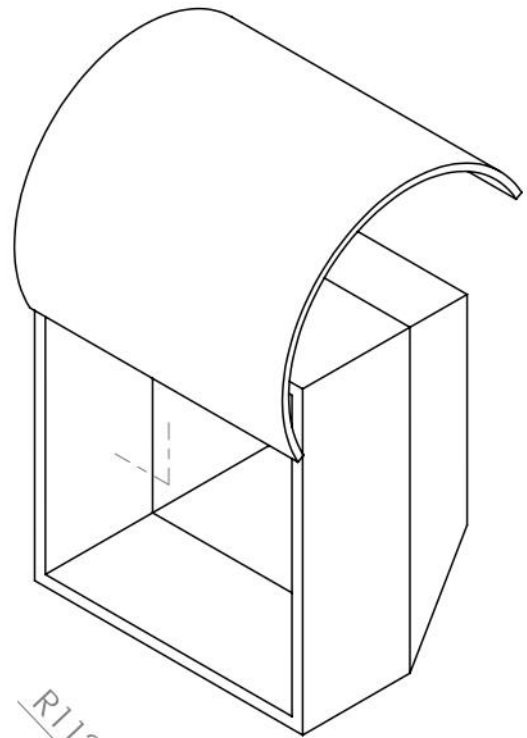
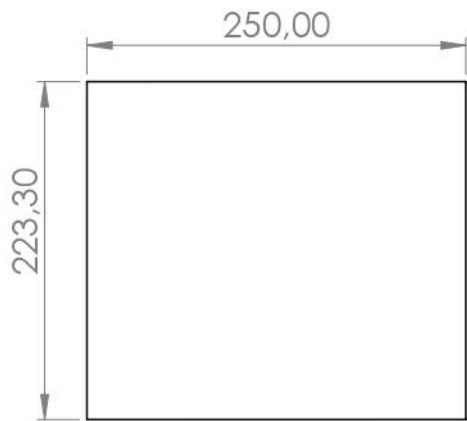
$$\sigma = \frac{2Nc}{\pi D_t(1+h)} = 0,56$$

$$N = \frac{0,5\pi D_{tip}(1+h)}{2c}$$

$$N = \frac{0,5\pi(97,06)(1+0,66)}{2(29,46)}$$

$$N = 4,81 \approx 5 \text{ aspas}$$

APÉNDICE D: Planos del Convertidor Undimotriz



Diseñado por: Gonzalez-Roman Fecha: 12/02/2021

Plano 1 Entrada de la cámara del Captador de Energía Undimotriz

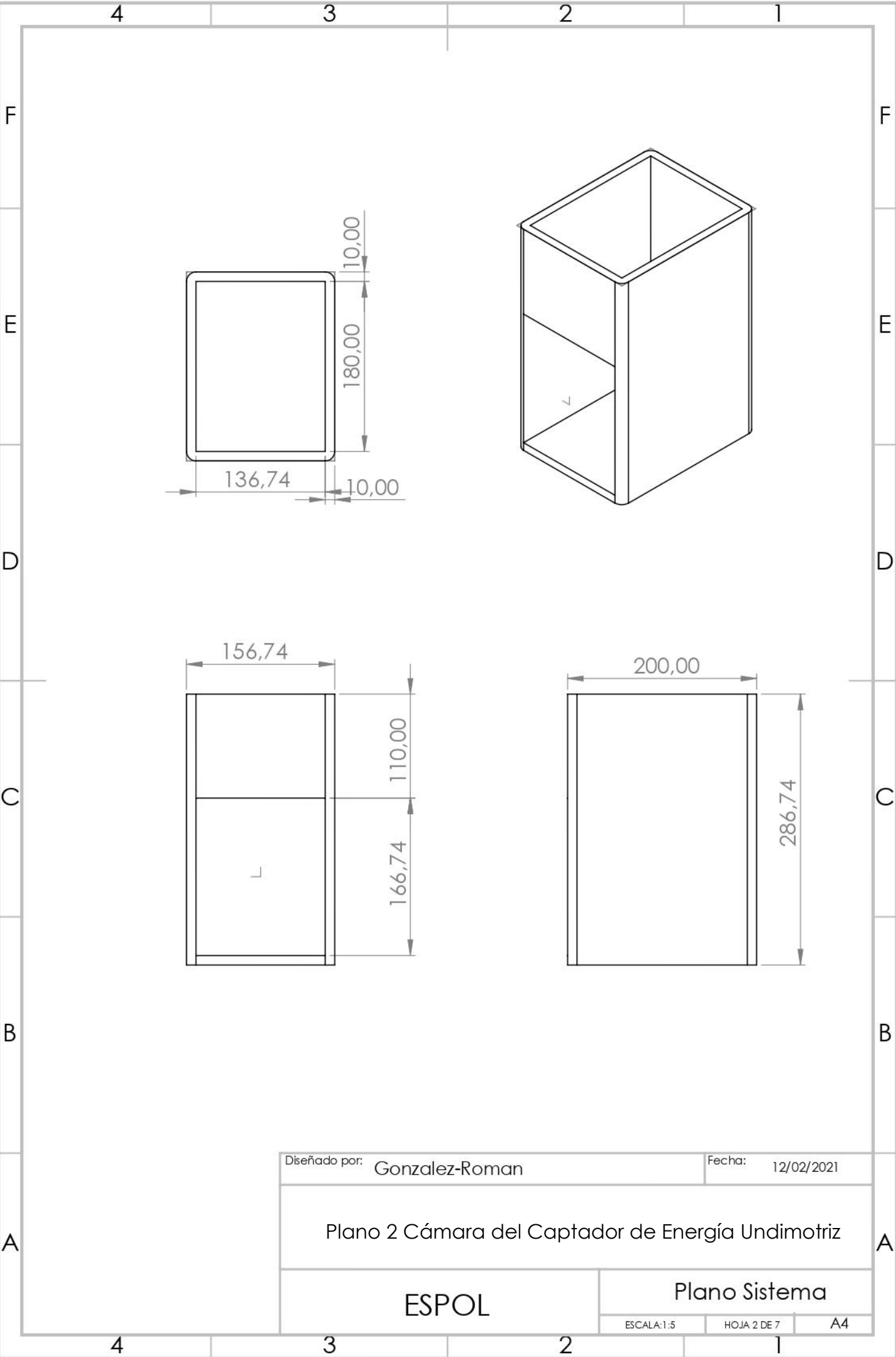
ESPOL

Plano Sistema

ESCALA:1:5

HOJA 1 DE 7

A4



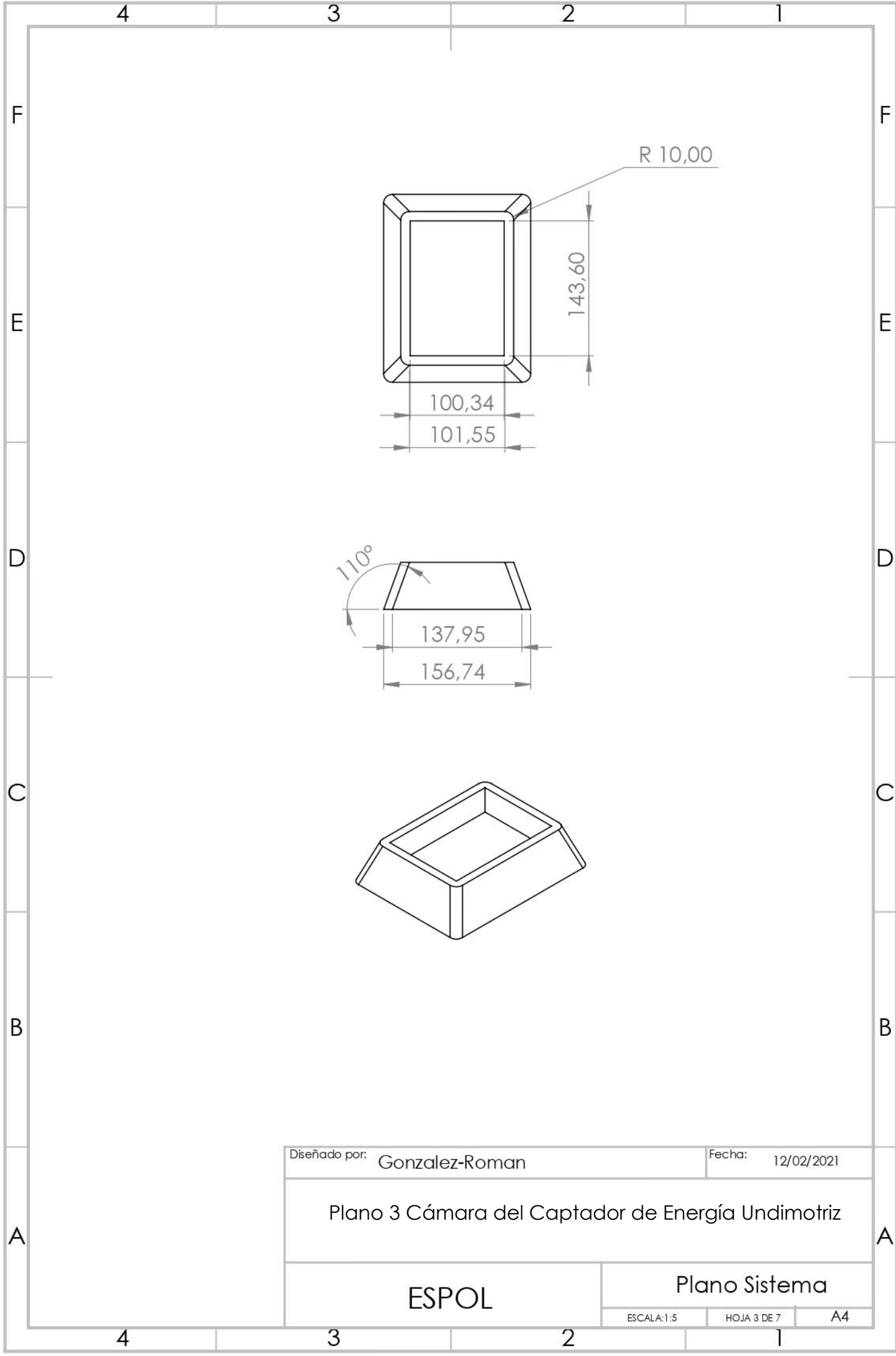
Diseñado por: Gonzalez-Roman Fecha: 12/02/2021

Plano 2 Cámara del Captador de Energía Undimotriz

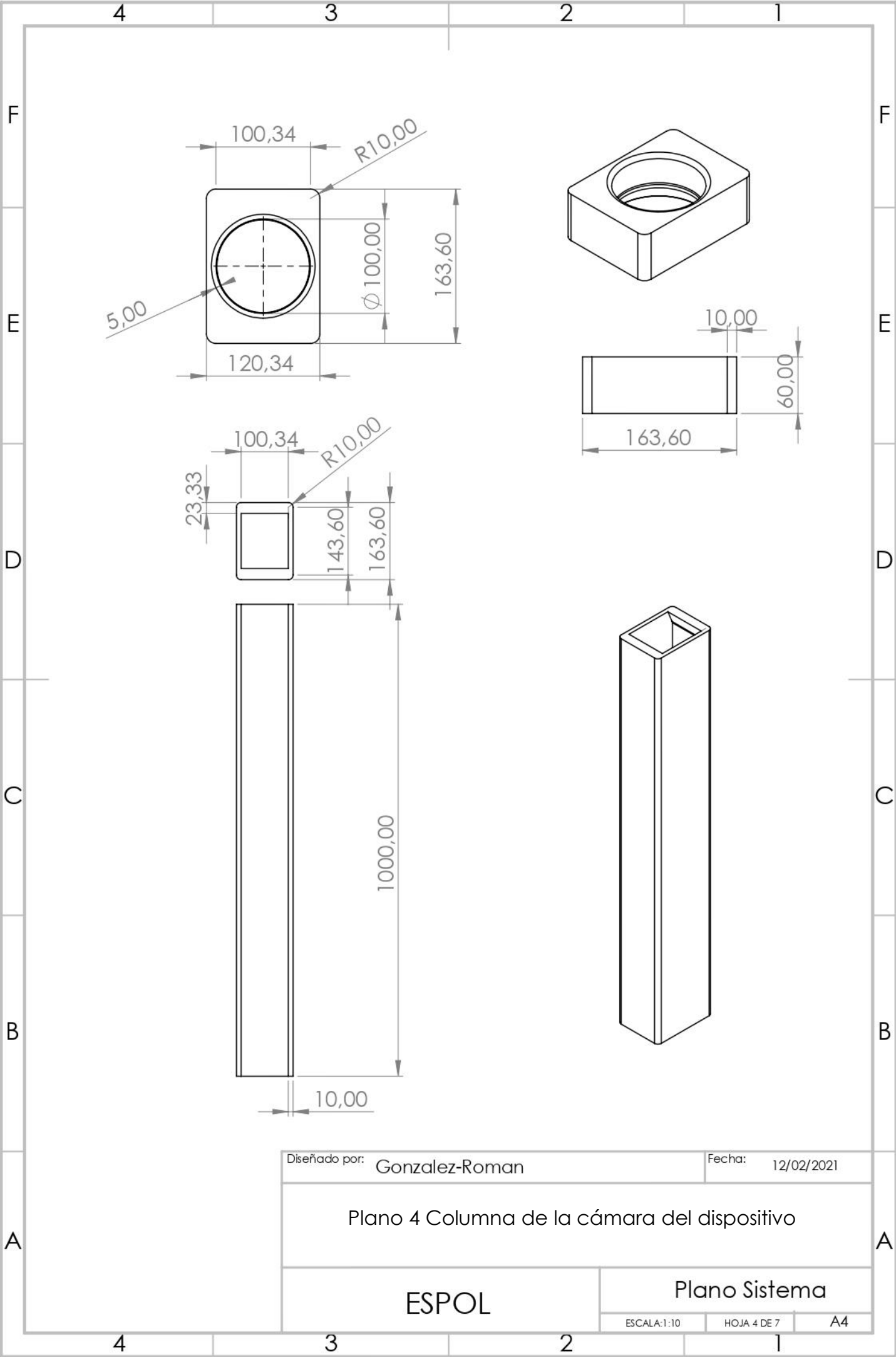
ESPOL

Plano Sistema

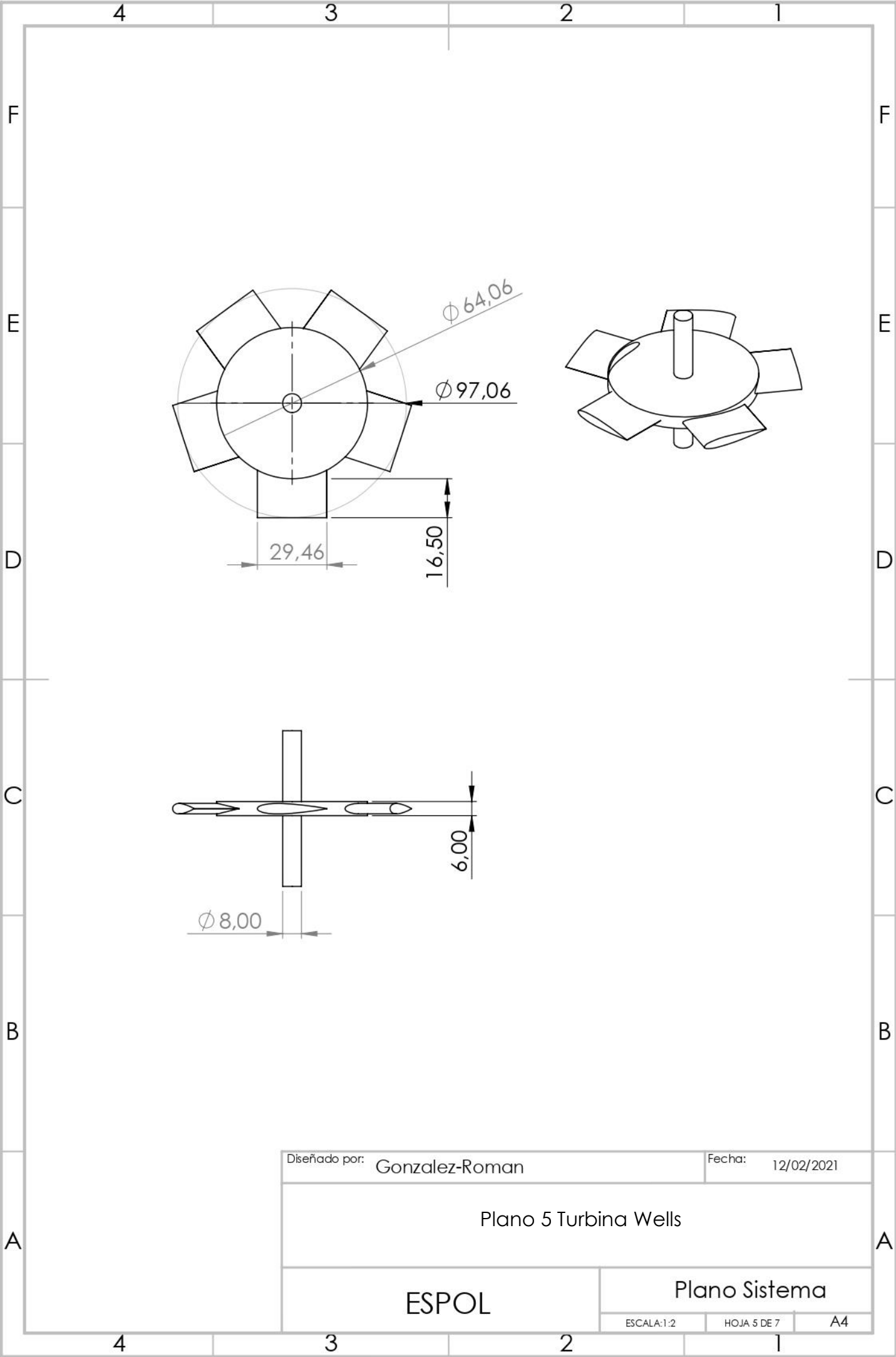
ESCALA:1:5 HOJA 2 DE 7 A4



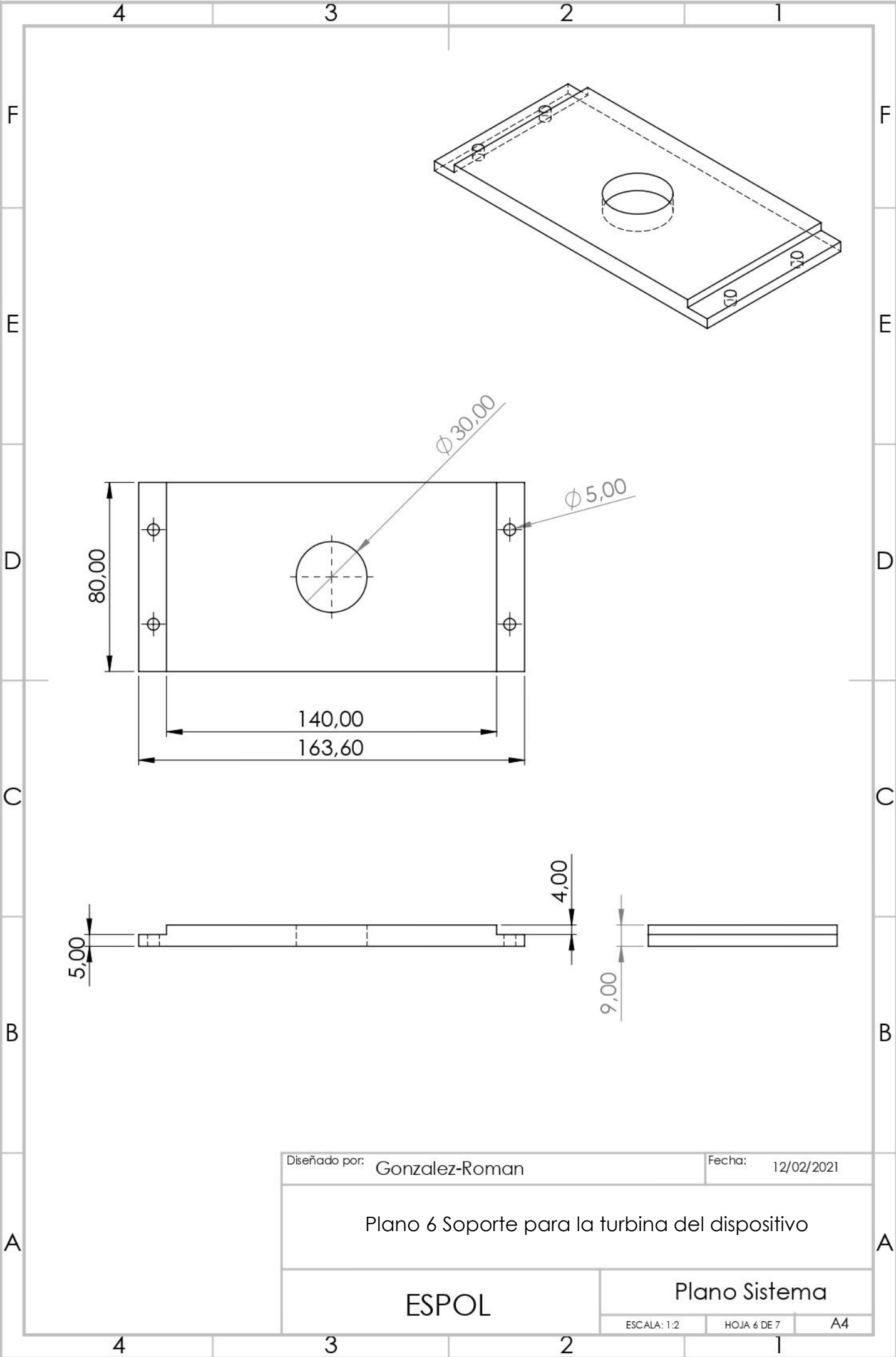
Diseñado por:	Gonzalez-Roman	Fecha:	12/02/2021
Plano 3 Cámara del Captador de Energía Undimotriz			
ESPOL		Plano Sistema	
ESCALA:1:5		HOJA 3 DE 7	A4



Diseñado por:	Gonzalez-Roman	Fecha:	12/02/2021
Plano 4 Columna de la cámara del dispositivo			
ESPOL		Plano Sistema	
		ESCALA:1:10	HOJA 4 DE 7
		A4	



Diseñado por:	Gonzalez-Roman	Fecha:	12/02/2021
Plano 5 Turbina Wells			
ESPOL		Plano Sistema	
ESCALA:1:2		HOJA 5 DE 7	A4



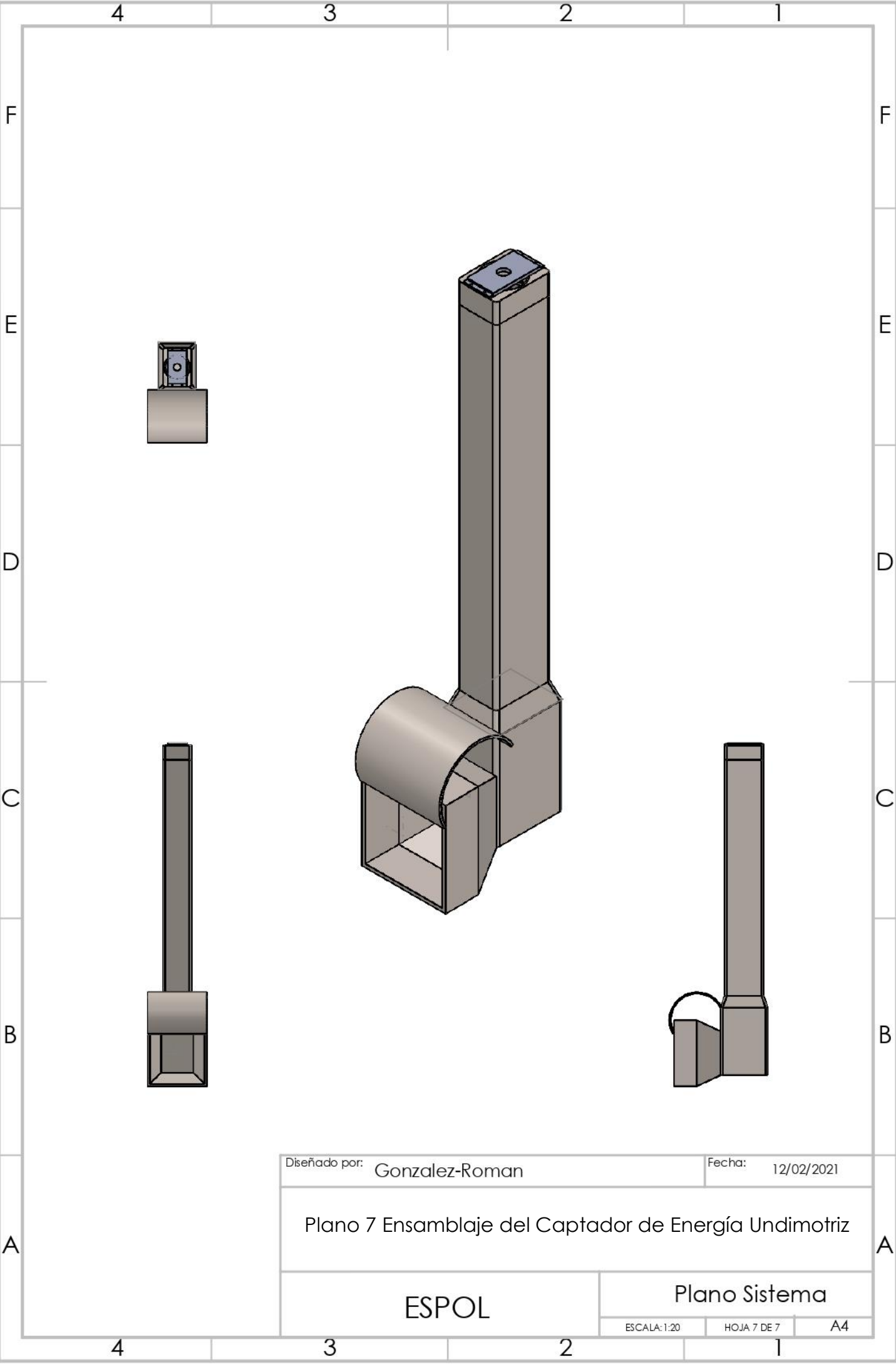
Diseñado por: Gonzalez-Roman Fecha: 12/02/2021

Plano 6 Soporte para la turbina del dispositivo

ESPOL

Plano Sistema

ESCALA: 1:2 HOJA 6 DE 7 A4



Diseñado por:	Gonzalez-Roman	Fecha:	12/02/2021
Plano 7 Ensamblaje del Captador de Energía Undimotriz			
ESPOL		Plano Sistema	
		ESCALA: 1:20	HOJA 7 DE 7
		A4	