

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

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

Optimización de una cámara neumática para sistemas de
conversión de energía undimotriz tipo Columna de Agua
Oscilante

INGE-2756

PROYECTO INTEGRADOR

Previo la obtención del Título de:

Ingeniero Mecánico

Presentado por:

Natalia Andrea Velastegui Marcos

Nashly Paulina Yange Camacho

GUAYAQUIL - ECUADOR

Año: 2024

DEDICATORIA

Este trabajo se lo dedico a mi familia conformada por mis padres, hermana y gato quienes estuvieron conmigo en todas las etapas de mi carrera para darme apoyo emocional y empujarme a seguir adelante.

- Natalia Velastegui

Dedicado a mis amados padres que con su ejemplo me enseñaron a ir tras mis sueños pese a todo, a mis hermanos y hermanas quienes con su amor me han acompañado a la distancia y fueron mi motor para seguir adelante. Dedicado a la memoria de Jessica y Verónica, mis ángeles. Dedicado a la pequeña Nash que sintió naufragar más de una vez para darse cuenta de que cualquier luz no es faro. Y dedicado a todas las personas que se han sentido perdidas en el camino, no importa el tiempo que te lleve, jamás te rindas, al final todo vuelve a estar bien con Dios de tu lado.

-Nashly Yange

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento al Dr. Mayken Espinoza quien despertó mi interés por la investigación y las energías renovables.

Agradezco a mis compañeros de trabajo, los ingenieros Jordy Santana y Brayan Ordoñez, por su contribución a mis habilidades científicas y comunicativas.

-Natalia Velastegui

A Dios porque nunca inspira deseos irrealizables, y darme la fuerza, disciplina, resiliencia y sabiduría de llevarlos a cabo.

Agradezco a mis amigos que fueron inspiración en el camino para seguir luchando, a quienes fueron compañía y hogar en los días de cansancio y aliento, compañeros de tareas, insomnios, proyectos, celebraciones, y sobre todo por la amistad que encontré sin buscar en ustedes: Karla, Gabriela, Luis R., Manuel P., Anthony B.

-Nashly Yange

DECLARACIÓN EXPRESA

Nosotras Natalia Andrea Velastegui Marcos y Nashly Paulina Yange Camacho acordamos y reconocemos que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por nosotros durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que nos corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de nuestra innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de Investigación (OTRI) de la ESPOL comunique a los autores que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 16 de Octubre del 2024.



Natalia Andrea

Velastegui Marcos



Nashly Paulina Yange

Camacho

EVALUADORES

Francis Loayza Paredes Ph.D.

PROFESOR DE LA MATERIA

Mayken Espinoza Andaluz Ph.D.

PROFESOR TUTOR

RESUMEN

En el presente proyecto se realiza un rediseño de las cámaras de columna de agua oscilante (OWC) existentes, las cuales carecen de una geometría completamente optimizada para aprovechar al máximo la energía undimotriz. Se proponen 3 alternativas diseñadas en base a las mejores características geométricas encontradas en la literatura con el propósito de alcanzar condiciones óptimas de velocidad y presión, garantizando así una mejora eficiente en la captura de las olas. Las dimensiones de las cámaras cilíndrica, cilíndrica inclinada y rectangular se calcularon en base a literatura científica y casos llevados a la práctica, el diseño 3D se realizó en un software de diseño denominado SolidWorks y las simulaciones se ejecutaron en Flow Simulation. Como resultados se obtuvo un aumento significativo de la velocidad en la cámara de aire en relación con la velocidad del agua entrante, y eficiencias de captura de ola iguales a 58%, 61% y 29% para las cámaras cilíndrica, cilíndrica inclinada y rectangular, respectivamente. Se encontró que la mejor razón de velocidad entre la entrada y salida del agua corresponde a la cámara cilíndrica y se seleccionó la cámara cilíndrica inclinada como la mejor alternativa de solución gracias a un análisis exhaustivo de su viabilidad técnica, económica y medioambiental.

Palabras Clave: geometría, velocidad, presión, altura de columna, eficiencia de captura.

ABSTRACT

This study presents the redesign of an existing Oscillating Water Column (OWC) chamber to address the limitations associated with suboptimal geometry in wave energy harnessing. To enhance wave capture efficiency, three alternative chamber designs were developed based on the most effective geometrical configurations identified in the literature. The dimensions of the cylindrical, inclined cylindrical, and rectangular chambers and the turbine were determined through a comprehensive review of scientific literature and practical case studies. The three-dimensional models were created using SolidWorks, while performance simulations were conducted in Flow Simulation. The results indicate a substantial increase in air's chamber velocity relative to the incoming water velocity, with wave capture efficiencies of 58%, 61%, and 29% for the cylindrical, inclined cylindrical, and rectangular chambers, respectively. Among these, the cylindrical chamber exhibited the most favorable velocity ratio between inlet and outlet water. However, following a thorough evaluation of technical, economic, and environmental feasibility, the inclined cylindrical chamber was identified as the most optimal solution.

Keywords: *geometry, velocity, pressure, column height, capture efficiency.*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
<i>ABSTRACT</i>	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA	VI
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS.....	XIII
ÍNDICE DE PLANOS.....	XIV
CAPÍTULO 1.....	1
1. Introducción	1
1.1 Descripción del problema	4
1.2 Justificación del problema.....	5
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 Objetivo General.....	5
1.3.2 Objetivos Específicos	6
1.4 Marco teórico	6
CAPÍTULO 2.....	12
2. Metodología	12
CAPÍTULO 3.....	29
3. Resultados y Análisis.....	29
CAPÍTULO 4.....	50
4. Conclusiones y Recomendaciones.....	50
4.1 Conclusiones	50
4.2 Recomendaciones	51

BIBLIOGRAFÍA.....	52
APÉNDICES.....	56

ABREVIATURAS

CFD	Computational Fluid Dynamics
INEC	Instituto Nacional de Estadística y Censos
IPCO	Índice de Precios de la Construcción
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
OWC	Oscillating Water Column
PTO	Power Take Of
SI	Sistema internacional
USD	United State Dollar
WEC	Wave Energy Converter
WSI	Wave Structure Interaction

SIMBOLOGÍA

λ	Lambda
A	Amplitud de la ola
B	Ancho de la cámara
C	Velocidad de la onda
Cg	Velocidad de grupo
D	Altura de pared frontal sumergida
ds	Profundidad de calado
dt	Espesor de pared
dw	Ancho de pared
g	Gravedad
H	Altura de la ola
h	Profundidad de la ola
Ha	Altura de la cámara de aire
Ho	Longitud de apertura
K	Factor K de geometría
kg	Kilogramo
kW	Kilowatts
L	Longitud de onda
m	Metros
m ²	Metros cuadrados
m ³	Metros cúbicos
N	Velocidad de rotación de la turbina
Pa	Pascal
Rh	Radio del cubo del álabe
Rt	Radio de la punta de la turbina
s ²	Segundos cuadrados

T	Período de la ola incidente
t	Espesor máximo de álabes
TWh	Teravatio-hora
Z	Número de álabes
α	Ángulo de inclinación
β	Ángulo de inclinación
ε	Eficiencia
ρ	Densidad

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Partes principales en el diseño convencional de un dispositivo OWC.....	7
Figura 1.2 a) Vista lateral y b) Sección transversal de un dispositivo OWC	8
Figura 1.3 Parámetros de una ola	11
Figura 2.1 Curvas de Eficiencia vs T a) con diferentes anchos de la cámara, b) con diferentes espesores de pared, c) con diferentes profundidades de calado.....	13
Figura 2.2 Diseño de forma de la cámara cilíndrica	14
Figura 2.3 Diseño de forma de la cámara cilíndrica inclinada	15
Figura 2.4 Diseño de forma de la cámara rectangular	16
Figura 2.5 Generación del diseño 3D de la cámara cilíndrica	18
Figura 2.6 Menú de herramientas de SolidWorks.....	19
Figura 2.7 Inserción de “lids” para cerrar el volumen de control.....	19
Figura 2.8 Creación de nuevo proyecto de simulación	20
Figura 2.9 Configuración del sistema de unidades.....	20
Figura 2.10 Selección de condiciones para la simulación	21
Figura 2.11 Selección del fluido de trabajo.....	22
Figura 2.12 Configuración de las condiciones de la pared	22
Figura 2.13 Establecimiento de los parámetros de simulación.....	23
Figura 2.14 Dimensionamiento del dominio computacional	23
Figura 2.15 Configuración de condiciones de frontera	24
Figura 2.16 Definición de la velocidad de entrada.....	24
Figura 2.17 Definición de la condición de presión en la interfase agua-aire.....	25
Figura 2.18 Mallado de la cámara cilíndrica	25
Figura 2.19 Mallado de la cámara cilíndrica inclinada	26
Figura 2.20 Mallado de la cámara rectangular	26
Figura 2.21 Panel de herramientas donde se encuentra la opción para ejecutar la simulación.....	27
Figura 2.22 Verificación de selecciones para la ejecución de la simulación.....	27
Figura 3.1 Vista lateral de la cámara modelada en AutoCAD y generada como sólido tridimensional en SolidWorks. Está diseñada con una inclinación de 55°, posee una corta sección cónica en la parte superior donde se reduce la inclinación a 80°	32

Figura 3.2. Vista isométrica de la cámara generada como sólido tridimensional en SolidWorks. La superficie está recubierta con hormigón reforzado para soportar las variaciones climáticas.....	32
Figura 3.3 Mapa dinámico que indica la altura de la ola en el perfil costero ecuatoriano. El color azul denota a las olas con menor altura y el color verde a las olas con mayor altura.	34
Figura 3.4 Curva del Factor K (eje izquierdo) y la longitud de onda en función del periodo T (eje derecho) para la cámara cilíndrica inclinada. T fue evaluado desde 4s a 30s y como resultado se obtuvo un comportamiento exponencial para K y polinomial para lambda.....	35
Figura 3.5 Diseño de la turbina Wells con 6 álabes que sigue la clasificación NACA0015. La forma de la sección transversal de cada álabe permite que trabaje de manera bidireccional	35
Figura 3.6 Diseño tridimensional de la turbina Wells que en la parte inferior tiene una válvula mariposa, seguida de un redireccionador, a continuación, se visualiza la turbina con sus álabes y nuevamente un redireccionador, en la parte superior tiene instalado el generador	36
Figura 3.7 Análisis computacional del comportamiento del agua en el interior de la cámara cuando la altura de la columna de agua llega a alcanzar 20 m	37
Figura 3.8 Análisis computacional del comportamiento del agua en el interior de la cámara cuando la altura de la columna de agua llega a alcanzar 20 m. En la parte derecha se observa una escala de colores que indica la magnitud de la presión en Pa de los vectores que recorren la cámara	37
Figura 3.9 Análisis computacional del comportamiento del aire en el interior de la cámara cuando la columna de agua llega a 20 m	38
Figura 3.10 Análisis computacional del comportamiento del aire en el interior de la cámara cuando la altura de la columna de agua llega a alcanzar 20 m. En la parte superior izquierda se observa una escala de colores que indica la magnitud de la presión en Pa de los vectores que recorren la cámara.	38
Figura 3.11 Análisis computacional del comportamiento del agua en el interior de la cámara cuando la altura de la columna de agua llega a alcanzar 27 m.	39

Figura 3.12 Análisis computacional del comportamiento del agua en el interior de la cámara cuando la altura de la columna de agua llega a alcanzar 27 m. En la parte derecha se observa una escala de colores que indica la magnitud de la presión en Pa de los vectores que recorren la cámara.	39
Figura 3.13 Análisis computacional del comportamiento del aire en el interior de la cámara cuando la columna de agua llega a 27 m.	40
Figura 3.14 Análisis computacional del comportamiento del aire en el interior de la cámara cuando la altura de la columna de agua llega a alcanzar 27 m. En la parte inferior derecha se observa una escala de colores que indica la magnitud de la presión en Pa de los vectores que recorren la cámara.	40
Figura B.1 Vista lateral de la cámara cilíndrica modelada en AutoCAD y generada como sólido tridimensional en SolidWorks; consiste en dos secciones: la sección cónica conduce el fluido de las olas en el ingreso y la sección circular conecta la cámara de aire con la sección de la turbina a través de un ducto.....	59
Figura B.2 Vista isométrica de la cámara cilíndrica modelada en AutoCAD generada como sólido tridimensional en SolidWorks. La superficie está recubierta con hormigón reforzado para soportar las variaciones climáticas.....	59
Figura B.3 Vista lateral de la cámara rectangular modelada en AutoCAD, generada como un sólido tridimensional en SolidWorks. La geometría tiene una reducción de sección transversal a lo largo de la cámara.....	60
Figura B.4 Vista isométrica de la cámara rectangular. Tiene una estructura de hormigón que protege la cámara de 45° de inclinación, en la sección del ducto superior se ajusta la inclinación a 55° y se conecta con la turbina Wells	60
Figura D.1 Curva del Factor K (eje izquierdo) y la longitud de onda en función del periodo T (eje derecho) para la cámara cilíndrica. T fue evaluado desde 4s a 30 s y como resultado se obtuvo un comportamiento exponencial para K y polinomial para lambda	62
Figura D.2 Curva del Factor K (eje izquierdo) y la longitud de onda en función del periodo T (eje derecho) para la cámara rectangular. T fue evaluado desde 4s a 30s y como resultado se obtuvo un comportamiento exponencial para K y polinomial para lambda.....	62

Figura E.1 Análisis computacional del comportamiento del agua en el interior de la cámara cuando la altura de la columna de agua llega a alcanzar 10 m	63
Figura E.2 Análisis computacional del comportamiento del agua en el interior de la cámara cuando la altura de la columna de agua llega a alcanzar 10 m	64
Figura E.3 Análisis computacional del comportamiento del aire en el interior de la cámara cuando la columna de agua llega a 10 m	64
Figura E.4 Análisis computacional del comportamiento del aire en el interior de la cámara cuando la altura de la columna de agua llega a alcanzar 10 m	65
Figura E.5 Análisis computacional del comportamiento del agua en el interior de la cámara cuando la altura de la columna de agua llega a alcanzar 17 m	65
Figura E.6 Análisis computacional del comportamiento del agua en el interior de la cámara cuando la altura de la columna de agua llega a alcanzar 17 m	66
Figura E.7 Análisis computacional del comportamiento del aire en el interior de la cámara cuando la columna de agua llega a 17 m	67
Figura E.8 Análisis computacional del comportamiento del aire en el interior de la cámara cuando la altura de la columna de agua llega a alcanzar 17 m	67
Figura E.9 Análisis computacional del comportamiento del agua en el interior de la cámara cuando la altura de la columna de agua llega a alcanzar 9 m	68
Figura E.10 Análisis computacional del comportamiento del agua en el interior de la cámara cuando la altura de la columna de agua llega a alcanzar 9 m	69
Figura E.11 Análisis computacional del comportamiento del aire en el interior de la cámara cuando la columna de agua llega a 9 m	69
Figura E.12 Análisis computacional del comportamiento del aire en el interior de la cámara cuando la columna de agua llega a 9 m	70
Figura E.13 Análisis computacional del comportamiento del agua en el interior de la cámara cuando la altura de la columna de agua llega a alcanzar 14 m	71
Figura E.14 Análisis computacional del comportamiento del agua en el interior de la cámara cuando la altura de la columna de agua llega a alcanzar 14 m	71
Figura E.15 Análisis computacional del comportamiento del aire en el interior de la cámara cuando la columna de agua llega a 14 m	72
Figura E.16 Análisis computacional del comportamiento del aire en el interior de la cámara cuando la columna de agua llega a 14 m	72

Figura F.1 Honorarios por servicios profesionales78

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Parámetros recomendados para el diseño de las cámaras OWC [19]	12
Tabla 2.2 Parámetros de Turbina tipo NACA0015 [21]	17
Tabla 3.1 Se divide en 2 secciones: agua y aire, el sombreado de color verde corresponde a los resultados de las alturas mínimas y el sombreado naranja corresponde a los resultados de las alturas máximas evaluadas en cada modelo de cámara.....	41
Tabla 3.2 Matriz de decisión con todos los parámetros ponderados según el análisis de cada alternativa	49
Tabla F.1 Costo del material para la construcción de cada cámara	75
Tabla F.2 Estimación de costos para las cubiertas de la sección de la turbina	76
Tabla F.3 Costo total de la sección de la turbina.....	77
Tabla F.4 Costos de los materiales y las piezas que conforman cada alternativa.....	77
Tabla F.5 Costos de los honorarios profesionales.....	78
Tabla F.6 Listado de precios de materiales, partes y servicios de cada alternativa	79
Tabla G.1 Resultados del análisis del ciclo de vida y cálculo de la demanda acumulativa de energía en el Pelamis Converter Device. Obtenida de Thomson R.....	80

ÍNDICE DE PLANOS

- PLANO 1 Cámara cilíndrica
- PLANO 2 Cámara cilíndrica inclinada
- PLANO 3 Cámara rectangular
- PLANO 4 Turbina
- PLANO 5 Redireccionador superior
- PLANO 6 Redireccionador inferior
- PLANO 7 Turbina explosionada

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

Los combustibles fósiles siguen representando el principal recurso energético para suplir la demanda energética mundial, que se prevé aumente un 1% anual hasta el 2040 según un estudio del año 2019 sobre el futuro de la energía y sus emisiones [1], a pesar del gran impacto negativo que genera en el medio ambiente y, por consiguiente, en la salud de las personas. Para solucionar esta problemática, los investigadores han propuesto usar energía de fuentes renovables como el sol, el viento, el mar, entre otros. El océano es un candidato potencial gracias a la energía proveniente de las corrientes marinas, la energía osmótica, la energía térmica oceánica, la energía proveniente de las mareas y la que se origina a partir de las olas (undimotriz) [2], [3], [4]. Esta energía puede utilizarse para boyas marinas, faros e, incluso, para producir energía eléctrica a gran escala en una determinada región [5], [6]. La energía undimotriz ha llamado una especial atención a los profesionales debido a sus ventajosas características frente a la energía solar y eólica: (i) La energía undimotriz se caracteriza por su alta densidad energética, que puede llegar a ser 10 veces mayor que las energías mencionadas anteriormente. (ii) La energía undimotriz tiene una disponibilidad mayor al 90%, mientras que las energías solar y eólica se manejan entre el 20% y 30% [2]. (iii) La implementación de un dispositivo de energía undimotriz tiene un impacto mínimo en el medio ambiente [7], [8]. (iv) La energía undimotriz puede complementarse con otras energías renovables para estabilizar la potencia y reducir la variabilidad [9], [10], [11]. Por otro lado, según la Organización para la Excelencia de la Salud y la Agencia Internacional de Energías Renovables, la potencia estimada global que se puede extraer de la energía undimotriz es 29,500 TWh/año [12], [13], lo que excede a la demanda global en el 2018 que fue aproximadamente 22,315 TWh, de los cuales, 2/3 provinieron de combustibles fósiles [14].

Drew et al. [15] clasificó los convertidores de energía undimotriz en 3 tipos según el despliegue de los dispositivos: atenuador, terminador y absorbedor puntual; y en 4 tipos según los modos de funcionamiento: columna de agua oscilante, sumergido de presión diferencial, sistema de rebosamiento y de incremento súbito de agua oscilante. Este proyecto se enfoca en el estudio del sistema de columna de agua oscilante (Oscillating

Water Column, OWC por sus siglas en inglés) que consiste en una estructura fija cuyas principales partes son una cámara de captura abierta al océano y una turbina Wells. Un sistema de generación tipo OWC funciona gracias al impulso de las olas haciendo que la columna de agua oscile y cause el efecto de una cámara neumática que impulsa y hace rotar la turbina bidireccional fijada en la parte superior, por efectos de la diferencia de presiones [16], [17].

La eficiencia de la conversión de la energía undimotriz va a determinar la cantidad y calidad de la energía producida. Para maximizar el desempeño se necesita realizar variaciones en las características de la turbina, también se requiere rediseñar la geometría de la cámara para obtener condiciones cercanas a la resonancia con las olas incidentes y evitar pérdidas energéticas [16]. Un factor importante en la geometría es la forma del ducto por el que ingresa el agua, el cual debe ser optimizado considerando el oleaje del lugar de instalación para mejorar el comportamiento del flujo de aire que incide en la rotación de la turbina [18]. Sadam et al. [19] diseñaron una cámara con forma circular que resultó en un flujo de aire uniforme, por otro lado, Liu et al. [20] diseñaron una cámara de forma rectangular que arrojó resultados desfavorables debido a otras partes de la estructura y a la forma propuesta. Otra consideración, es la pendiente de la abertura de la cámara de aire, su importancia radica en que puede reducir la reflexión de las olas y aumentar la velocidad de giro de la turbina; estudios previos realizados por Ram et al. [21] han comprobado que cambiar el ángulo de la cámara de captura de 90° a 55° produce una reducción de la presión dinámica en la cámara de aire en un 200%. El diámetro del ducto es otro criterio para mejorar la eficiencia del dispositivo OWC. Patel et al. [22] indicaron que la tobera del conducto de aire tiene la función de acelerar la velocidad del flujo y direccionarlo para que tenga un máximo impacto en las aspas de la turbina, por lo tanto, mientras menor sea el diámetro del conducto, mayor será la velocidad del flujo del aire y mejor será el desempeño del dispositivo.

En la literatura se puede encontrar una variedad de estudios que experimentan con partes específicas de la estructura OWC, por ejemplo, Rozali et al. [23] estudiaron el impacto de la forma del ducto de aire en el desempeño del dispositivo OWC y

compararon los resultados con un ducto rectangular, proponiendo 2 formas: conductos ovalados y circulares, como resultados obtuvieron que la distribución de presión no es simétrica en ninguno de los 3 casos, sin embargo, los ductos propuestos presentaron menores caídas de presión que el ducto rectangular. Además, en base a las mediciones de energía mecánica, el diseño ovalado presentó el mejor desempeño, seguido por el circular y el rectangular. Concluyeron que el diseño ovalado logró incrementar la rotación de la turbina y aprovechó de mejor manera la energía undimotriz, alcanzando la mejor eficiencia del dispositivo OWC. Por otro lado, Ding et al. [24] realizaron algunas modificaciones en la estructura de un dispositivo OWC, tales como, el ancho de la cámara de aire, el espesor de la pared frontal y el calado de la pared frontal. El modelo optimizado que plantearon reflejó un incremento en la amplitud relativa y menor disipación energética, logrando una mejor eficiencia a comparación con el modelo tradicional (rectangular) y garantizando una mejor absorción de la energía de las olas. Un trabajo similar realizó Sadam y su grupo de estudio en base a los resultados de otras investigaciones, ellos diseñaron una cámara de aire de forma cilíndrica con una sección cónica superior y un ángulo de inclinación optimizado; sus conclusiones fueron que el diseño propuesto reduciría las pérdidas de energía en las esquinas y bordes afilados, mejoraría el movimiento oscilatorio de la columna de agua y, por consiguiente, incrementaría la eficiencia del dispositivo OWC [17].

A pesar de los estudios realizados, no se ha logrado optimizar la geometría a tal punto que esta tecnología tenga un precio comercializable y competitivo. Aún falta experimentar con las distintas configuraciones que puede tener una cámara de captura y encontrar nuevas modificaciones que influyan significativamente en el desempeño del dispositivo para que los resultados justifiquen el elevado precio de inversión que demanda esta tecnología.

El proyecto tiene como objetivo optimizar el diseño de la cámara de un dispositivo OWC mediante simulación computacional de su geometría para favorecer la cantidad de flujo que ingresa a la cámara maximizando la compresión del aire y la eficiencia energética. Para este fin, se evaluará la forma y disposición de la cámara neumática para encontrar la configuración que represente la mejor distribución de velocidad y

presión para la turbina Wells, luego se analizará el comportamiento de las olas en el conjunto cámara-turbina Wells mediante simulación usando software de dinámica de fluidos para validar las configuraciones propuestas y, por último, se seleccionará el mecanismo con mejor desempeño, tanto en el aspecto potencial, como en los ámbitos económico y medioambiental.

1.1 Descripción del problema

Dentro de los convertidores de energía undimotriz existentes, se destaca la columna de agua oscilante (OWC) debido a su gran resiliencia para adaptarse a diferentes geometrías y condiciones geográficas. Sin embargo, la eficiencia de este dispositivo depende en gran medida del diseño de la cámara de captura que, hasta ahora, sus diseños convencionales se focalizan en geometrías rectangulares que provocan pérdidas de energía en la medida que se transmiten las olas a lo largo del ducto, en tanto que no se ha logrado optimizar al punto de que esta tecnología llegue al mercado como una alternativa comercializable y competitiva frente a otras energías renovables. Pese a los estudios mencionados, aún existe vacíos y debates respecto a cuáles son las mejores características geométricas que debe tener la cámara para reducir las pérdidas energéticas al mínimo y lograr el máximo desempeño del dispositivo. El proyecto, además de optimizar el diseño de la cámara para maximizar la eficiencia de un dispositivo OWC, busca contribuir al desarrollo de las energías renovables para evitar el consumo de combustibles fósiles que tantas consecuencias negativas provocan en el medio ambiente.

1.2 Justificación del problema

Con el agua de mar, que representa el 70% de la superficie del planeta, se puede innovar en sistemas de captación de energía mediante características físicas, de modo que su potencial se evidencia significativamente mayor con una densidad energética de 2 a 3 kW/m² frente a otras energías renovables como la eólica con una densidad de 0.1 a 0.2 kW/m² y la solar con 0.4 y 0.6 kW/m² [2].

El Ecuador enfrenta una crisis energética que debe atenderse con urgencia para reducir la dependencia de sus centrales térmicas e hidroeléctricas, e incluir los recursos renovables como fuente de energía primaria, aprovechando el potencial en sus 640 km de perfil costero [25] de manera que la matriz energética del país se expanda con una visión ambiental y sostenible, por ello se propone como vía alternativa al sistema OWC para responder a las necesidades actuales del país.

El diseño convencional del sistema OWC no es óptimo físicamente y tampoco cumple con las expectativas de eficiencia ni de confiabilidad operativa, debido a los altos costos de instalación, pruebas, mantenimiento y operación; con todo esto se propone hacer un rediseño que optimice el sistema y cubra las condiciones ambientales de la costa ecuatoriana de manera que esta sea una solución energética eficiente, de alto impacto ambiental, económico y operacional.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

Optimizar el diseño de la cámara de un dispositivo OWC mediante simulación computacional de su geometría para favorecer la cantidad de flujo que ingresa a la cámara maximizando la compresión del aire y la eficiencia energética.

1.3.2 Objetivos Específicos

1. Evaluar la forma y disposición de la cámara neumática con la finalidad de observar la configuración que represente la mejor distribución de velocidad y presión para la turbina Wells.
2. Simular el comportamiento del agua y del aire en el interior de la cámara para analizar la velocidad y presión a lo largo de la geometría mediante software de dinámica de fluidos.
3. Seleccionar el mecanismo más eficiente y analizar la viabilidad técnica, económica y medioambiental de su implementación.

1.4 Marco teórico

Energía undimotriz

Es un tipo de energía considerada como energía limpia ya que su fuente es renovable, como indica Nader [26] toma la fuerza de las olas del mar considerando su amplitud y periodo de oscilación, a través de diferentes dispositivos; esta captación y conversión de energía lo explica Drew et al. [15] mencionando 4 tipos de convertidores según los modos de funcionamiento se tienen: sistema columna de agua oscilante, sumergido de presión diferencial, sistema de rebosamiento y de incremento súbito de agua oscilante.

Dispositivo OWC

Es uno de los dispositivos convertidores de energía cuyo mecanismo de funcionamiento es la columna de agua oscilante, esta estructura fijada al fondo marino forma una cámara de aire con una entrada para el agua de mar, en el que las olas causan la oscilación del agua dentro de la cámara comprimiendo y descomprimiendo el aire como una cámara neumática para hacer rotar la turbina bidireccional fijada en la parte superior, por efectos de la diferencia de presiones [16], [18].

El funcionamiento de un dispositivo OWC se divide en 3 etapas: La primera etapa es la conversión de la potencia de las olas en potencia mecánica gracias a la interacción entre el océano y la estructura (WSI por sus siglas en inglés), en este proceso la optimización geométrica de la cámara es clave para mejorar el desempeño hidrodinámico de la WSI. Luego, en la segunda etapa se transforma la potencia

mecánica en potencia eléctrica [15], en la última etapa, se mejora la calidad de la energía mediante electrónica de potencia. De esta manera, se transfiere la energía de corriente alterna a corriente continua o es usada para integrarla a la red [2], [27].

El rendimiento de una OWC según las investigaciones de Sadam et al [19], depende de la cantidad de energía producida considerando la eficiencia de extracción de energía de las olas, la cual se ha comprobado que con las pérdidas de aire en la cámara y en el conducto reducen el flujo de aire y por ende la potencia neumática para activar la turbina.

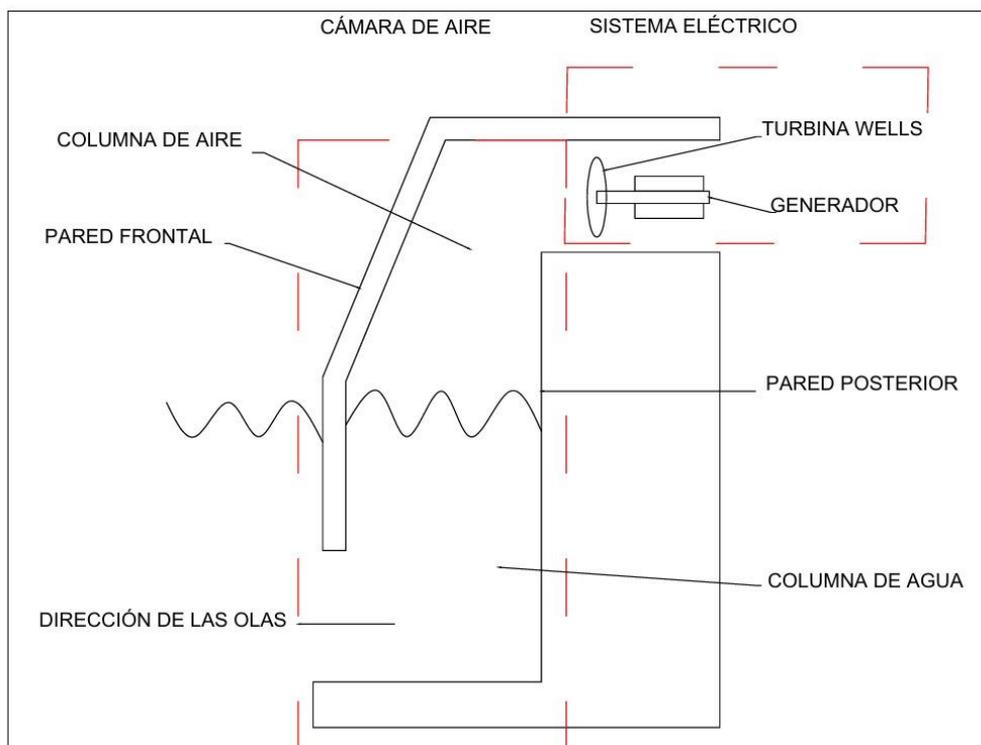


Figura 1.1 Partes principales en el diseño convencional de un dispositivo OWC

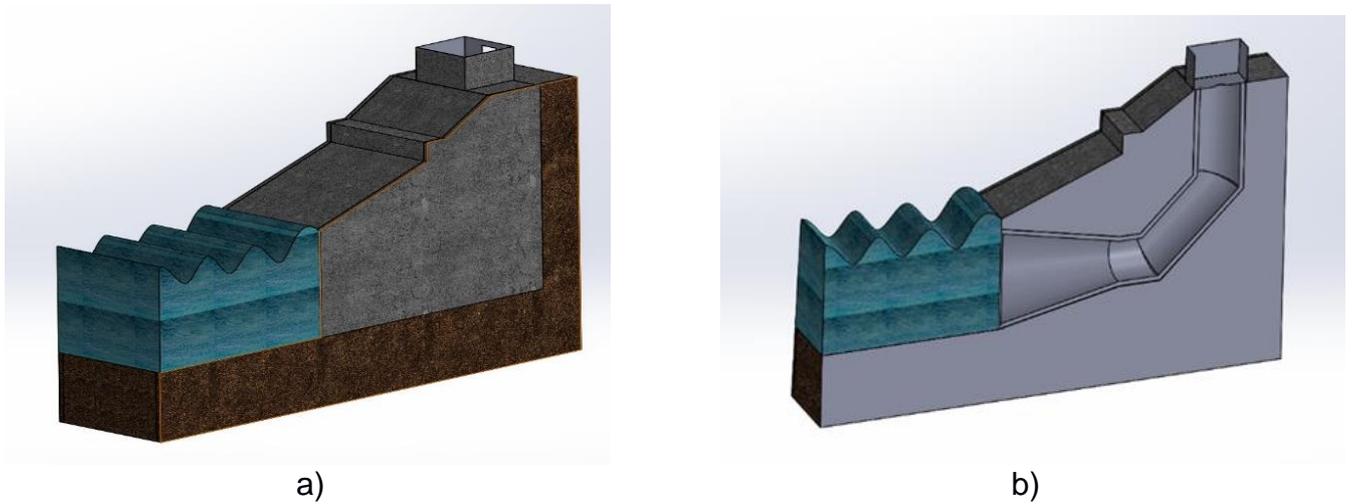


Figura 1.2 a) Vista lateral y b) Sección transversal de un dispositivo OWC

Cámara neumática

La geometría de la cámara también ha sido estudiada por autores como López et al. [16] que destacan la influencia de nuevas geometrías que reduzcan la pérdida de energía aprovechando al máximo la resonancia del sistema con las olas incidentes a través de un modelo matemático basado en las ecuaciones de Navier-Stokes para fluidos incompresibles, y que facilitan el análisis computacional de fluidos:

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \nabla \cdot (v \times v) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 v + g \quad (1.2)$$

Donde:

ρ : densidad de agua, v : velocidad de las partículas, p : presión, ν : viscosidad dinámica y g : gravedad.

Se propuso el sistema OWC de fondo escalonado frontal para maximizar la acción del pistón formado por el volumen de agua que sobrepasa dicho escalón volviéndose dependiente de la relación captura-ancho para un mayor rango de periodos de oscilación, es decir, a medida que acercan esta relación a su máximo valor se vuelve a limitar por la altura de la columna de agua. Este sistema fue sometido a comparaciones con otras 3 formas de OWC entre ellas: una pared frontal adjunta a la original que maximiza la frecuencia de oscilación de la columna de agua identificada en forma de U apuntando hacia una cámara más ancha; una geometría en L con un canal direccionado hacia el ingreso de la ola también favorece en el incremento de la resonancia del sistema haciéndola más óptima que puede adecuarse a las otras configuraciones rígidas porque sus rangos de periodos, amplitudes y de oscilación son más amplios; y finalmente con un sistema clásico el cual fue sometido a modificaciones en la inclinación de la pared estructural, la longitud y el ángulo de apertura han logrado representar rendimientos mayores a las estructuras originales; tomando en cuenta que dichos cambios en busca de la optimización de la cámara neumática fueron planteados en el mismo sitio bajo las mismas condiciones físicas, ambientales y climáticas dado la influencia de estas características externas pero particulares para cada sitio. Sin embargo, para llegar a estos niveles óptimos la entrada de agua del OWC debe ser desplazado hacia el fondo del mar, lo cual provoca mayores dificultades para su instalación, y mantenimiento dada la estructura rígida del sistema OWC clásico. Destacando a la geometría en L como la mejor en cuanto a optimización de la operación por amplitud de la ola.

En otro de los estudios, Nader [26] detalla que la optimización de la geometría del sistema OWC se da a través de la modificación de los ángulos de las placas de la estructura de la cámara, de modo que con ángulos menores a 90° de manera descendente tiene una relación inversa con la salida del aire de la cámara, además se obtuvieron resultados favorables cuando las placas delanteras y traseras permanecen paralelas.

En cuanto a la eficiencia de la cámara OWC como la define Sadam [19] es el resultado de multiplicar las potencias eléctricas obtenidas luego de la conversión de energía

desde la energía neumática provocada por las olas y el aire, la energía mecánica a partir de la compresión del aire para activar la turbina, y la energía eléctrica del generador eléctrico.

Definida como:

$$\eta = \eta_{captura} * \eta_{turbina} * \eta_{generador} \quad (1.3)$$

Eficiencia de captura en la cámara neumática es la potencia neumática disponible dentro de la cámara de aire con respecto a la potencia de las olas.

$$\eta = \frac{\text{Potencia neumática}}{\text{Potencia de las olas}} \quad (1.4)$$

La potencia neumática es la potencia de salida del sistema, que la define J. Parra [28] a través de la siguiente ecuación:

$$P_{neum} = \frac{1}{T_{final} - T_{inicial}} \int_{T_{inicial}}^{T_{final}} \Delta P \cdot S_{cámara} \cdot V_{sl} dt \quad (1.5)$$

Donde se identifica a los periodos de oscilación de las olas en $T_{inicial}$ y T_{final} como los periodos inicial y final, y la presión instantánea dentro de la cámara como ΔP que multiplica al flujo volumétrico dentro de la cámara a través del área del plano de agua ($S_{cámara}$) con la velocidad de la superficie libre de agua (V_{sl}).

La potencia de las olas, P en $\left[\frac{W}{m}\right]$, puede desarrollarse como:

$$P_{olas} = E * Cg = \frac{1}{2} \rho g \left(\frac{H}{2}\right)^2 * Cg \quad (1.6)$$

Donde:

ρ = es la densidad del agua de mar con un valor de $1025 \left[\frac{Kg}{m^3}\right]$

g = es la gravedad de $9.81 \left[\frac{m}{s^2}\right]$

H = es la altura de la ola en $[m]$

A= amplitud de la ola $\frac{H}{2}$, en [m] (1.5)

Cg= es la velocidad del grupo a cualquier profundidad finita de agua en $\left[\frac{m}{s}\right]$

C= es la velocidad de la onda en $\left[\frac{m}{s}\right]$

λ = es la longitud de onda en [m] ,

$$\lambda = \frac{g \cdot T^2}{2\pi} \tanh\left(\frac{2\pi}{\lambda} h_{agua}\right) \quad (1.7)$$

T= es el periodo de la ola incidente en [s]

h= es la profundidad de la ola [m]

Los parámetros de las olas se pueden apreciar en la figura 1.4

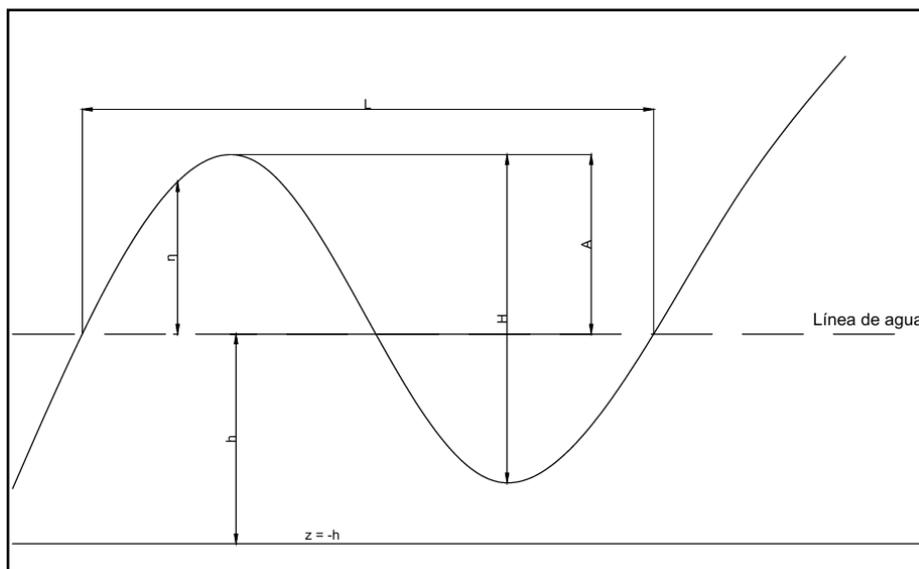


Figura 1.3 Parámetros de una ola

CAPÍTULO 2

2. METODOLOGÍA

En este capítulo se establece la metodología usada para lograr la optimización en el diseño de un dispositivo OWC para las costas ecuatorianas. Se desarrolló un estudio bibliográfico para proponer las siguientes alternativas de solución que se presentan siguiendo los diseños más destacados de la literatura estudiada. Posteriormente, se realizó modificaciones técnicas a las alternativas en cuanto a su geometría como: altura, ancho, tamaño del orificio de entrada y ángulos de inclinación. Estas alternativas se analizaron bajo criterios técnicos que permitieron establecer una matriz de decisión en términos de eficiencia, viabilidad técnica, costo, impacto ambiental y adaptabilidad.

Determinación de los parámetros de diseño

En base a los estudios analizados, se ha realizado la siguiente tabla que resume los parámetros recomendados, los mismos que se relacionan con las dimensiones de las olas, la ubicación y características del mar donde se ubique a la cámara OWC.

Tabla 2.1 Parámetros recomendados para el diseño de las cámaras OWC [19]

Parámetro	Variable	Recomendación
Ancho de la cámara	B	0.92h (h= altura del agua) 0.42 L (L= longitud de la ola)
Altura de la cámara de aire	Ha	3 B
Altura de pared frontal sumergida	D	0.35-0.45h
Longitud de apertura	Ho	0.65-0.8h
Ángulo de inclinación	α	45° - 55°

Se consideran además las siguientes curvas que relacionan algunas dimensiones de la cámara con el período y la eficiencia del dispositivo OWC.

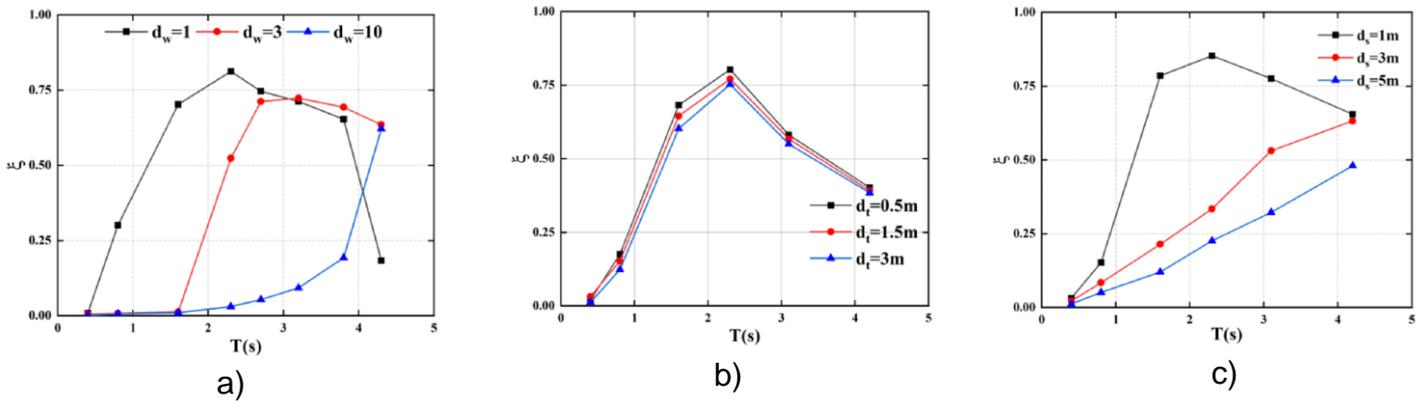


Figura 2.1 Curvas de Eficiencia vs T a) con diferentes anchos de la cámara, d_w , b) con diferentes espesores de pared, d_t , c) con diferentes profundidades de calado, d_s [24]

De estas relaciones se tomó como referencia la tendencia con mejores resultados para las 3 alternativas, siendo:

$d_w = 10-12$ metros de ancho y $d_t = 0.5-3$ metros de espesor de pared, $d_s = 3-5$ metros de calado.

En base a las recomendaciones de la Tabla 2.1 y la Figura 2.1, se bosquejaron los siguientes diseños de forma y se evaluó sus características.

Alternativa 1: Cámara cilíndrica

Desventajas:

- Limitaciones del flujo de aire en la sección constante.
- Altos costos de construcción y mantenimiento por el diseño de la geometría circular y cónica.

Alternativa 3: Cámara rectangular

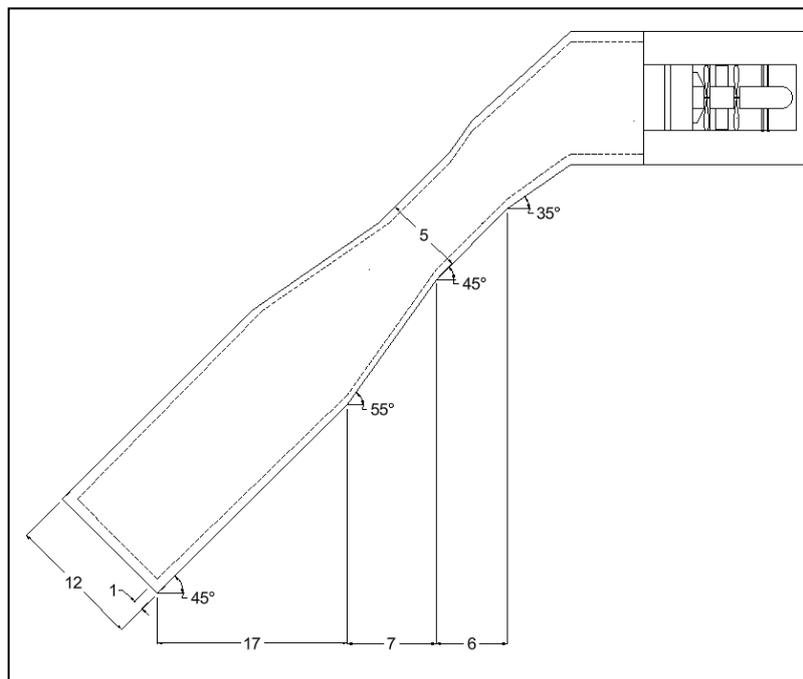


Figura 2.4 Diseño de forma de la cámara rectangular

Esta alternativa es un diseño adaptado de Ram et. al [21] consiste en una cámara de aire de sección rectangular con una reducción de dimensiones en la sección superior y un cambio de forma a cilíndrica en la parte donde se encuentra la turbina. La geometría propuesta pretende mejorar el flujo de aire y agua dentro de la cámara, ya que al disminuir las dimensiones de la sección transversal provoca el efecto Venturi en la transición de los fluidos aumentando la velocidad de salida de las olas hacia la mezcla con el aire en la cámara neumática lo que favorece a un eficiente movimiento de la turbina. Además, cuenta con un ángulo de inclinación de 45° haciendo que las olas disminuyan su reflexión, aumente el flujo en la cámara y la presión dinámica del fluido aumente en un 33% según lo estudiado por Ram, es decir, mayor energía cinética

disponible, lo que afecta directamente a la relación de presión de aire, medida con la cual se compara el rendimiento de los dispositivos OWC.

Ventajas:

- Geometría favorece el flujo de agua y aire mejorando la eficiencia.
- Optimización en la compresión de aire por la reducción en la sección transversal.
- Mejora de eficiencia por la inclinación de ángulo.

Desventajas:

- Aumento de turbulencias por cambio de sección rectangular a cilíndrica.
- Mayores costos de fabricación y diseño por la complejidad de la geometría.

Diseño de la turbina Wells

Se consideró una turbina bidireccional con álabes de características NACA0015 tomada de Amhed [21], la cual destaca por su rendimiento ante flujos de aire altos en cuanto a su coeficiente de torque, eficiencia y coeficiente de pérdida de presión de total, además este diseño aumenta el rango operacional en 33% gracias a que retrasa el inicio de bloqueo de flujo, y se reduce el área de los álabes que experimentan flujo inverso, provocando a su vez que se disminuya el efecto de chorro en la salida de la turbina y el efecto de flujo de fuga. Al reducir la velocidad axial con el ángulo de incidencia de los álabes se mejora la condición de unión del flujo a través de la turbina maximizando su eficiencia con un flujo continuo incluso con altos coeficientes de flujo. Los parámetros recomendados se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Parámetros de Turbina tipo NACA0015 [21]

Parámetro	Variable	NACA0015
Número de álabes	Z	6
Cuerda del álabe de la turbina	C	125 mm
Espesor máximo de álabe	t	15% de C
Radio del cubo del álabe	Rh	200 mm
Radio de la punta de la turbina	Rt	294 mm
Holgura en la punta de la turbina		0.8% de C
Solidez		0.644
Ángulo de inclinación	β	90°
Velocidad de rotación de la turbina	N	2000 rpm

Método cuantitativo/técnico

Para llegar a un análisis cuantitativo y técnico de cada alternativa se realizaron simulaciones de los fluidos que intervienen en el dispositivo para determinar presión estática y dinámica, caudal másico y volumétrico, temperatura, velocidad y con ello lograr obtener la eficiencia energética que cada una proporciona a través del software SolidWorks basados en los modelos matemáticos establecidos en el marco teórico para condiciones estándar y condiciones extremas, insertando además condiciones establecidas por las normativas de diseño y de seguridad. Con dichas simulaciones se evaluó el rendimiento, la eficiencia energética y la facilidad de adaptación de cada alternativa.

Proceso de simulación en SolidWorks

1. Realizar el diseño de forma de cada alternativa en AutoCAD.
2. Modelar en SolidWorks el diseño 3D de las cámaras bosquejadas en el primer paso, como se observa en la Figura 2.5 con la cámara cilíndrica.

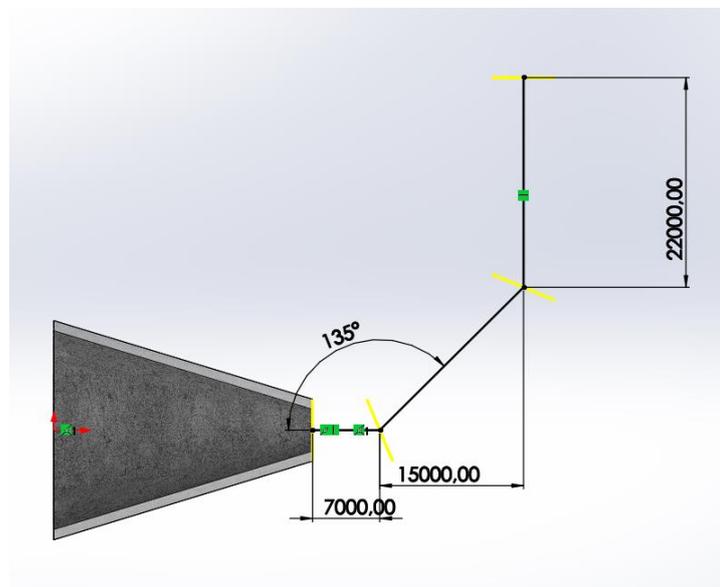


Figura 2.5 Generación del diseño 3D de la cámara cilíndrica

3. En el menú “Flow Simulation” en la herramienta “Tools”, seleccionar “Create Lids” (Figura 2.6), procede a seleccionar los orificios de ingreso y salida de la

cámara para que se inserten superficies que cubran dichos orificios proyectando que el volumen del OWC esté totalmente cerrado como se observa en la Figura 2.7.

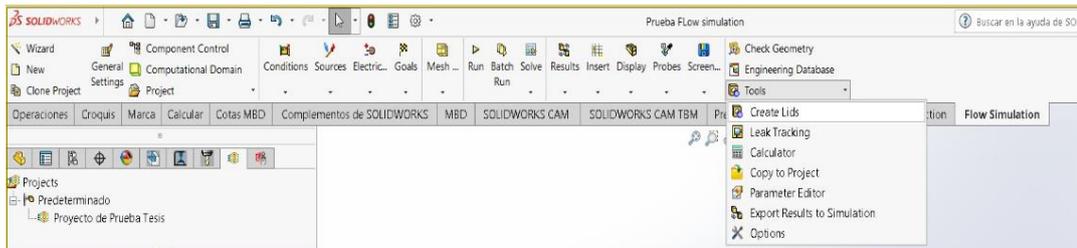


Figura 2.6 Menú de herramientas de SolidWorks

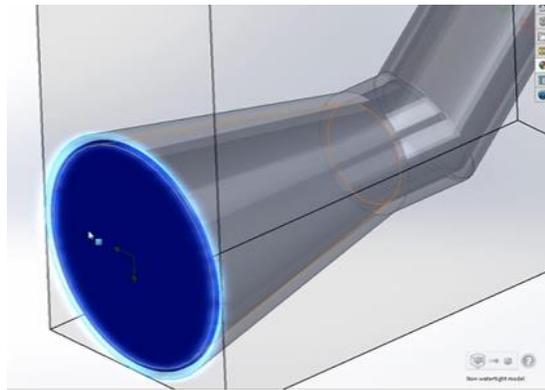


Figura 2.7 Inserción de “lids” para cerrar el volumen de control

4. Crear un nuevo proyecto de simulación (Figura 2.8) en el menú: “Flow Simulation”, usar la herramienta “Wizard” en donde se debe registrar el nombre del proyecto.

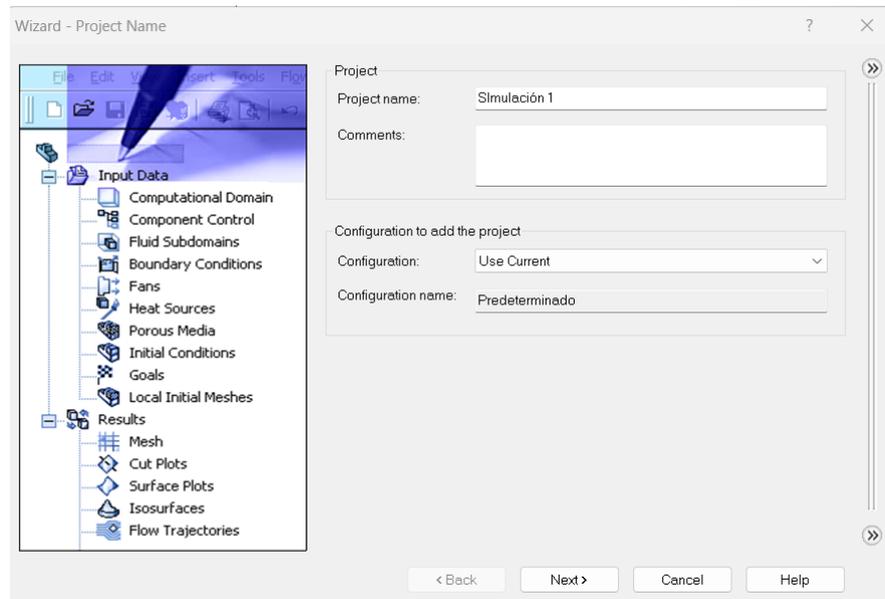


Figura 2.8 Creación de nuevo proyecto de simulación

5. Establecer las condiciones de trabajo. En la primera página (Figura 2.9) se debe seleccionar el sistema de unidades para el proyecto, en esta ocasión se eligió el sistema internacional, luego seleccionar “Next”.

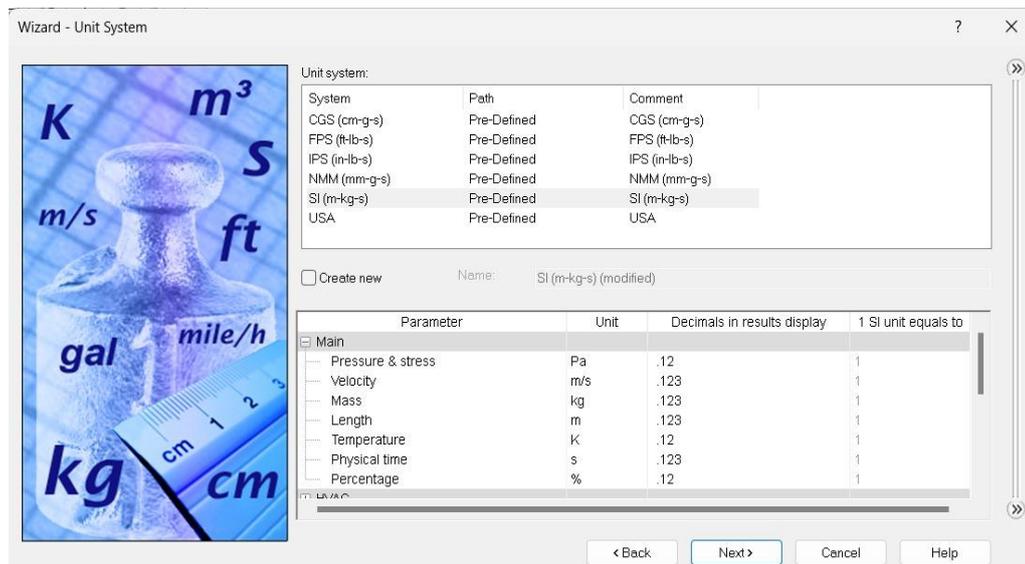


Figura 2.9 Configuración del sistema de unidades

6. En la siguiente página de “Analysis type” seleccionar las características físicas como: “Fluid flow”, y “Gravity” en el eje correspondiente con el valor de 9.81 m/s², como se aprecia en la Figura 2.10, y finalmente seleccionar el tipo de análisis, “Analysis type” se hará interno debido a que la cámara neumática considera la parte interna de la estructura del OWC, así como la selección de “Exclude cavities without conditions”, luego seleccionar el botón de “Next”.

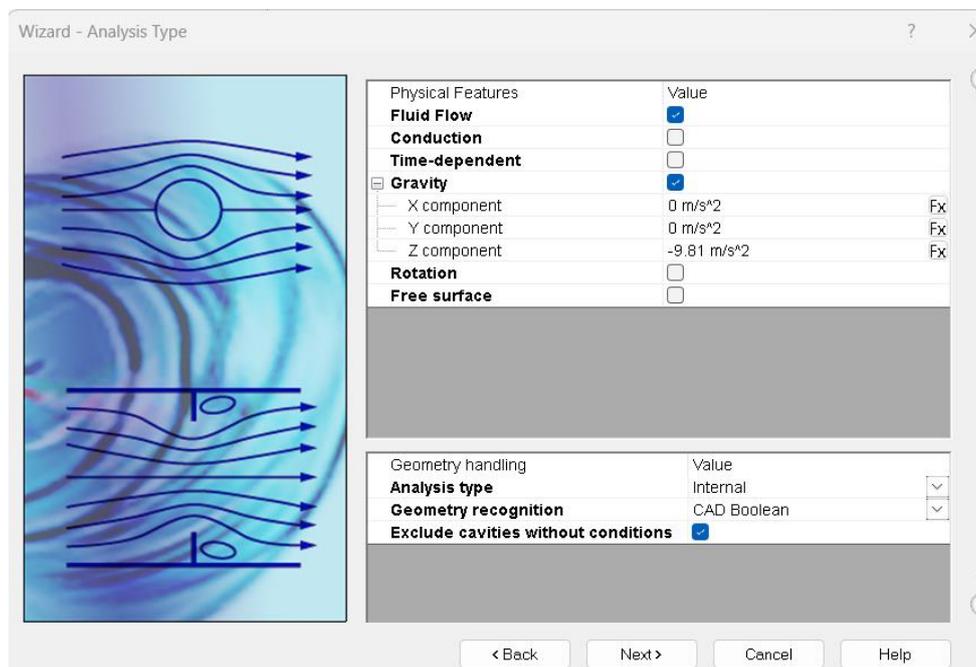


Figura 2.10 Selección de condiciones para la simulación

7. En la siguiente página de “Default fluid” se define los fluidos que se usan, en este caso en la sección de Líquidos se selecciona el agua “Water”, también se selecciona el tipo de fluido “Laminar and Turbulent” ya que existe una variación frecuente entre esos dos estados del fluido cuando se considera bajo el agua, luego dar clic en el botón “Next”. Para la primera etapa de la simulación se selecciona agua (Figura 2.11) y para la segunda etapa se escoge aire.

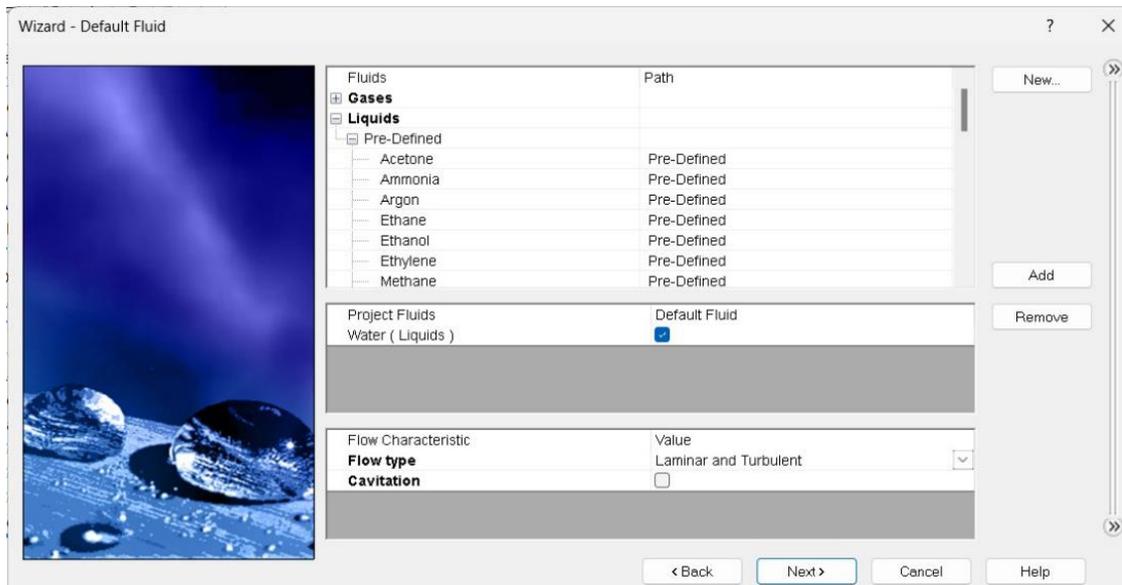


Figura 2.11 Selección del fluido de trabajo

8. En la siguiente sección “Wall conditions” (Figura 2.12) se definen los parámetros como pared adiabática, considerando que el intercambio de temperatura es despreciable en las condiciones térmicas del sistema en general, y como condición de 0 micrómetros en rugosidad, luego dar clic en “Next”.

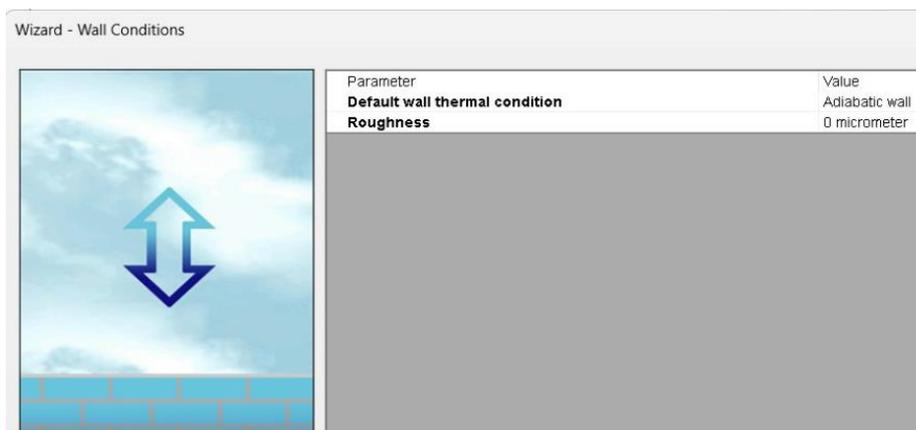


Figura 2.12 Configuración de las condiciones de la pared

9. En la sección de “Initial conditions” se configura la temperatura a 293.2 K y la presión a 101325 Pa; mientras que la velocidad se deja en 0 porque se modifica directamente en la abertura del sólido, la turbulencia se establece en 2% de

intensidad y 0.23 m de longitud como se observa en la Figura 2.23, luego dar clic en “Finish”.

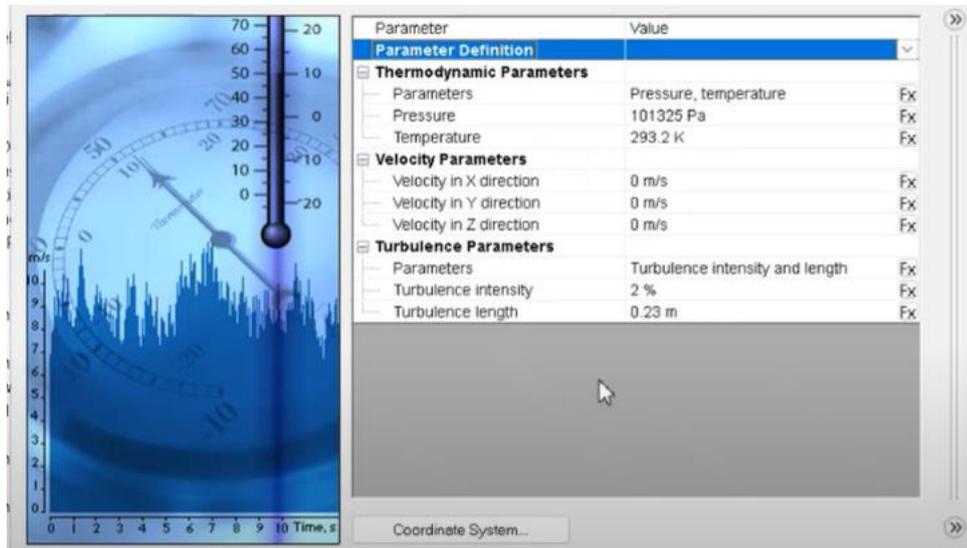


Figura 2.13 Establecimiento de los parámetros de simulación

10. Ubicar la cámara neumática dentro del dominio computacional, es decir, se deben extender o extruir todos los planos para tener un volumen de control que contenga las dimensiones de la cámara, tal como se aprecia en la Figura 2.14.

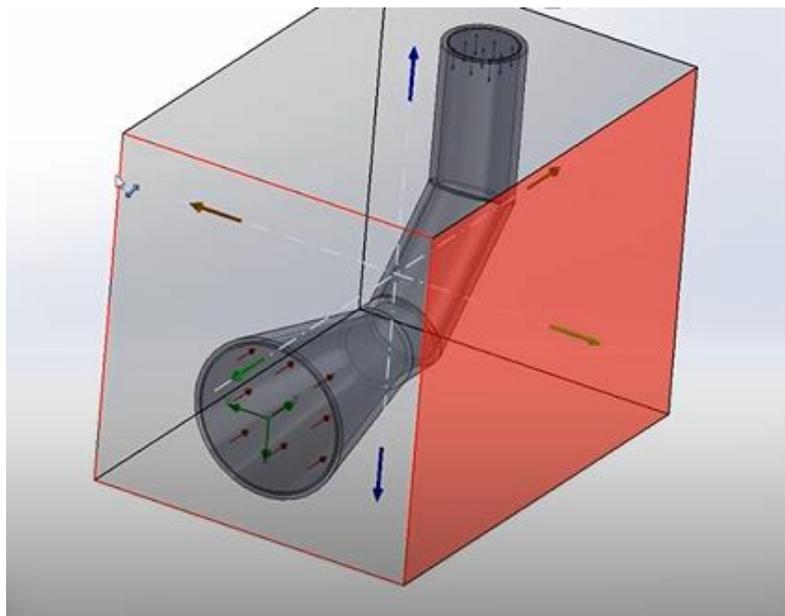


Figura 2.14 Dimensionamiento del dominio computacional

11. Establecer las condiciones de frontera del dispositivo en cada cara superficial de la cámara neumática, dando clic en “Boundary Conditions” (Figura 2.15) y luego en “Insert Boundary Conditions”. En la primera parte, que es la simulación con agua, se selecciona la velocidad de entrada del agua a la cámara (Figura 2.16), en este caso 1 m/s por las condiciones de oleaje en la costa ecuatoriana y se asume condición de presión total en la interfase agua-aire (Figura 2.17). En la segunda parte, que es la simulación con aire, se selecciona la velocidad del agua en la interfase como la velocidad de entrada al conducto de aire y se define la condición de presión atmosférica (101 KPa) en la salida de la cámara.

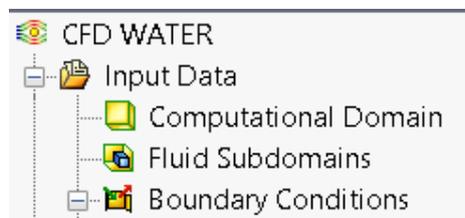


Figura 2.15 Configuración de condiciones de frontera

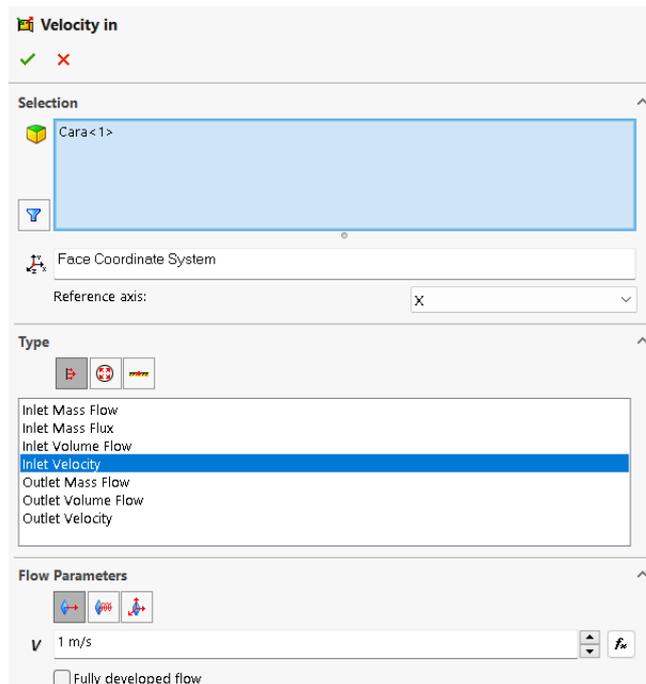


Figura 2.16 Definición de la velocidad de entrada

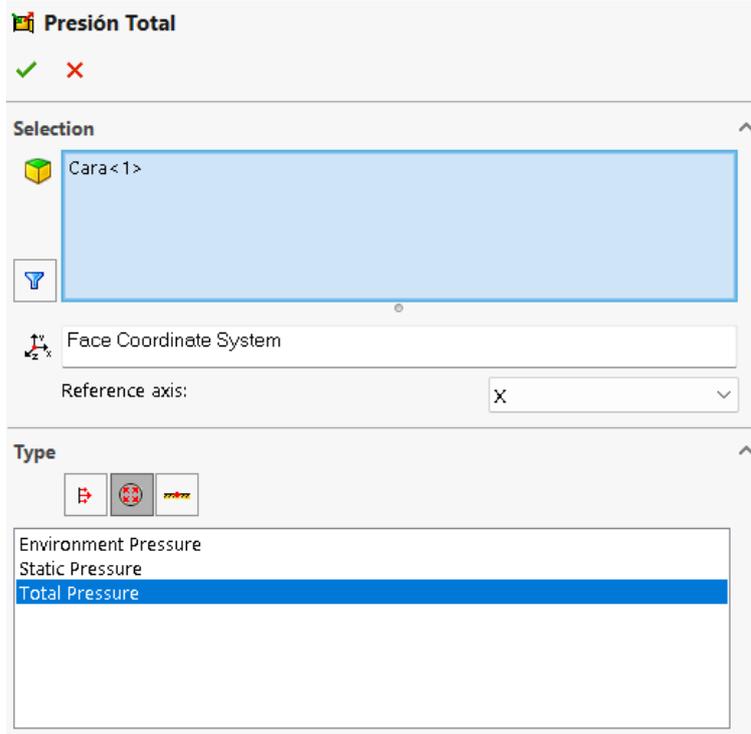


Figura 2.17 Definición de la condición de presión en la interfase agua-aire

12. Generar el mallado para cada cámara (Figuras 2.18, 2.19, 2.20) y configurar la precisión del mallado en la sección de "Mesh" ajustando el nivel de precisión de datos para el mallado, se establece en 6 puntos considerando una precisión aceptable para el análisis respectivo.

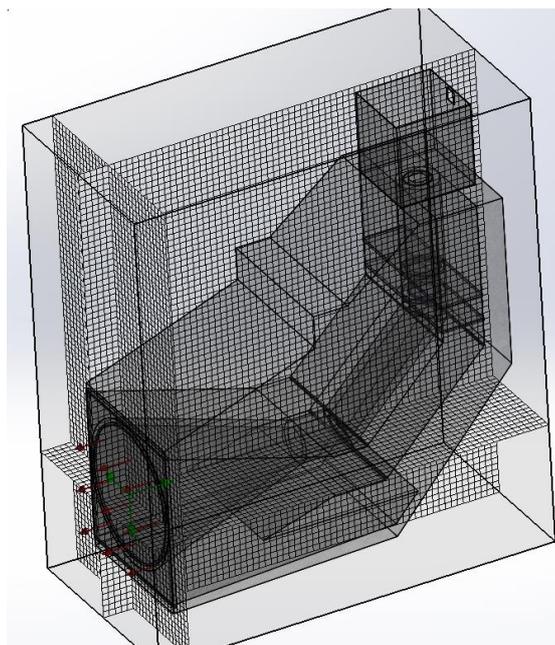


Figura 2.18 Mallado de la cámara cilíndrica

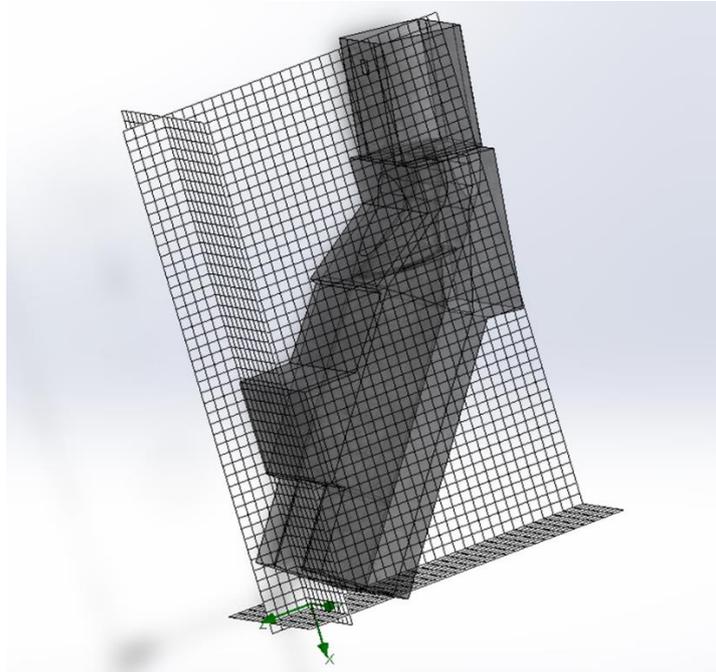


Figura 2.19 Mallado de la cámara cilíndrica inclinada

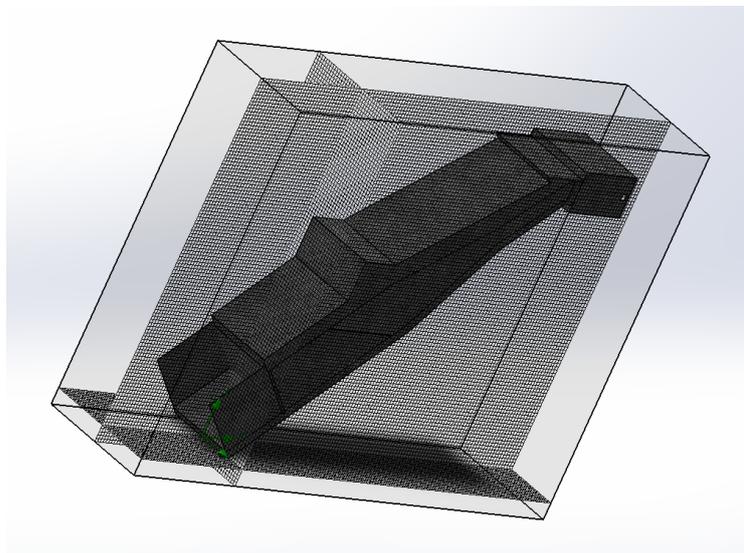


Figura 2.20 Mallado de la cámara rectangular

13. Dar clic en la pestaña "Run" para efectuar la simulación, como se observa en la Figura 2.21. Aparece una ventana de diálogo (Figura 2.22) en la que se verifica

que la opción “New calculation” esté seleccionada y luego dar clic en “Run” para ejecutar la simulación.



Figura 2.21 Panel de herramientas donde se encuentra la opción para ejecutar la simulación

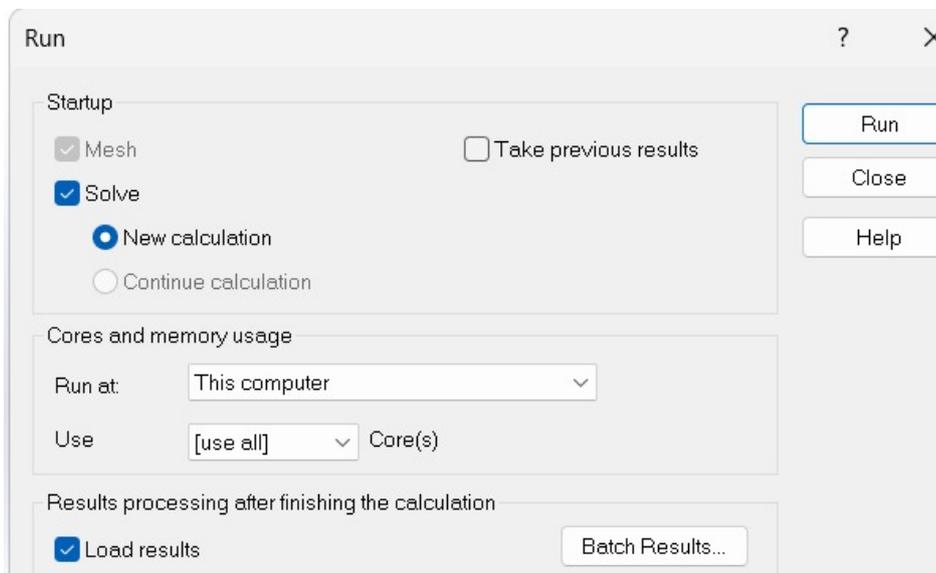


Figura 2.22 Verificación de selecciones para la ejecución de la simulación

Mecanismos de selección de la mejor alternativa

Los mecanismos de selección se enfocan en la determinación de la eficiencia energética a través de la efectividad de las alternativas de solución para comprimir el aire dentro de la cámara neumática y maximizar la generación de energía eléctrica. Para seleccionar la mejor alternativa se tomó en cuenta la distribución de presión en la cámara neumática y la capacidad de adaptación de cada cámara a las condiciones del oleaje. Así mismo, se consideró la viabilidad técnica de cada diseño en el entorno propuesto de tal manera que los materiales a usar sean lo indicados para tolerar las condiciones marinas en cuanto a durabilidad y resistencia; como también la facilidad de

fabricación e instalación del dispositivo y la compatibilidad del caudal, la capacidad de presión del diseño con la turbina Wells seleccionada. Otro de los criterios fue el costo que implica cada una de las alternativas en cuanto a fabricación, instalación, mantenimiento, y análisis del retorno de la inversión de cada propuesta en función de la energía esperada. Sin dejar de lado el aspecto ambiental, se consideró el estricto cumplimiento de las normativas y regulaciones ambientales nacionales e internacionales aplicadas para sistemas de energía marina, teniendo en cuenta que la afectación de cada dispositivo frente al entorno marino debía ser el mínimo impacto en cuanto a alteración de hábitats, como emisiones de ruido submarino y emisiones de dióxido de carbono al ecosistema; además de la selección de materiales sostenibles a lo largo de su vida útil de cada alternativa. Finalmente se considera la flexibilidad del diseño ante la innovación y mejora continua, examinando la versatilidad de cada diseño frente a los diseños convencionales.

En la Tabla 3.2 se incluyen los criterios técnicos y cualitativos, la cual se llena ponderando los cálculos de criterios técnicos estimados en el capítulo 3 y los aspectos cualitativos especificados en este capítulo en la presentación de cada alternativa; las ponderaciones se rigen desde 1 como la menor ponderación hasta 5 la mayor puntuación.

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS Y ANÁLISIS

En este capítulo se presentan los cálculos correspondientes a las dimensiones de las cámaras para los cuales se han considerado unidades del SI, los cálculos necesarios para la construcción de la turbina en base al perfil NACA0015 usado comúnmente en la construcción de turbinas Wells, la relación entre la altura máxima/mínima y las características del oleaje para evaluarlas en el análisis CFD y definir la interfase agua-aire, las vistas isométricas y laterales de los diseños de las cámaras y la sección que contiene la turbina y el generador, así como sus respectivos planos, las simulaciones realizadas en SolidWorks y un análisis de los resultados de las simulaciones y fallas en el procedimiento.

Cálculo de las dimensiones de las cámaras

Para las dimensiones se ha tomado en cuenta la profundidad a la que está ubicada la cámara porque va a influir en la altura máxima y mínima a la que llegará la columna de agua en su etapa de succión, y los parámetros geométricos recomendados en la Tabla 2.1. La ejecución de los cálculos se ha separado en tres secciones, donde cada sección corresponde a cada una de las alternativas propuestas. Las dimensiones que se calcularon fueron: ancho de la entrada de la cámara, la altura recta desde la entrada de la cámara (en el caso de la cámara cilíndrica, desde la mitad de la entrada), la altura de la pared frontal que está en contacto con el agua, la longitud de apertura de la cámara donde ingresa el agua, y el ángulo de inclinación de la cámara.

Cálculos para la Cámara cilíndrica inclinada

-Ancho de la cámara

$$B= 0.92h \quad (3.1)$$

La cámara se ubica en una zona donde el nivel del agua es en promedio 10 m.

$$B= 0.92(10m)$$

$$B= 9.2 \text{ m}$$

-Altura de la cámara

$$Ha= 3B \quad (3.2)$$

$$H_a = 3(9.5\text{m}) = 27.6 \text{ m}$$

-Altura de la pared frontal sumergida

$$D = 0.4h \quad (3.3)$$

$$D = 0.4(10\text{m})$$

$$D = 4 \text{ m}$$

-Longitud de apertura

$$H_o = 0.7h \quad (3.4)$$

$$H_o = 0.7(10\text{m})$$

$$H_o = 7 \text{ m}$$

Dado que este valor es una longitud mínima, por cuestiones de estética y condiciones de oleaje se escoge una $H_o = 9 \text{ m}$. Este cambio no afectará significativamente a la eficiencia de la conversión energética.

-Ángulo de inclinación

Se ha escogido un ángulo de posición de la cámara cilíndrica inclinada de 55° debido a lo reportado en la literatura, donde se indica que la experimentación con inclinaciones desde 45° a 55° han logrado buenos resultados con un aumento en el desempeño del dispositivo OWC.

Los cálculos adicionales se encuentran en el Apéndice A.

Cálculos de la turbina

La selección de turbina tipo Wells se dio a través de los resultados investigados en la literatura, observando respuestas altamente eficientes frente a otro tipo de turbina gracias a su adaptabilidad de rotación en un sentido independientemente de la dirección del fluido, además de la flexibilidad en el ajuste del perfil de sus álabes, el cual corresponde a la clasificación de Naca0015, y son los diseños implementados en todas las cámaras. Se escogió este perfil porque es el más común y ha demostrado tener resultados positivos en la literatura. Por otro lado, considerando las dimensiones de las cámaras propuestas, se ha realizado un diseño a escala 3:1 de los parámetros mostrados en la Tabla 2.2.

Se detallan los cálculos resueltos de: la cuerda que representa la distancia entre el borde de ataque y borde de salida del álabe, el espesor de este, el radio del cubo que es la distancia radial desde el eje central de rotación hasta la raíz del álabe, el radio de la punta que es la distancia radial desde el eje central de rotación hasta la punta del álabe, y la holgura en la punta que es la distancia entre la punta del álabe y la carcasa que lo rodea.

-Cuerda del álabe de la turbina

$$C = 3(125 \text{ mm})$$

$$C = 375 \text{ mm}$$

-Espesor del álabe

$$t = 0.15C \quad (3.5)$$

$$t = 0.15(375 \text{ mm})$$

$$t = 57 \text{ mm}$$

-Radio del cubo del álabe

$$R_h = 3(200 \text{ mm})$$

$$R_h = 600 \text{ mm}$$

-Radio de la punta del álabe

$$R_t = 3(294 \text{ mm})$$

$$R_t = 882 \text{ mm}$$

-Holgura en la punta de la turbina

$$C_l = 0.8C/100 \quad (3.6)$$

$$C_l = 0.8(375 \text{ mm})/100$$

$$C_l = 3 \text{ mm}$$

Resultado del diseño de la cámara cilíndrica inclinada

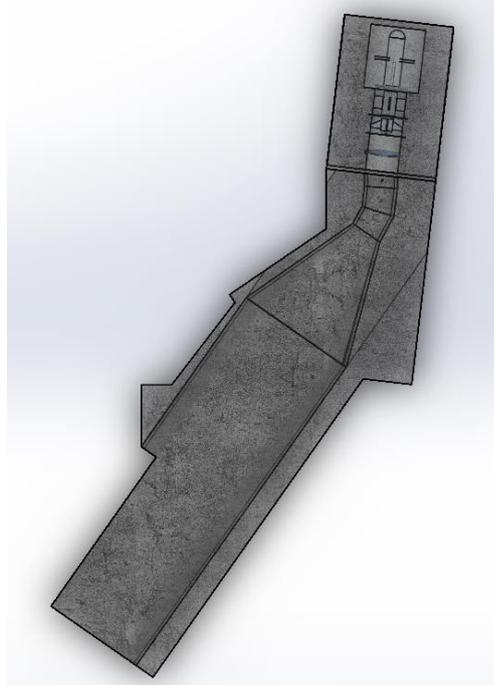


Figura 3.1 Vista lateral de la cámara modelada en AutoCAD y generada como sólido tridimensional en SolidWorks. Está diseñada con una inclinación de 55° , posee una corta sección cónica en la parte superior donde se reduce la inclinación a 80°

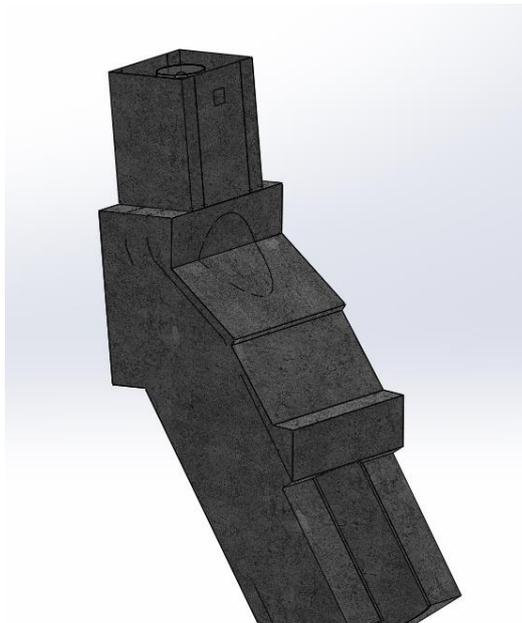


Figura 3.2. Vista isométrica de la cámara generada como sólido tridimensional en SolidWorks. La superficie está recubierta con hormigón reforzado para soportar las variaciones climáticas

Los diseños de las cámaras cilíndrica y rectangular se encuentran en el Apéndice B.

Cálculo de la altura de la columna de agua oscilante

Los siguientes cálculos se realizaron para determinar la altura máxima y mínima de la columna de agua dentro de cada cámara en la etapa de succión, alturas de interés para la posición de la interfase agua-aire en las simulaciones CFD. La relación básica entre la altura y la amplitud de la ola es $H = K \cdot A$ [m], donde K es un factor adimensional que incluye los parámetros geométricos, una constante que depende de las características de las olas y otros parámetros del mar, y A es la amplitud de la ola incidente.

Para calcular “K” se usa la siguiente fórmula:

$$K = \frac{C \cdot A_{entrada}}{A_{cámara}} \cdot \left(1 + \frac{h_{agua}}{\lambda} \right) \quad (3.7)$$

donde C es un factor de corrección obtenido a partir de pruebas experimentales, $A_{entrada}$ es el área transversal de la entrada a la cámara, $A_{cámara}$ es el área transversal de la cámara de aire, h_{agua} es la profundidad del agua y λ es la longitud de la ola.

La longitud de la ola se refiere a la distancia horizontal entre 2 crestas consecutivas de una ola y se obtiene según la teoría lineal de las ondas expresada por la Ecuación 1.7. La aproximación de esta expresión por condición de agua profunda (h grande) resulta en:

$$\lambda = \frac{g \cdot T^2}{2\pi} \cdot 1 = \frac{g \cdot T^2}{2\pi} \quad (3.8)$$

Para los cálculos de H, se asume $C=1$ porque se realiza un análisis teórico. Además, el valor de A se lo determinó a partir de mapas dinámicos que indican la altura de las olas en tiempo real, en este caso, se usa un promedio de la altura del mes de diciembre del 2024, donde según la Figura 3.1 es de 1.75 m en la parte inferior de Manabí y la costa de Santa Elena.

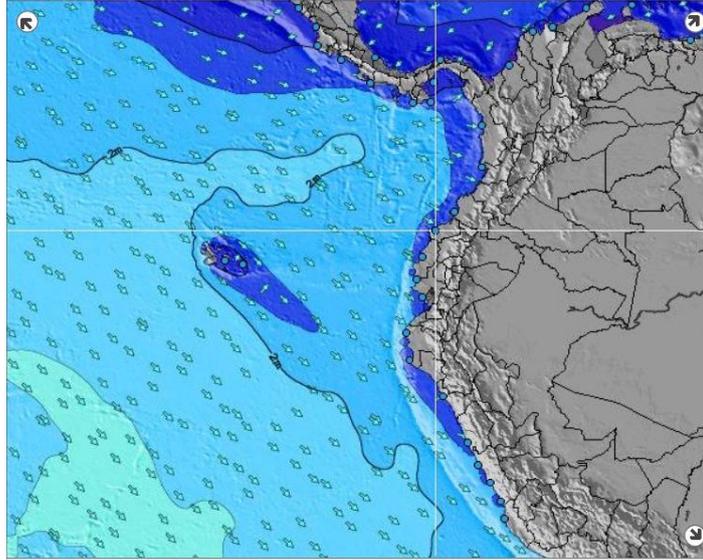


Figura 3.3 Mapa dinámico que indica la altura de la ola en el perfil costero ecuatoriano. El color azul denota a las olas con menor altura y el color verde a las olas con mayor altura.

Se procede a realizar el cálculo de la altura para la cámara cilíndrica inclinada

$$H = \frac{1 \cdot (\pi \cdot 4.75^2 + 9 \cdot 6.5 \text{ m}^2)}{\pi \cdot 1.36^2 \text{ m}^2} \left(1 + \frac{10 \text{ m}}{\lambda}\right) \cdot 0.87$$

$$H = 19.37 \left(1 + \frac{10 \text{ m}}{\lambda}\right) [\text{m}]$$

Los cálculos adicionales se encuentran en el Apéndice C.

Evaluando el período T en el Factor K y λ , se obtiene como resultados las siguientes gráficas.

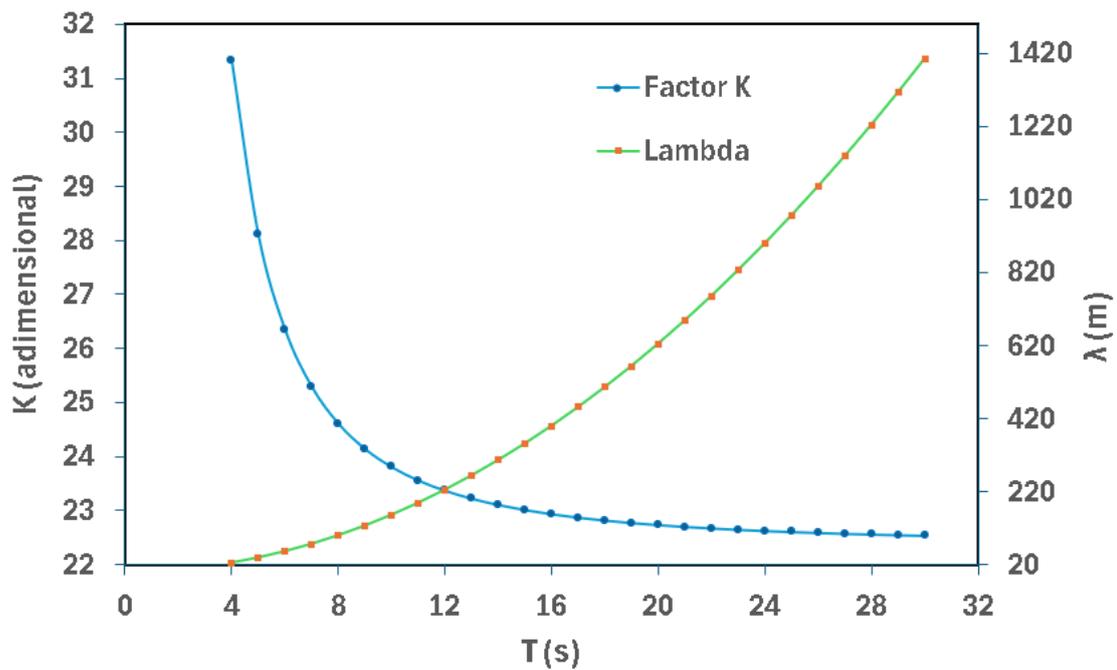


Figura 3.4 Curva del Factor K (eje izquierdo) y la longitud de onda en función del periodo T (eje derecho) para la cámara cilíndrica inclinada. T fue evaluado desde 4s a 30s y como resultado se obtuvo un comportamiento exponencial para K y polinomial para lambda.

Las curvas adicionales se encuentran en el Apéndice D.

Resultados del diseño de la turbina

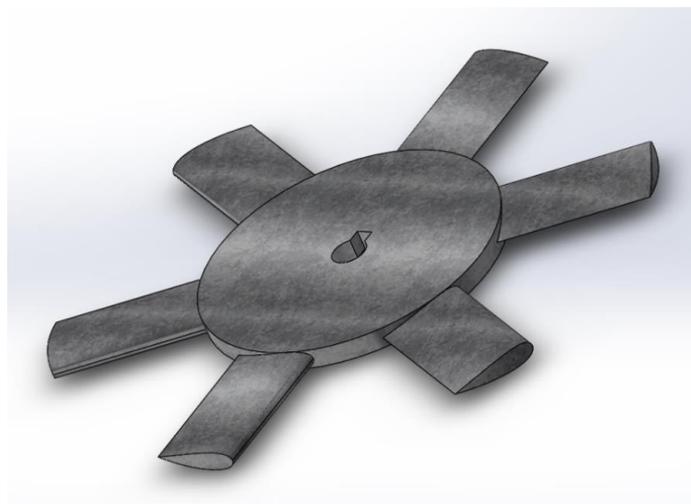


Figura 3.5 Diseño de la turbina Wells con 6 álabes que sigue la clasificación NACA0015. La forma de la sección transversal de cada álabe permite que trabaje de manera bidireccional

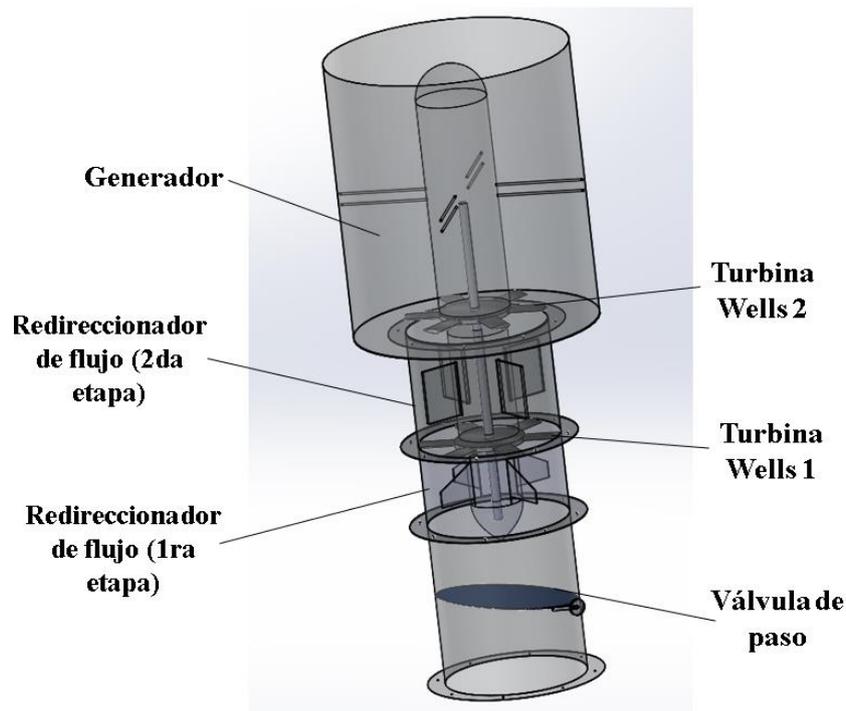


Figura 3.6 Diseño tridimensional de la turbina Wells que en la parte inferior tiene una válvula mariposa, seguida de un redireccionador, a continuación, se visualiza la turbina con sus álabes y nuevamente un redireccionador, en la parte superior tiene instalado el generador

Resultados de las simulaciones

En esta sección se realizaron análisis computacionales que evalúan el comportamiento del agua y del aire en el momento que la altura de la interfase agua-aire alcanza un nivel definido. Para cada cámara se ejecutaron 2 análisis, uno con un nivel máximo y otro con un nivel mínimo, y en cada análisis se realizaron 2 etapas: en la primera etapa se analiza el agua y en la segunda etapa se analiza el aire. Las alturas se escogieron según el período máximo que pueden alcanzar las olas en Ecuador (18 s) y el período mínimo (4s).

Cámara Cilíndrica inclinada

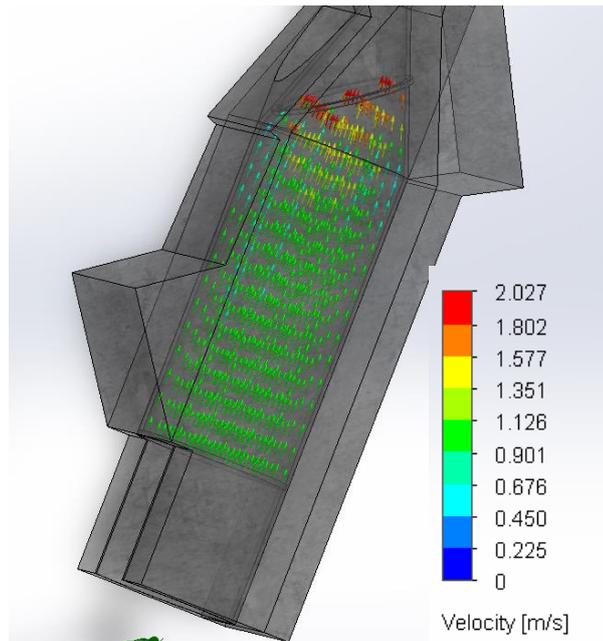


Figura 3.7 Análisis computacional del comportamiento del agua en el interior de la cámara cuando la altura de la columna de agua llega a alcanzar 20 m

En la parte derecha se observa una escala de colores que indica la magnitud de los vectores de velocidad en m/s del agua que recorre la cámara. La velocidad del agua entra a un 1 m/s y llega a la interfase agua-aire a aproximadamente 2 m/s, además, en la mayor parte de la cámara de agua, la velocidad se mantiene constante en aproximadamente 1.12 m/s.

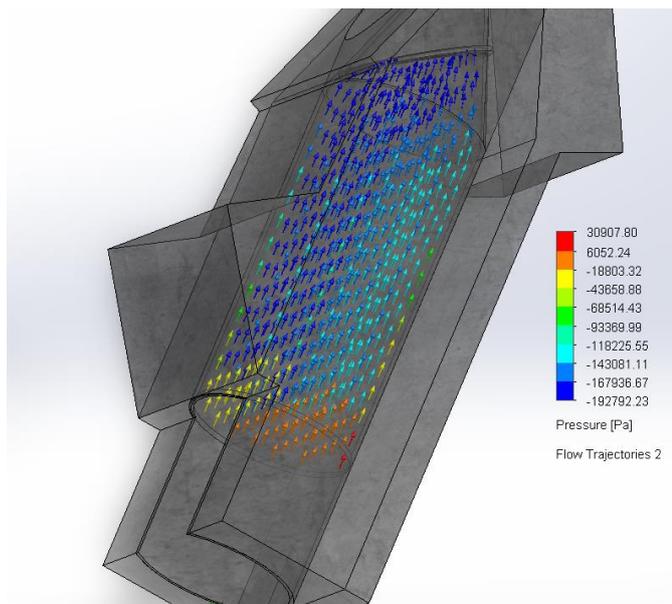


Figura 3.8 Análisis computacional del comportamiento del agua en el interior de la cámara cuando la altura de la columna de agua llega a alcanzar 20 m. En la parte derecha se observa una escala de colores que indica la magnitud de la presión en Pa de los vectores que recorren la cámara

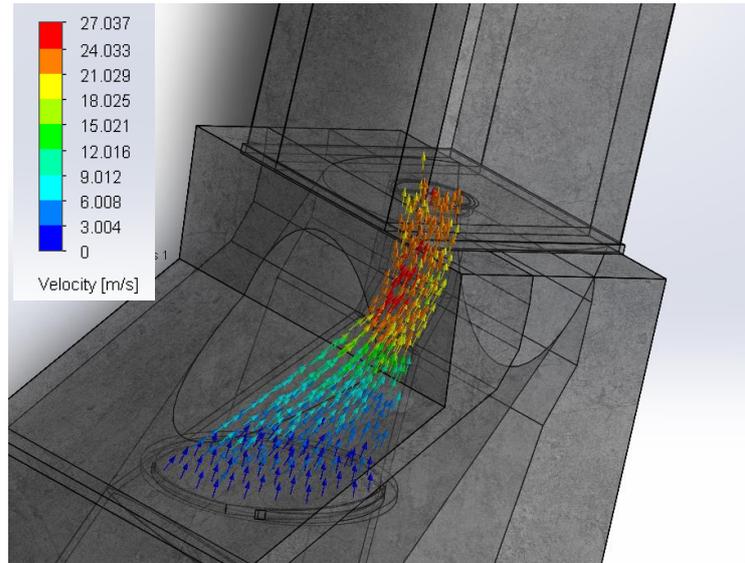


Figura 3.9 Análisis computacional del comportamiento del aire en el interior de la cámara cuando la columna de agua llega a 20 m

En la parte izquierda se observa una escala de colores que indica la magnitud de los vectores de velocidad en m/s del aire que recorre la cámara. La velocidad del aire entra a 3 m/s y llega a la salida de la cámara a aproximadamente 24 m/s, además, en el conducto de aire, la velocidad aumenta progresivamente.

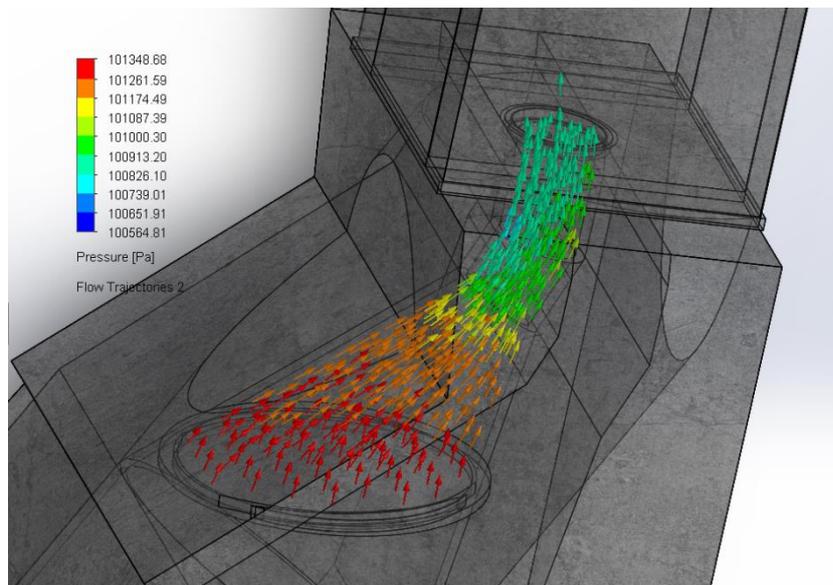


Figura 3.10 Análisis computacional del comportamiento del aire en el interior de la cámara cuando la altura de la columna de agua llega a alcanzar 20 m. En la parte superior izquierda se observa una escala de colores que indica la magnitud de la presión en Pa de los vectores que recorren la cámara.

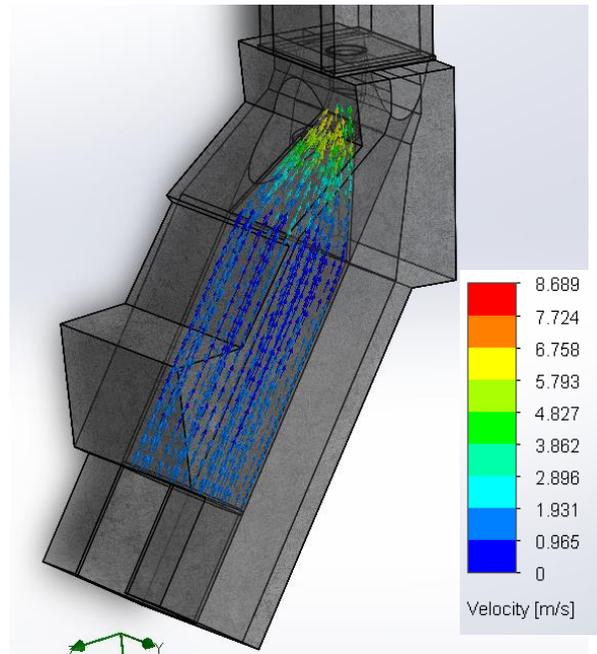


Figura 3.11 Análisis computacional del comportamiento del agua en el interior de la cámara cuando la altura de la columna de agua llega a alcanzar 27 m.

En la parte derecha se observa una escala de colores que indica la magnitud de los vectores de velocidad en m/s del agua que recorre la cámara. La velocidad del agua entra a un 1 m/s y llega a la interfase agua-aire a aproximadamente 5.8 m/s, además, en la mayor parte de la cámara de agua, la velocidad se mantiene constante en aproximadamente 1.9 m/s.

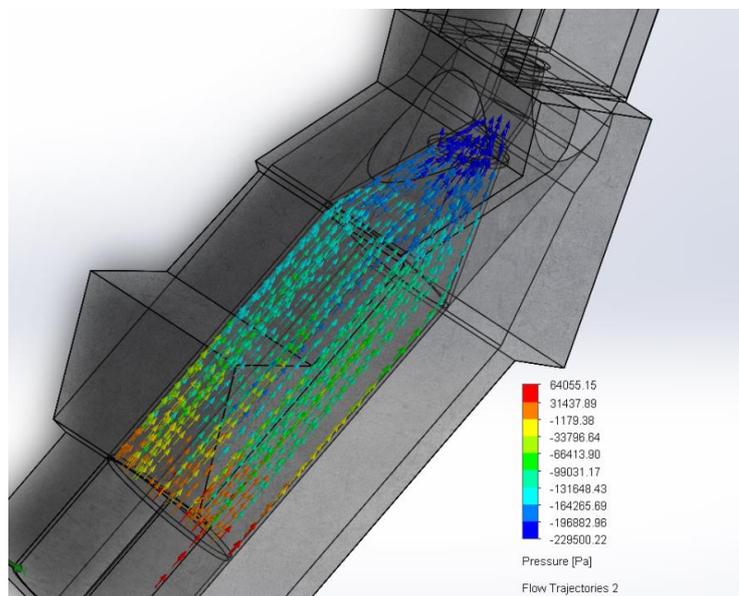


Figura 3.12 Análisis computacional del comportamiento del agua en el interior de la cámara cuando la altura de la columna de agua llega a alcanzar 27 m. En la parte derecha se observa una escala de colores que indica la magnitud de la presión en Pa de los vectores que recorren la cámara.

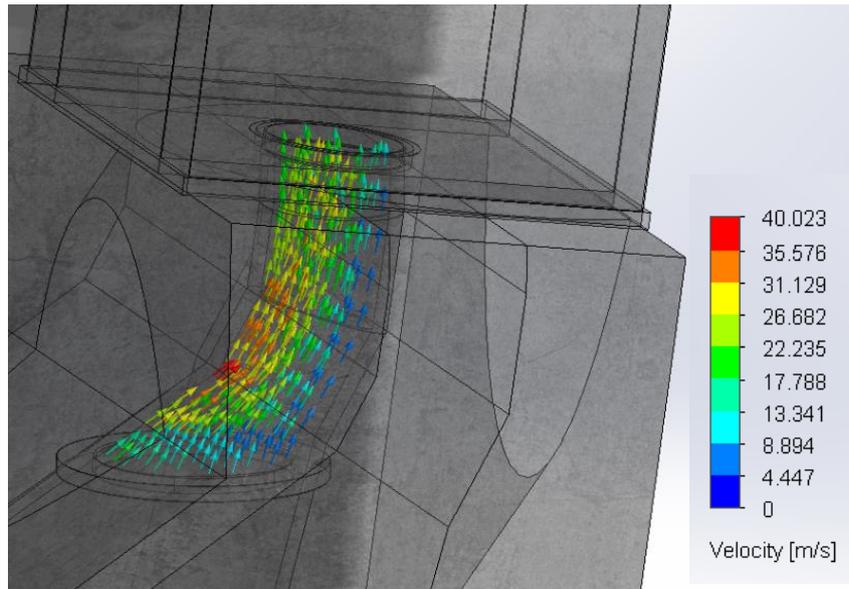


Figura 3.13 Análisis computacional del comportamiento del aire en el interior de la cámara cuando la columna de agua llega a 27 m.

En la parte derecha se observa una escala de colores que indica la magnitud de los vectores de velocidad en m/s del aire que recorre la cámara. La velocidad del aire entra a 3 m/s y llega a la salida de la cámara a aproximadamente 24 m/s, además, en el conducto de aire, la velocidad aumenta progresivamente.

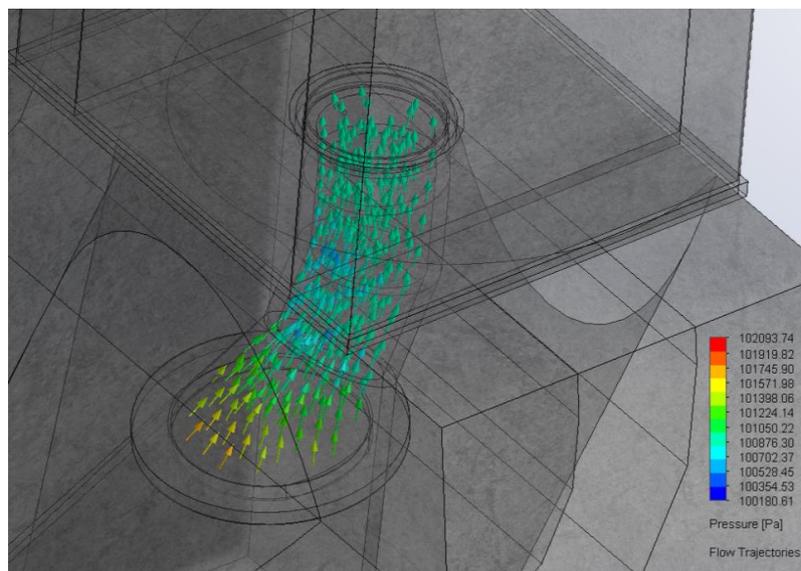


Figura 3.14 Análisis computacional del comportamiento del aire en el interior de la cámara cuando la altura de la columna de agua llega a alcanzar 27 m. En la parte inferior derecha se observa una escala de colores que indica la magnitud de la presión en Pa de los vectores que recorren la cámara.

Las simulaciones de las demás cámaras se encuentran en el Apéndice E.

Tabla de resultados de las simulaciones

Tabla 3.1 Se divide en 2 secciones: agua y aire, el sombreado de color verde corresponde a los resultados de las alturas mínimas y el sombreado naranja corresponde a los resultados de las alturas máximas evaluadas en cada modelo de cámara.

Parámetros	Cámara cilíndrica H(m) = 10/17	Cámara cilíndrica inclinada H(m) = 20/27	Cámara rectangular H(m) = 9/14
Agua			
Velocidad mínima (m/s)	1.60	0.58	0.01
Velocidad promedio (m/s)	26.52	1.87	1.05
Velocidad máxima (m/s)	32.39	2.03	1.15
Velocidad mínima (m/s)	11.80	4.73	0.41
Velocidad promedio (m/s)	27.15	7.74	1.14
Velocidad máxima (m/s)	32.10	8.69	1.22
Aire			
Velocidad mínima (m/s)	0.64	16.71	0.01
Velocidad promedio (m/s)	18.57	23.90	11.05
Velocidad máxima (m/s)	84.72	24.25	51.27
Presión mínima (kPa)	100.89	100.85	100.70
Presión promedio (kPa)	100.89	100.86	100.71

Presión máxima (kPa)	100.89	100.86	100.74
Velocidad mínima (m/s)	5.89 e-4	5.22	0.008
Velocidad promedio (m/s)	22.60	20.48	11.54
Velocidad máxima (m/s)	89.76	30.49	51.96
Presión mínima (kPa)	100.89	100.85	100.70
Presión promedio (kPa)	100.89	100.86	100.71
Presión máxima (kPa)	100.90	100.86	100.74

Cálculo de la eficiencia de captura

Con los resultados de las simulaciones se procede al cálculo de la eficiencia del sistema, se toma en cuenta las potencias de entrada y de salida, donde se requiere el valor de las velocidades y presiones en la cámara de aire. Para el cálculo de la eficiencia de captura se usaron las ecuaciones 1.4, 1.5 y 1.6.

Cámara cilíndrica inclinada

Datos:

$\lambda = 76.50$ m, es el valor de la longitud de onda para $T = 7$ s. Se ha escogido este periodo para hacer un análisis cuando la potencia disponible de las olas es mínima.
 $H = 1.74$ m, es la altura promedio de las olas que se escogió para el cálculo de la altura de la columna.

$$E = \frac{1}{2} \rho g \left(\frac{H}{2} \right)^2 = \frac{1}{2} \cdot 1025 \frac{Kg}{m^3} \cdot 9.8 \frac{m}{s^2} \cdot \left(\frac{1.74 m}{2} \right)^2 = 3801.5 \frac{Kg}{s^2}$$

Debido a que se trata de un análisis en aguas profundas:

$$Cg = \frac{\lambda}{2T} \quad (3.9)$$

$$Cg = \frac{76.50 \text{ m}}{2 \cdot 7 \text{ s}} = 5.46 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

De la ecuación 1.6

$$P_{olas} = 3801.5 \frac{\text{Kg}}{\text{s}^2} * 5.46 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 20772.48 \frac{\text{W}}{\text{m}}$$

Para el cálculo de la potencia neumática se consideraron los datos del análisis para la altura mínima de la columna de agua (20m) ya que se obtuvieron mejores resultados de velocidad del aire. El diferencial de presión es 100 kPa, que es un valor teórico en condiciones de oleaje bajo a moderado, S es el área de la salida de la cámara y V es la velocidad promedio que sale del conducto de aire (Tabla 3.1).

Dado que se trata de un análisis estacionario, la ecuación 1.5 se reduce a:

$$P_{neum} = \Delta P \cdot S_{cámara} \cdot V$$

$$P_{neum} = (100 \text{ kPa}) \cdot \frac{\pi * 2.6^2}{4} \text{ m}^2 \cdot (23.9 \frac{\text{m}}{\text{s}})$$

$$P_{neum} = 12690.9 \text{ W}$$

De la ecuación 1.4

$$\eta = \frac{12690.9 \text{ W}}{20772.48 \text{ W}}$$

$$\eta = 0.61$$

Cámara cilíndrica

La potencia de las olas (P_{olas}) es la misma ya que se consideran las mismas condiciones de oleaje.

$$P_{olas} = 20772.48 \frac{W}{m}$$

Para el cálculo de potencia de salida (P_{neum}) se consideraron los datos del análisis para la altura máxima de la columna de agua (17 m) ya que se obtuvieron mejores resultados de velocidad del aire.

$$P_{neum} = (100 \text{ kPa}) \cdot \frac{\pi * 2.6^2}{4} m^2 \cdot (22.6 \frac{m}{s})$$

$$P_{neum} = 12000.6 W$$

De la ecuación 1.4

$$\eta = \frac{12000.6 W}{20772.48 W}$$

$$\eta = 0.58$$

Cámara rectangular

La potencia de las olas (P_{olas}) es la misma ya que se consideran las mismas condiciones de oleaje.

$$P_{olas} = 20772.48 \frac{W}{m}$$

Para el cálculo de potencia de salida (P_{neum}) se consideraron los datos del análisis para la altura máxima de la columna de agua (14 m) ya que se obtuvieron mejores resultados de velocidad del aire.

$$P_{neum} = (100 \text{ kPa}) \cdot \frac{\pi * 2.6^2}{4} m^2 \cdot (11.54 \frac{m}{s})$$

$$P_{neum} = 6127.74 W$$

De la ecuación 1.4

$$\eta = \frac{6127.74 \text{ W}}{20772.48 \text{ W}}$$
$$\eta = 0.29$$

Análisis de Resultados

Cámara cilíndrica

En las Figuras E.1 y E.5 se puede observar que, en la entrada circular de la cámara, las olas ingresan con una velocidad de 1 m/s y en la tobera el agua aumenta su velocidad llegando a 9 m/s, a partir de este punto el agua tiene una velocidad constante de 24 m/s. Se aprecia que, en las esquinas de la pared inferior, el agua pierde velocidad debido a la presencia de curvaturas en los cambios de sección del diseño. La diferencia entre las figuras se evidencia en la velocidad que alcanza un incremento de 3 m/s en la Figura E.5, por lo que se puede concluir que, a mayor altura de la columna de agua, mayor velocidad de impulso recibirá la columna de aire, y el gas entrará con mayor potencia a la turbina. En las Figuras E.2 y E.6 se observa que el agua entra con alta presión y la presión disminuye conforme el agua recorre la geometría, debido a que el aumento de la energía cinética debe ser contrarrestada por una disminución de la energía potencial de presión. En las Figuras E.3 y E.7 aparecen vectores de 25 m/s y 15 m/s que indican que el aire se mantiene con una velocidad promedio en la mayor parte del ducto, además, en la parte superior se observan vectores de 5 m/s que se desvían de su flujo uniforme, lo que provoca una disminución en la velocidad del aire. En las Figuras E.4 y E.8 se observa que la presión del aire se mantiene constante en la mayor parte del ducto y cuando el fluido se acerca a la salida de la cámara, la presión va disminuyendo levemente, según el principio de conservación de energía para fluidos en movimiento.

Cámara cilíndrica inclinada

En las Figuras 3.7 y 3.11 se observa que la velocidad se mantiene constante hasta llegar a la entrada de la tobera, a partir de este punto la velocidad se maximiza llegando a valores de 2 m/s y 5.8 m/s para la altura mínima y máxima de la columna de agua oscilante, respectivamente. En las Figuras 3.8 y 3.12 se aprecia que la presión puede llegar a tener valores negativos, esto puede ser causado por el diseño de la cámara que puede acelerar el fluido tal que la presión estática sea menor que la presión dinámica. En términos ingenieriles, un valor negativo de presión expresa una presión inferior a la presión atmosférica estándar (101 kPa) lo que se conoce como presión de vacío, que es característico de los procesos de succión y extracción que se presentan en las columnas de agua oscilante. En las Figuras 3.9 y 3.13 se observa que la velocidad del fluido aumenta en la cámara de aire conforme la sección se va reduciendo, esto se puede explicar según la ecuación del caudal $Q=V \cdot A$, donde el área y la velocidad son inversamente proporcionales, si el área disminuye, la velocidad en esa sección va a aumentar, pero el caudal se mantendrá constante en cada sección del ducto. En las Figuras 3.10 y 3.14 se observa que la presión baja conforme el fluido sube y esto está relacionado con el principio de conservación de energía, basado en mantener la energía total constante a lo largo del flujo de aire.

Cámara rectangular

En las Figuras E.9 y E.13, debido a que no hay un cambio significativo de sección, la razón de aumento de velocidad es baja, además, a diferencia de la cámara cilíndrica, en la cámara rectangular la columna de agua no llega a un nivel alto y por esta razón la velocidad casi no varía, lo que afecta negativamente a la eficiencia de la cámara. En las Figuras E.10 y E.14 los valores de presión disminuyen considerablemente a pesar de que la velocidad no aumenta de forma significativa, en el caso de la Figura E.14 se debe al cambio en la dirección del agua por la forma de la geometría. En las Figuras E.11 y E.15 se observa una predominancia de vectores azules, con velocidades por debajo de los 5.7 m/s, lo que indica que la velocidad del aire se mantiene constante. Sin embargo, en la sección de entrada a la turbina, el fluido adquiere una mayor velocidad y los vectores tienen magnitudes de 14 m/s y 25 m/s, este comportamiento se debe al principio de conservación de la masa que se rige por la ecuación de continuidad $A_1V_1= A_2V_2$ ($A=$ área y $V=$ velocidad), al reducir el área 2, el aire tiene que

fluir más rápido para que la misma cantidad de fluido pase en el mismo tiempo que si fluyera en el área 1. En las Figuras E.12 y E.16, se aprecia que en la sección donde el fluido se acelera, la presión disminuye debido a la presencia de vórtices que tienen a disminuir la presión localizada.

Análisis comparativo con la literatura

Según la geometría de los ductos de las cámaras neumáticas, los de sección transversal circular destacan en los resultados obtenidos de eficiencia de captura con 58% y 61% para la cámara cilíndrica y la cámara cilíndrica inclinada, respectivamente, por sobre el ducto de sección rectangular que alcanza un 29% de eficiencia. Esto concuerda con el estudio de Rozali et al. [23] que demuestra una optimización en el diseño de las cámaras neumáticas a través de geometría transversal circular y oval para que el flujo de aire sea laminar y se pueda aprovechar la transferencia de masa y energía a través de sistema OWC.

La cámara cilíndrica inclinada se mantiene firme a los resultados esperados para el ángulo de inclinación de 55° , como lo menciona Ram et al. [21], se logra confirmar que a menores ángulos de inclinación de la cámara neumática se obtiene una mayor altura de la columna de agua, llegando hasta 27 m, lo que impacta positivamente en la velocidad del fluido hacia la turbina y por ende incrementa los valores de eficiencia en la transmisión de energía; sin embargo, para la cámara rectangular que está diseñada con un ángulo de 45° para la inclinación del ducto de entrada de las olas, la altura máxima de la columna llega a 14 m, lo que afecta la eficiencia de captura. Por esta razón se pondera la sección transversal sobre la inclinación del ducto de la cámara neumática, como lo detalla Rozali et al. [23], a diferencia de los resultados de Patel [22] quien en su estudio resalta la importancia de la inclinación de las cámaras para evitar las pérdidas energéticas por cambios bruscos de sección como en el caso de las cámaras convencionales en forma de L, teniendo como resultado que las eficiencias son directamente proporcionales a la inclinación de la cámara neumática en el caso de las cámaras de sección circular cuyos ángulos de 45° y 55° concuerda con las eficiencias de 61% y 58% para la cámara cilíndrica y cilíndrica inclinada respectivamente.

En cuanto a la cámara cilíndrica, según López et al. [16], los cambios en las OWC en forma de L ofrecen mejores resultados cuando el ingreso está en la mínima profundidad y con mayor altura del conducto horizontal, lo que se tomó en cuenta para hacer esta sección cónica hacia afuera ampliando la capacidad de captura de las olas incidentes, sin embargo, las simulaciones en las Figuras E.1, E.2 y E.5 demuestran que la captura de la ola y la velocidad en la transferencia de masa y energía es baja y no recibe impactos relevantes en el cambio de sección hacia el ducto de la cámara neumática, a pesar de que se consideraron las recomendaciones principales para alcanzar la optimización de este tipo de cámara.

Para Sadam [19], la geometría que considera reducciones cónicas en el ducto manifiesta la mejor disposición para guiar el fluido hacia la sección de la turbina, de manera que se aprovecha la reducción de área con el principio de conservación de masa y energía para alcanzar velocidades más elevadas que contribuyen en la eficiencia del sistema, tal como se observa en las gráficas E.1 y E.5 de la cámara cilíndrica en la sección de abertura hacia el mar, con visibles cambios en los vectores de velocidad que indican la dirección y el aumento en magnitud. Los efectos del ducto con terminación cónica se observan en la cámara cilíndrica inclinada en las figuras 3.7, 3.9 y 3.11 donde los vectores de velocidad cambian de color por el aumento en su magnitud, lo que se alinea al estudio de la optimización del diseño de las OWC.

Respecto a las condiciones geométricas expuestas por Dizadji [26], según la inclinación de ángulo en la entrada el flujo de salida del aire es inversamente proporcional, donde las relaciones del flujo de entrada y salida de aire en la cámara cilíndrica con ángulo de abertura es de 107° le corresponde un valor de 2.6 como razón de flujo de aire, mientras que a medida que el ángulo disminuye para la cámara rectangular con 45° la razón aumenta a 35, coincidiendo con la premisa de Dizadji cuando las placas delantera y posterior del ducto son paralelas el flujo de salida de aire también aumenta, así como en el caso de este tipo de cámaras convencionales, como lo son las cámaras rectangulares.

Matriz de decisión

Se realiza una matriz de decisión que brinda las ponderaciones de cada alternativa frente a cada parámetro relevante en el diseño.

Tabla 3.2 Matriz de decisión con todos los parámetros ponderados según el análisis de cada alternativa

Criterios de decisión	Alternativa 1: Cámara cilíndrica	Alternativa 2: Cámara cilíndrica inclinada	Alternativa 3: Cámara rectangular
Eficiencia energética	4	5	2
Viabilidad técnica	4	5	3
Costos de implementación	3	4	5
Impacto ambiental	4	4	3
Adaptabilidad a las condiciones de oleaje	2	4	5
Innovación y flexibilidad del diseño	2	3	5
Facilidad de mantenimiento	4	3	2
Total	23	28	25

El análisis de:

- Los costos de la implementación de las cámaras se encuentra en el Apéndice F.
- El impacto ambiental de la construcción de cada cámara se encuentra en el Apéndice G.
- La innovación y flexibilidad del diseño se encuentra detallado en el Apéndice H.
- La viabilidad técnica de cada cámara se encuentra en el Apéndice I.
- La facilidad de mantenimiento se encuentra en el Apéndice J.
- La adaptabilidad a las condiciones de oleaje se encuentra en el Apéndice K.

CAPÍTULO 4

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 Conclusiones

1. Se optimizaron los diseños de 3 cámaras mediante la elección de geometrías, disposiciones angulares y tamaños de apertura, obteniendo como resultado un aumento significativo de las velocidades del aire que ingresa a la turbina, cuyas magnitudes se encuentran dentro del rango óptimo para lograr el mejor desempeño de la turbina. Se determinó que la cámara cilíndrica inclinada tiene la mejor geometría para maximizar la velocidad del aire que sale de la cámara y se dirige a la turbina Wells.
2. Se evaluaron ángulos entre 45° y 55° , formas geométricas (cónica, circular, rectangular) y espesores (0.5-1.5 m) con el fin de evaluar la cámara que satisface las características para el buen desempeño de la turbina Wells. Se encontró que las características de la cámara cilíndrica inclinada, las cuales son: 1 m de espesor, 55° de inclinación y 9 m de apertura, son las más adecuadas para este objetivo.
3. Se simuló el comportamiento del agua dentro de las cámaras y con los resultados obtenidos en la interfase agua-aire se simuló el comportamiento del aire hasta la salida de la cámara. Como resultado se obtuvo un incremento de la velocidad del agua en la interfase respecto a la velocidad con la que entra a las cámaras, de las cuales resalta la cámara cilíndrica con una tasa de aumento igual a 27, en comparación con las tasas de 7 y 1.14 que se obtuvieron para las cámaras cilíndrica inclinada y rectangular.
4. Se evaluó una tabla de selección de la mejor alternativa obteniendo como resultados 23, 28 y 25 puntos para la cámara cilíndrica, cilíndrica inclinada y rectangular, respectivamente. Como conclusión, la cámara cilíndrica inclinada cumple con la mejor sinergia entre eficiencia, viabilidad técnica, económica y medioambiental.

4.2 Recomendaciones

Los siguientes párrafos fueron escritos en base a las limitaciones del estudio, su objetivo principal es proporcionar alcances futuros para realizar mejoras en la metodología y ampliar el análisis del desempeño de los dispositivos OWC.

1. Obtener el coeficiente C mediante experimentación para obtener resultados más acertados en el cálculo de la altura de la columna de agua.
2. Para trabajos futuros se recomienda estudiar la turbina y simular su comportamiento usando los datos obtenidos en las simulaciones del aire, de esta manera, se podrá realizar un estudio más completo de cómo influyen los resultados de este trabajo en el desempeño de la turbina Wells.
3. Seleccionar un generador eléctrico comercial para que junto con la eficiencia de captura y la eficiencia de la turbina se pueda obtener la eficiencia total de cada cámara analizada en el presente trabajo.
4. Realizar un análisis CFD de superficie libre contribuiría a tener un mejor conocimiento de cómo se comporta la columna de agua conforme pasa el tiempo, lo que serviría para hacer correcciones en la geometría o ubicar la cámara en una zona que tenga condiciones más apropiadas de oleaje.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] International Energy Agency, “World Energy Outlook 2019,” Paris, 2019. Accessed: Oct. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>
- [2] I. López, J. Andreu, S. Ceballos, I. Martínez de Alegría, and I. Kortabarria, “Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 27, pp. 413–434, Nov. 2013, doi: 10.1016/j.rser.2013.07.009.
- [3] A. Copping, H. Battey, J. Brown-Saracino, M. Massaua, and C. Smith, “An international assessment of the environmental effects of marine energy development,” *Ocean Coast Manag*, vol. 99, pp. 3–13, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.ocecoaman.2014.04.002.
- [4] J. Sim and C.-S. Kim, “The value of renewable energy research and development investments with default consideration,” *Renew Energy*, vol. 143, pp. 530–539, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2019.04.140.
- [5] F. Mwasilu and J. Jung, “Potential for power generation from ocean wave renewable energy source: a comprehensive review on state-of-the-art technology and future prospects,” *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, no. 3, pp. 363–375, Feb. 2019, doi: 10.1049/iet-rpg.2018.5456.
- [6] M. Lehmann, F. Karimpour, C. A. Goudey, P. T. Jacobson, and M.-R. Alam, “Ocean wave energy in the United States: Current status and future perspectives,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 74, pp. 1300–1313, Jul. 2017, doi: 10.1016/j.rser.2016.11.101.
- [7] O. Langhamer, K. Haikonen, and J. Sundberg, “Wave power—Sustainable energy or environmentally costly? A review with special emphasis on linear wave energy converters,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 4, pp. 1329–1335, May 2010, doi: 10.1016/j.rser.2009.11.016.
- [8] A. E. Copping *et al.*, “Potential Environmental Effects of Marine Renewable Energy Development—The State of the Science,” *J Mar Sci Eng*, vol. 8, no. 11, p. 879, Nov. 2020, doi: 10.3390/jmse8110879.

- [9] F. Fusco, G. Nolan, and J. V. Ringwood, "Variability reduction through optimal combination of wind/wave resources – An Irish case study," *Energy*, vol. 35, no. 1, pp. 314–325, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.energy.2009.09.023.
- [10] C. Pérez-Collazo, D. Greaves, and G. Iglesias, "A review of combined wave and offshore wind energy," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 141–153, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.09.032.
- [11] S. Gallagher, R. Tiron, E. Whelan, E. Gleeson, F. Dias, and R. McGrath, "The nearshore wind and wave energy potential of Ireland: A high resolution assessment of availability and accessibility," *Renew Energy*, vol. 88, pp. 494–516, Apr. 2016, doi: 10.1016/j.renene.2015.11.010.
- [12] OES, "Vision for International Deployment of Ocean Energy," Mar. 2017.
- [13] International Renewable Energy Agency, "Innovation Outlook: Ocean Energy Technologies," Abu Dhabi, Dec. 2020. Accessed: Oct. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Innovation-Outlook-Ocean-Energy-Technologies>
- [14] IEA, "Electricity Information: Overview," Paris, 2020. Accessed: Oct. 19, 2024. [Online]. Available: <https://www.iea.org/reports/electricity-information-overview>
- [15] B. Drew, A. R. Plummer, and M. N. Sahinkaya, "A review of wave energy converter technology," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, vol. 223, no. 8, pp. 887–902, Dec. 2009, doi: 10.1243/09576509JPE782.
- [16] I. López, R. Carballo, D. M. Fouz, and G. Iglesias, "Design Selection and Geometry in OWC Wave Energy Converters for Performance," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 6, p. 1707, Mar. 2021, doi: 10.3390/en14061707.
- [17] V. Jayashankar *et al.*, "A twin unidirectional impulse turbine topology for OWC based wave energy plants," *Renew Energy*, vol. 34, no. 3, pp. 692–698, Mar. 2009, doi: 10.1016/j.renene.2008.05.028.
- [18] K. Hong, S.-H. Shin, D.-C. Hong, H.-S. Choi, and H. Seok-Won, "Effects of shape parameters of OWC chamber in wave energy absorption," *The Seventeenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, Jul. 2007.

- [19] A. Sadam, M. Teh, S. Siti, T. Sea, and H. Lim, "Design enhancement of an Oscillating water column for harnessing of wave energy," *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 12, no. 16, pp. 4791–4795, Aug. 2017.
- [20] Z. Liu, C. Xu, N. Qu, Y. Cui, and K. Kim, "Overall performance evaluation of a model-scale OWC wave energy converter," *Renew Energy*, vol. 149, pp. 1325–1338, Apr. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2019.10.126.
- [21] K. R. Ram, M. R. Ahmed, M. A. Zullah, and Y.-H. Lee, "Experimental studies on the flow characteristics in an inclined bend-free OWC device," *Journal of Ocean Engineering and Science*, vol. 1, no. 1, pp. 77–83, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.joes.2015.12.003.
- [22] S. K. Patel, K. Ram, M. R. Ahmed, and Y.-H. Lee, "Performance studies on an oscillating water column employing a Savonius rotor," *Sci China Technol Sci*, vol. 54, no. 7, pp. 1674–1679, Jul. 2011, doi: 10.1007/s11431-011-4407-z.
- [23] Rohaizad Hafidz Rozali, Muhammad Adli Mustapa, Mohd Amin Hakim Ramli, Muhammad Nasuha Mansor, Iwan Zamil Mustaffa Kamal, and Engku Ahmad Azulhisham Engku Mohamed, "Design an Optimum Air Duct for Oscillating Water Column Wave Energy Device," *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, vol. 34, no. 1, pp. 164–176, Nov. 2023, doi: 10.37934/araset.34.1.164176.
- [24] J. Ding, S. Pang, and Z. Chen, "Optimization of the chamber of OWC to improve hydrodynamic performance," *Ocean Engineering*, vol. 287, p. 115782, Nov. 2023, doi: 10.1016/j.oceaneng.2023.115782.
- [25] Instituto Oceanográfico y Antártico de la Armada, "Boletín quincenal - 16 al 31 de diciembre 2024," Quito, Dec. 2024.
- [26] N. Dizadji and S. E. Sajadian, "Modeling and optimization of the chamber of OWC system," *Energy*, vol. 36, no. 5, pp. 2360–2366, May 2011, doi: 10.1016/j.energy.2011.01.010.
- [27] R. Ekström, B. Ekergård, and M. Leijon, "Electrical damping of linear generators for wave energy converters—A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 42, pp. 116–128, Feb. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2014.10.010.
- [28] J. Parra-Quintero, A. Rubio-Clemente, and E. Chica, "Simulación numérica de una columna de agua oscilante para las condiciones de ola del océano Pacífico

- colombiano,” *TecnoLógicas*, vol. 26, no. 57, p. e2630, Jul. 2023, doi: 10.22430/22565337.2630.
- [29] J. Quisnancela, A. Campaña, and F. Guerrón, “Índices de Precios de Materiales, Equipo y Maquinaria de la Construcción ,” Quito, Feb. 2024.
- [30] HOLCIM Ecuador, “Ficha técnica Concreto Ultraserie,” Guayaquil, 2024.
- [31] Colegio Nacional de Arquitectos del Ecuador, “Reglamento Nacional de Aranceles ,” Quito, May 2011.
- [32] R. C. Thomson, J. P. Chick, and G. P. Harrison, “An LCA of the Pelamis wave energy converter,” *Int J Life Cycle Assess*, vol. 24, no. 1, pp. 51–63, Jan. 2019, doi: 10.1007/s11367-018-1504-2.

APÉNDICES

APÉNDICE A. Cálculos de las dimensiones de las cámaras

Cámara cilíndrica

-Ancho de la cámara

La cámara se ubica en una zona donde el nivel del agua es en promedio 21 m.

$$B = 0.92(21\text{m})$$

$$B = 20 \text{ m}$$

-Altura de la cámara

Por motivos de estética y optimización de material, en este cálculo no se considera la relación $H_a = 3B$ recomendada por la literatura, además, no se necesita una cámara de gran altura para que la columna oscile dentro de ella, así que se ha establecido una relación $H_a = 2B$.

$$H_a = 2(20\text{m}) = 40 \text{ m}$$

-Altura de la pared frontal sumergida

Debido a que la entrada es una tobera de sección circular, este cálculo no aplica para este diseño.

-Ángulo de inclinación

La cámara cilíndrica no está diseñada con un ángulo de inclinación, se han considerado 2 codos de 45° para la transición de horizontal a vertical, pero en sí la forma de la cámara no está inclinada respecto a la vertical.

Cámara rectangular

-Ancho de la cámara

La cámara se ubica en una zona donde el nivel del agua es en promedio 15 m.

$$B = 0.92(15\text{m})$$

$$B = 14 \text{ m}$$

-Altura de la cámara

$$H_a = 3(14\text{m}) = 42 \text{ m}$$

-Altura de la pared frontal sumergida

$$D = 0.4(15\text{m})$$

$$D = 6 \text{ m}$$

-Longitud de apertura

$$H_o = 0.7(15m)$$

$$H_o = 11 \text{ m}$$

-Ángulo de inclinación

Se ha escogido un ángulo de posición de la cámara rectangular de 45° porque en la literatura se han reportado resultados positivos con mejoras en la eficiencia en las cámaras que tienen este ángulo de inclinación.

APÉNDICE B. Resultados del diseño 3D de las cámaras

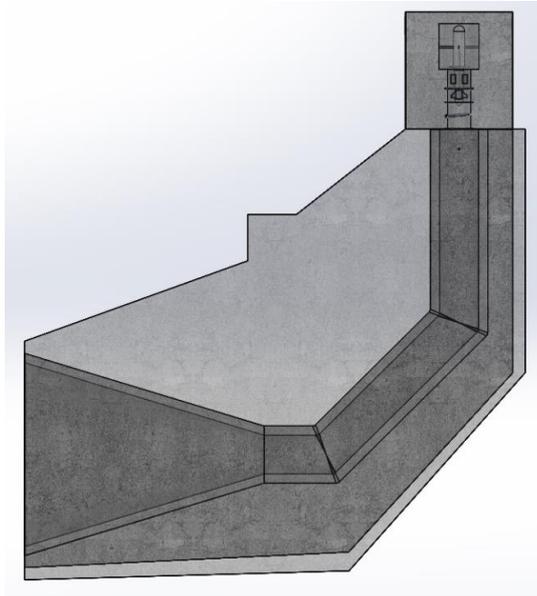


Figura B.1 Vista lateral de la cámara cilíndrica modelada en AutoCAD y generada como sólido tridimensional en SolidWorks; consiste en dos secciones: la sección cónica conduce el fluido de las olas en el ingreso y la sección circular conecta la cámara de aire con la sección de la turbina a través de un ducto

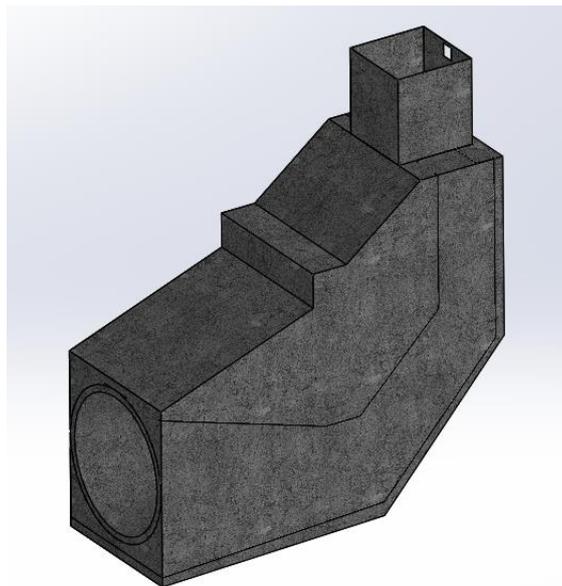


Figura B.2 Vista isométrica de la cámara cilíndrica modelada en AutoCAD generada como sólido tridimensional en SolidWorks. La superficie está recubierta con hormigón reforzado para soportar las variaciones climáticas

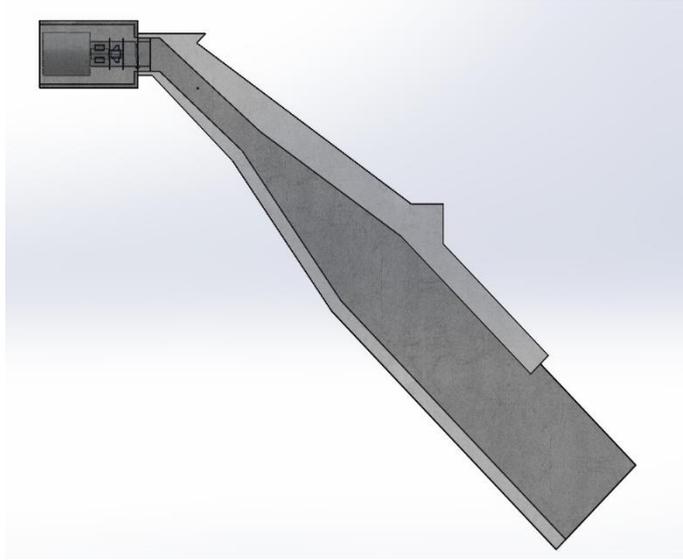


Figura B.3 Vista lateral de la cámara rectangular modelada en AutoCAD, generada como un sólido tridimensional en SolidWorks. La geometría tiene una reducción de sección transversal a lo largo de la cámara

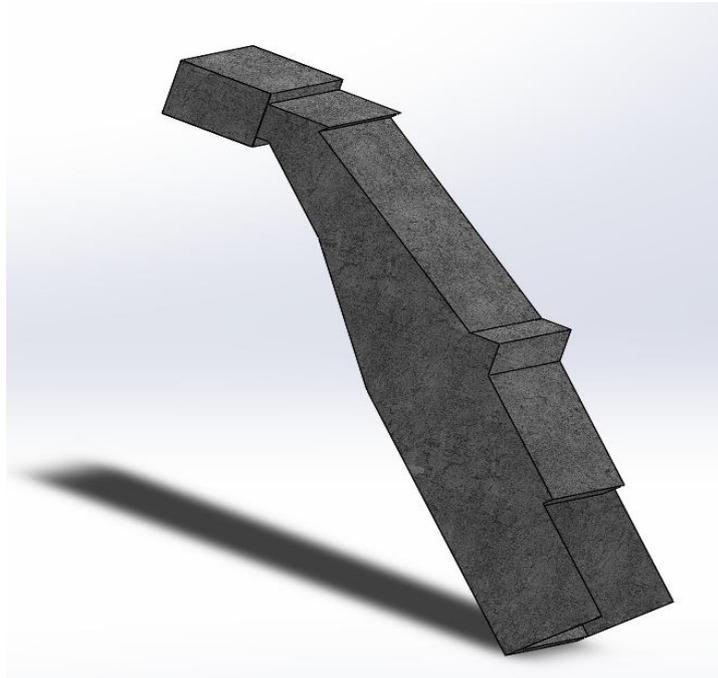


Figura B.4 Vista isométrica de la cámara rectangular. Tiene una estructura de hormigón que protege la cámara de 45° de inclinación, en la sección del ducto superior se ajusta la inclinación a 55° y se conecta con la turbina Wells

APÉNDICE C. Cálculos de las alturas de la columna de agua oscilante

Cámara cilíndrica

$$H = \frac{1 \cdot \pi \cdot 10.45^2 \text{ m}^2}{\pi \cdot 3.25^2 \text{ m}^2} \left(1 + \frac{21\text{m}}{\lambda}\right) \cdot 0.87$$

$$H = 8.99 \left(1 + \frac{21\text{m}}{\lambda}\right) [\text{m}]$$

Cámara rectangular

$$H = \frac{1 \cdot (14 \cdot 14.3 + 14 \cdot 11) \text{ m}^2}{14 \cdot 2.6 \text{ m}^2} \left(1 + \frac{15 \text{ m}}{\lambda}\right) \cdot 0.87$$

$$H = 8.47 \left(1 + \frac{15\text{m}}{\lambda}\right) [\text{m}]$$

APÉNDICE D. Gráficas del factor K y longitud de ola en función de T

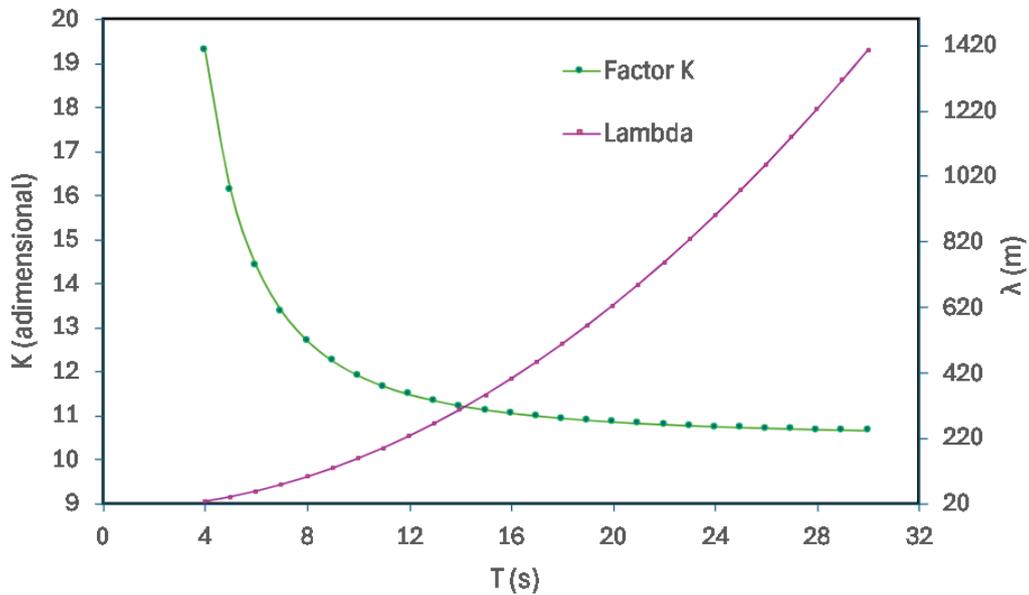


Figura D.1 Curva del Factor K (eje izquierdo) y la longitud de onda en función del periodo T (eje derecho) para la cámara cilíndrica. T fue evaluado desde 4s a 30 s y como resultado se obtuvo un comportamiento exponencial para K y polinomial para lambda

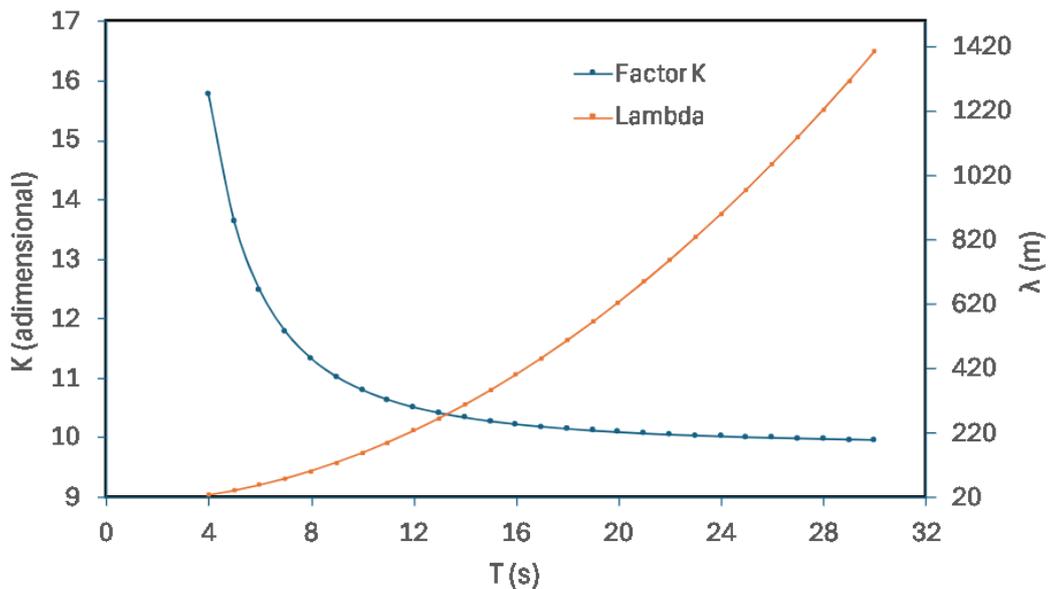


Figura D.2 Curva del Factor K (eje izquierdo) y la longitud de onda en función del periodo T (eje derecho) para la cámara rectangular. T fue evaluado desde 4s a 30s y como resultado se obtuvo un comportamiento exponencial para K y polinomial para lambda

APÉNDICE E. Resultados de las simulaciones

Cámara Cilíndrica

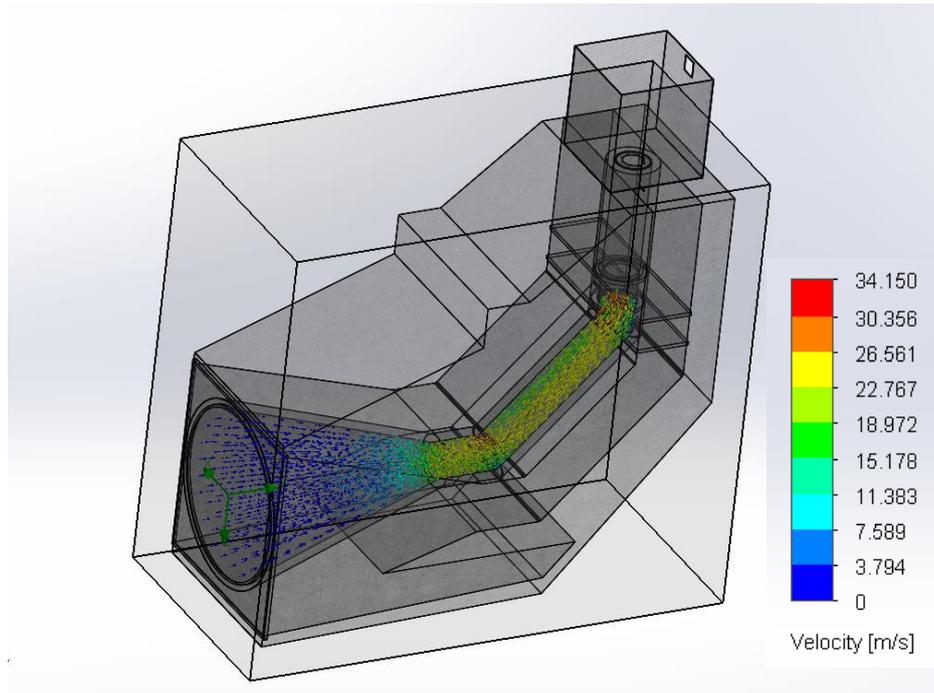


Figura E.1 Análisis computacional del comportamiento del agua en el interior de la cámara cuando la altura de la columna de agua llega a alcanzar 10 m

En la parte derecha se observa una escala de colores que indica la magnitud de los vectores de velocidad en m/s del agua que recorre la cámara. La velocidad del agua entra a un 1 m/s y llega a la interfase agua-aire a aproximadamente 24 m/s, además, considerando un aumento de velocidad donde se reduce la sección de la tobera hacia el ducto de sección cilíndrica constante donde la velocidad se mantiene constante en aproximadamente 22 m/s.

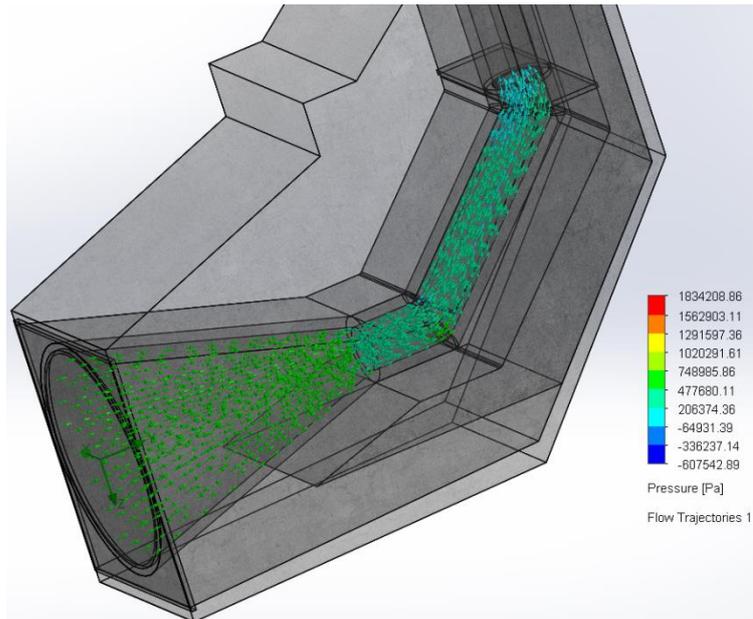


Figura E.2 Análisis computacional del comportamiento del agua en el interior de la cámara cuando la altura de la columna de agua llega a alcanzar 10 m

En la parte derecha se observa una escala de colores que indica la magnitud de la presión en Pa de los vectores de la columna de agua que recorren la cámara llegando a la interfase con un valor de aproximadamente -64931.39 Pa, debido al efecto de la contrapresión de la cámara neumática.

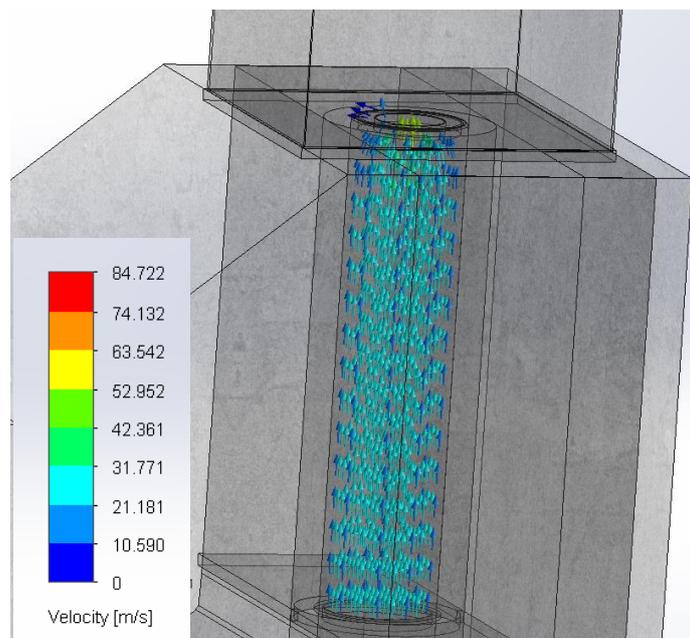


Figura E.3 Análisis computacional del comportamiento del aire en el interior de la cámara cuando la columna de agua llega a 10 m

En la parte izquierda se observa una escala de colores que indica la magnitud de la velocidad en m/s de los vectores que recorren la cámara, en el ducto neumático le corresponde un valor de 21 m/s aproximadamente.

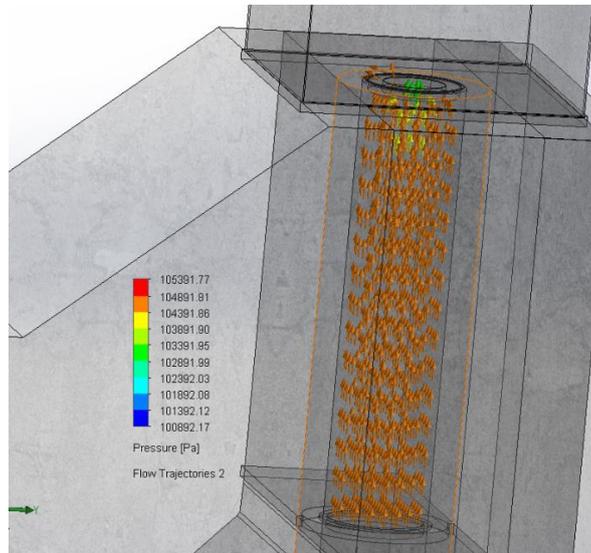


Figura E.4 Análisis computacional del comportamiento del aire en el interior de la cámara cuando la altura de la columna de agua llega a alcanzar 10 m

En la parte izquierda se observa una escala de colores que indica la magnitud de la presión de los vectores que recorren la cámara, para este caso corresponde a 104891 Pa en la mayor parte del ducto de aire.

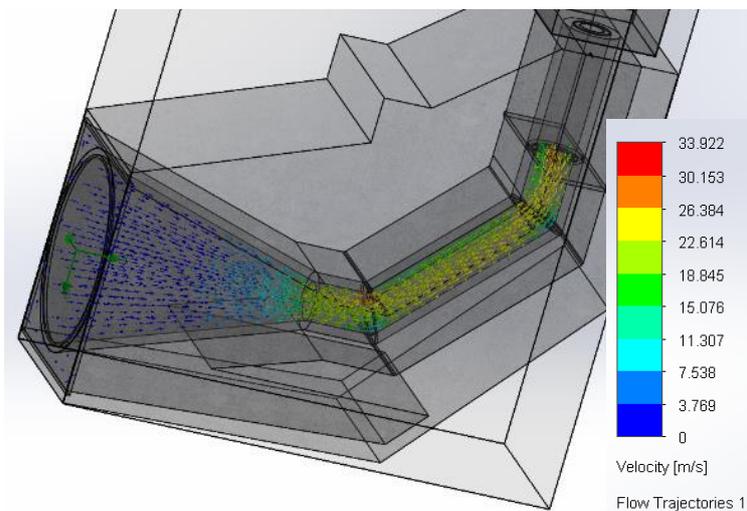


Figura E.5 Análisis computacional del comportamiento del agua en el interior de la cámara cuando la altura de la columna de agua llega a alcanzar 17 m

En la parte derecha se observa una escala de colores que indica la magnitud de la velocidad en m/s, para esta condición de altura, los vectores recorren la cámara cilíndrica a 24 m/s, y en el cambio de sección hacia el ducto neumático la velocidad aumenta a 26 m/s y se mantiene relativamente constante.

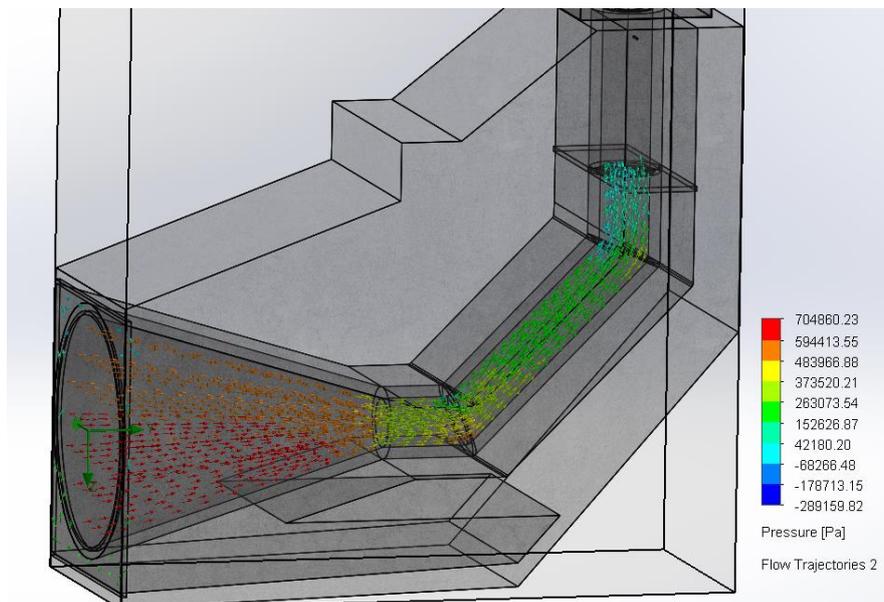


Figura E.6 Análisis computacional del comportamiento del agua en el interior de la cámara cuando la altura de la columna de agua llega a alcanzar 17 m

En la parte derecha se observa una escala de colores que indica la magnitud de la presión en Pa de los vectores que recorren la cámara, ingresando por la tobera con alta presión de 704860 Pa y reduciendo este valor en el ducto de sección constante, llegando a la interfase agua-aire con un valor de 42180 Pa aproximadamente.

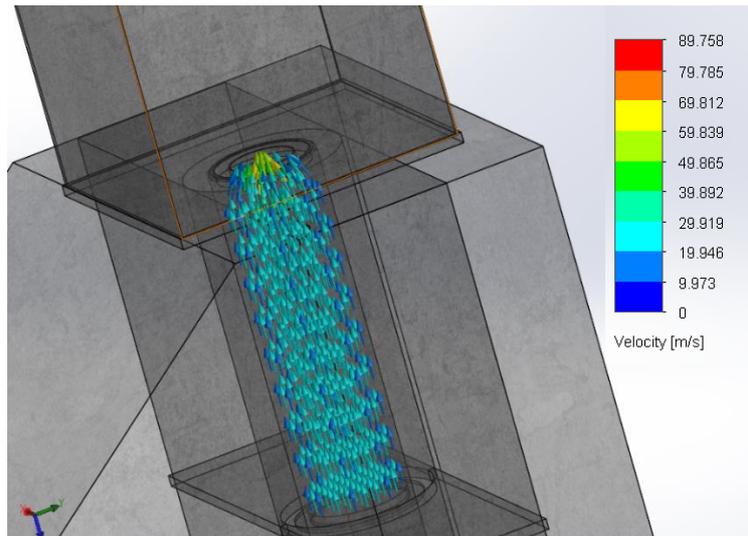


Figura E.7 Análisis computacional del comportamiento del aire en el interior de la cámara cuando la columna de agua llega a 17 m

En la parte derecha se observa una escala de colores que indica la magnitud de los vectores de velocidad en m/s del agua que recorre la cámara. La velocidad del agua en el ducto de aire es 19.94 m/s y, en la reducción de sección, aumenta a 23 m/s.

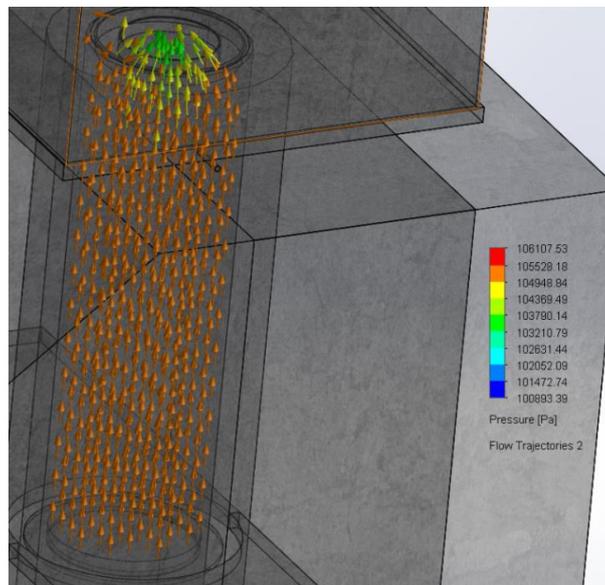


Figura E.8 Análisis computacional del comportamiento del aire en el interior de la cámara cuando la altura de la columna de agua llega a alcanzar 17 m

En la parte derecha se observa una escala de colores que indica la magnitud de la presión en Pa de los vectores que recorren la cámara, ingresando por la interfase agua-aire a presión constante de 105528 Pa hasta la sección donde se une el ducto con la turbina y el valor decrece a 104369 Pa aproximadamente.

Cámara rectangular

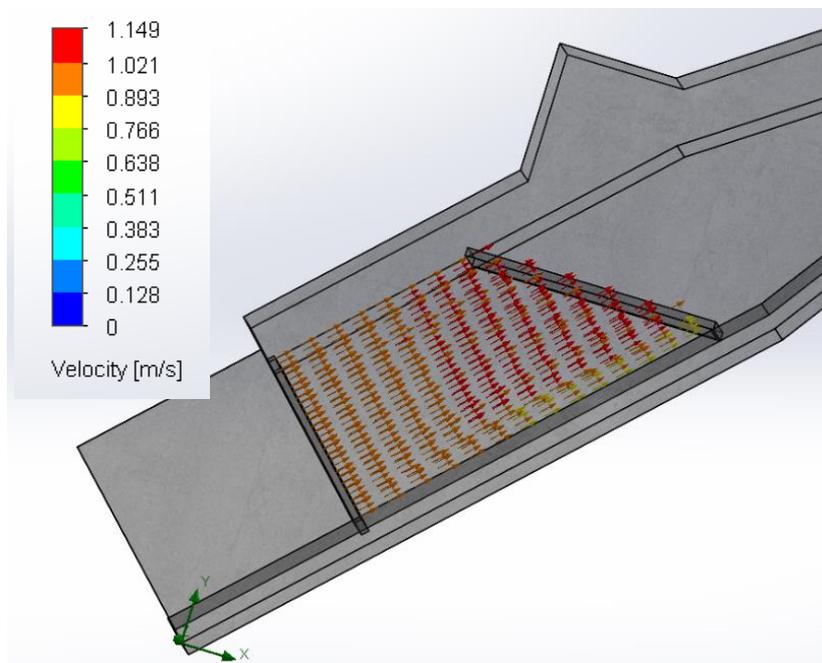


Figura E.9 Análisis computacional del comportamiento del agua en el interior de la cámara cuando la altura de la columna de agua llega a alcanzar 9 m

En el lado izquierdo se observa una escala de colores que indica la magnitud de la velocidad en m/s de los vectores que recorren la cámara desde su ingreso a 1 m/s hasta la interfase agua-aire llegando a 1.15 m/s.

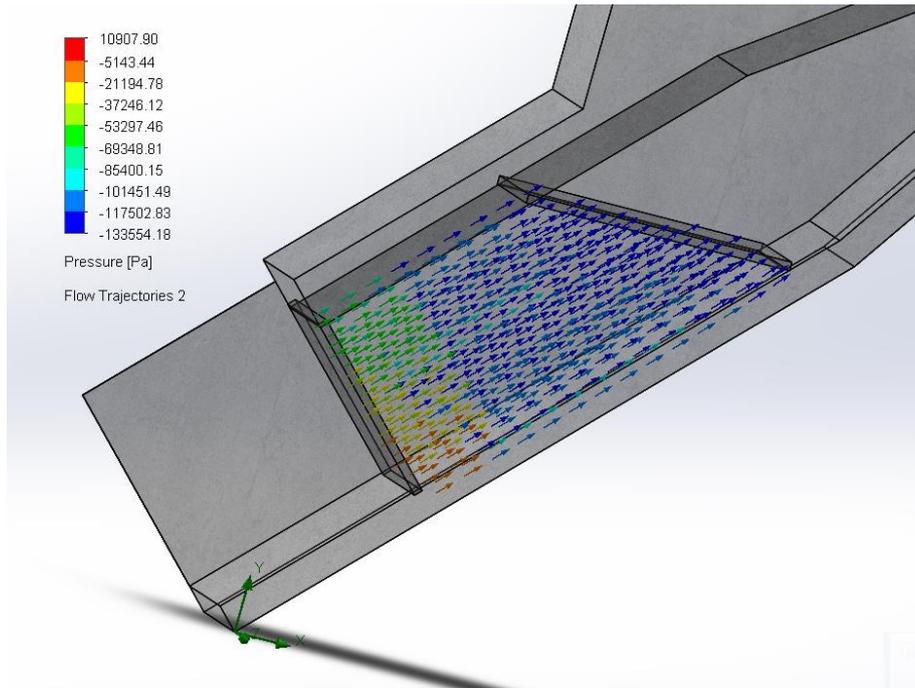


Figura E.10 Análisis computacional del comportamiento del agua en el interior de la cámara cuando la altura de la columna de agua llega a alcanzar 9 m

En la parte superior izquierda se observa una escala de colores que indica la magnitud de la presión en Pa de los vectores que recorren la cámara, con una presión variable al ingreso de la cámara entre -37246 Pa y -21194 Pa, y llegando a la interfase agua-aire con un valor estable de -133554 Pa.

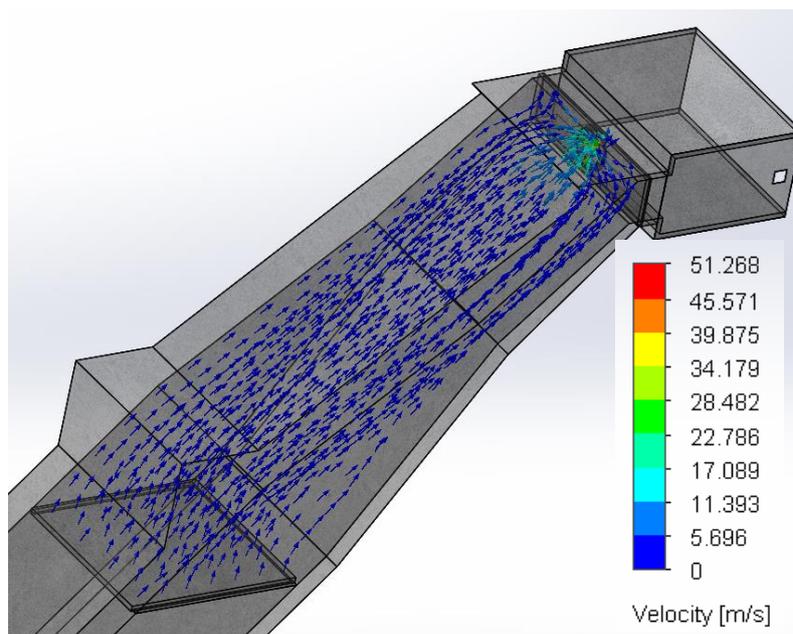


Figura E.11 Análisis computacional del comportamiento del aire en el interior de la cámara cuando la columna de agua llega a 9 m

En la parte derecha se observa una escala de colores que indica la magnitud de los vectores de velocidad en m/s del agua que recorre la cámara. La velocidad del agua llega a la interfase agua-aire a aproximadamente 5.69 m/s, la cual se mantiene constante hasta llegar a la conexión con la turbina logrando aumentar a 11 m/s.

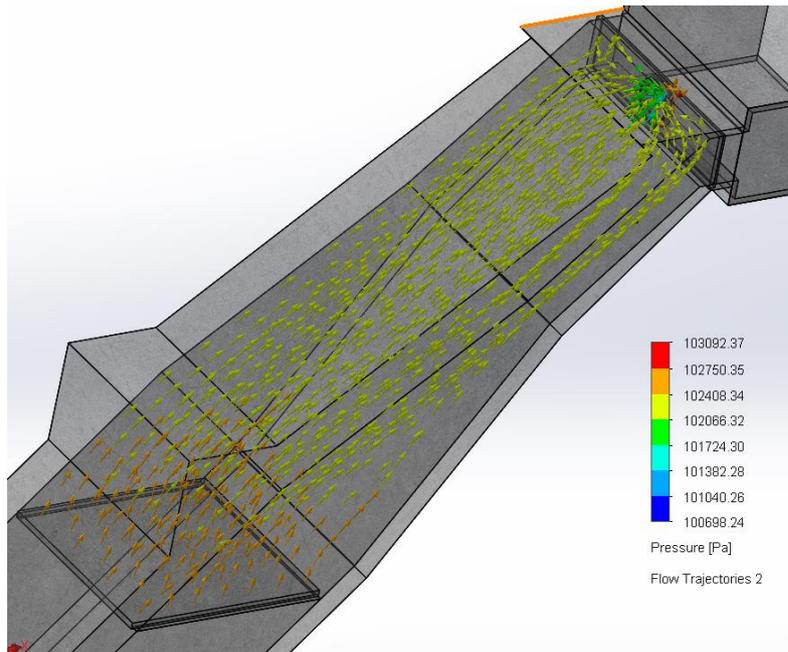


Figura E.12 Análisis computacional del comportamiento del aire en el interior de la cámara cuando la columna de agua llega a 9 m

En la parte derecha se observa una escala de colores que indica la magnitud de la presión en Pa de los vectores que recorren la cámara de aire ingresan a 102750 Pa y reduciendo este valor en el ducto rectangular, llegando a la conexión con la turbina a una presión de 102066 Pa aproximadamente.

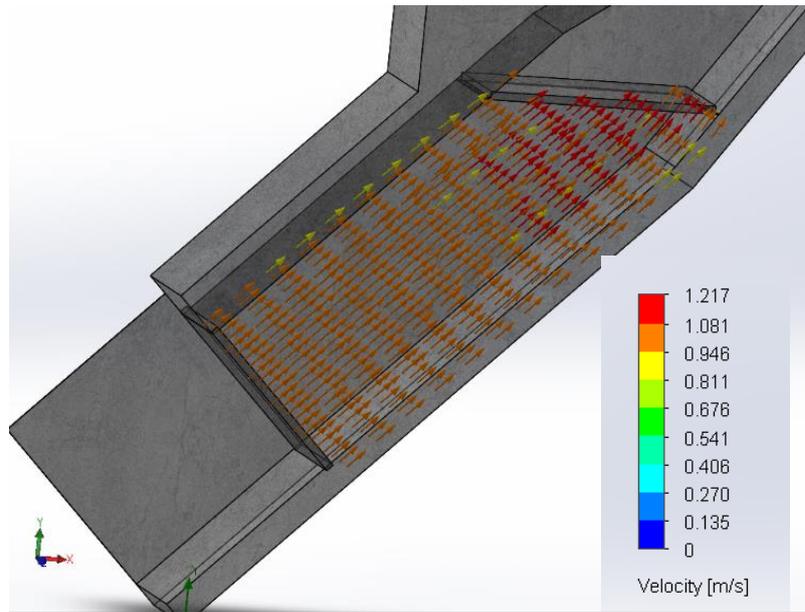


Figura E.13 Análisis computacional del comportamiento del agua en el interior de la cámara cuando la altura de la columna de agua llega a alcanzar 14 m

En la parte derecha se observa una escala de colores que indica la magnitud de los vectores de velocidad en m/s del agua que recorre la cámara. La velocidad del agua entra a un 1 m/s y llega a la interfase agua-aire a aproximadamente 1.21 m/s.

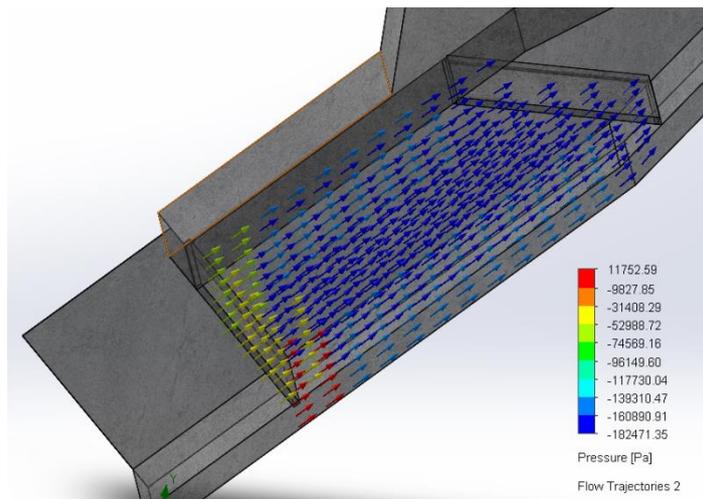


Figura E.14 Análisis computacional del comportamiento del agua en el interior de la cámara cuando la altura de la columna de agua llega a alcanzar 14 m

En la parte superior izquierda se observa una escala de colores que indica la magnitud de la presión en Pa de los vectores que recorren la cámara, con una presión variable al ingreso de la cámara entre -31408 Pa y reduciendo este valor, llegando a la interfase agua aire con un valor estable de -182471 Pa.

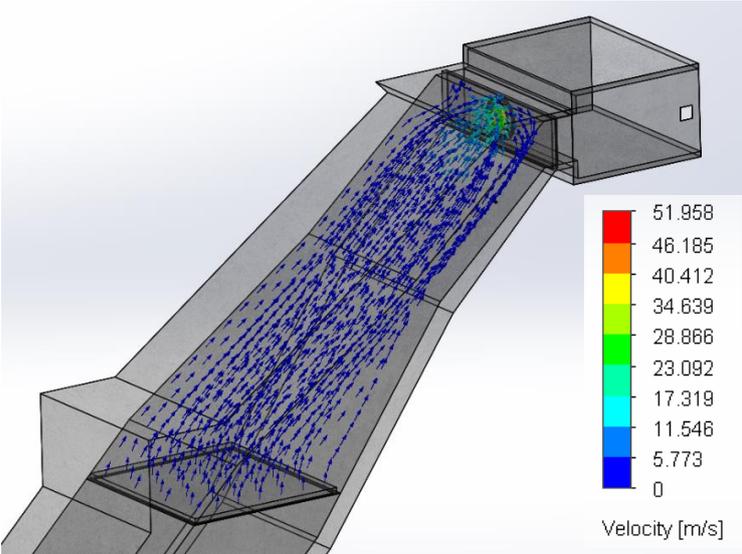


Figura E.15 Análisis computacional del comportamiento del aire en el interior de la cámara cuando la columna de agua llega a 14 m

En la parte derecha se observa una escala de colores que indica la magnitud de los vectores de velocidad en m/s del agua que recorre la cámara. La velocidad del agua llega a la interfase agua-aire a aproximadamente 5.77 m/s, la cual se mantiene constante hasta llegar a la conexión con la turbina logrando aumentar a 12 m/s.

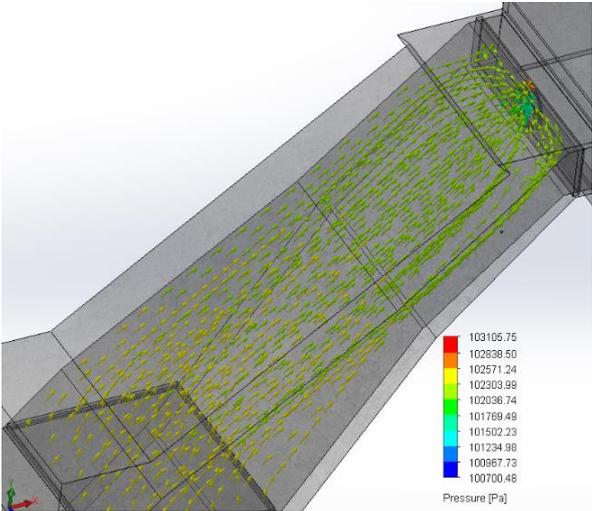


Figura E.16 Análisis computacional del comportamiento del agua en el interior de la cámara cuando la columna de agua llega a 14 m

En la parte derecha se observa una escala de colores que indica la magnitud de la presión en Pa de los vectores que recorren la cámara de aire ingresan desde la interfase agua-aire 102571 Pa y reduciendo este valor en el ducto rectangular, llegando a la conexión con la turbina a una presión de 102036 Pa aproximadamente.

APÉNDICE F. Costos de implementación de las cámaras

Materiales

El análisis de costos se realizó considerando la literatura estudiada, los materiales relevantes de cada dispositivo son: hormigón reforzado de baja permeabilidad, acero galvanizado en barra y en láminas, y perfiles de aluminio; sus cantidades de consumo son tomadas del volumen de la estructura.

Los costos de fabricación e implementación se realizaron a partir de las investigaciones de proyectos de gran magnitud y los valores fueron obtenidos del Boletín No. 287 de IPCO, Índices de Precios de Materiales, Equipos y Maquinarias de la construcción, INEC [29].

-Costo estimado del hormigón reforzado por metro cúbico en Ecuador según el IPCO: 225 USD

Se seleccionó un concreto de baja permeabilidad de la línea de Concretos premezclados Ultra Series [30] de la marca Holcim que debido a sus características técnicas proporcionan la confiabilidad de construcciones en entornos agresivos, además, cubre las normas de calidad de las estructuras NEC2015 SE-HM. Para la estimación de costos se tomó en cuenta que cada vehículo mixer de concreto tiene una capacidad de 8 m³, que la planta de concreto más cercana a la provincia de Santa Elena es en la ciudad de Manta, y que el valor de cada viaje interprovincial es de aproximadamente \$2000 en el caso de preparaciones especiales, valor que está dentro del rango establecido por el IPCO [29].

El volumen correspondiente a cada cámara se obtiene de las características del modelo en SolidWorks. Por ejemplo, para la cámara rectangular el volumen es 3970.83 m³

Se necesita identificar cuántos viajes de material se requieren:

$$3970.83\text{m}^3 \cdot \frac{1 \text{ viaje de hormigón}}{8 \text{ m}^3} = 496.25 \approx 497 \text{ viajes}$$

Costo final por el material y su traslado:

$$497 \text{ viajes} \cdot \frac{2200 \text{ USD}}{1 \text{ viaje de mixer}} = 1,093,400 \text{ USD}$$

Tabla F.1 Costo del material para la construcción de cada cámara

Costos de hormigón	Alternativa 1: Cámara cilíndrica	Alternativa 2: Cámara cilíndrica inclinada	Alternativa 3: Cámara rectangular
Metros cúbicos de hormigón	7902.81	7692.34	3970.83
Cantidad de viajes de mixer	987.85	961.54	496.35
Costo por material y traslado (USD)	\$2,173,600.00	\$2,050,400.00	\$1,093,400.00

-Costo estimado del acero inoxidable por lámina de 1.22 x 2.44 m² en Ecuador: 205 USD

Este tipo de acero es usado en las piezas de la turbina como las cubiertas de los redireccionadores y la válvula de paso. Las cantidades de material se obtienen de las propiedades físicas de las piezas en SolidWorks.

Para las cubiertas de los redireccionadores se necesita 23.57 m² lo que equivale a:

$$23.57 \text{ m}^2 \cdot \frac{1 \text{ plancha}}{1.22 \times 2.44 \text{ m}^2} = 7.91 \approx 8 \text{ planchas}$$

Lo cual se considera como 8 planchas de acero inoxidable, ahora estimando el costo de las planchas:

$$8 \text{ planchas} \cdot \frac{205 \text{ USD}}{1 \text{ plancha}} = 1640 \text{ USD}$$

Tabla F.2 Estimación de costos para las cubiertas de la sección de la turbina

Elementos para acero inoxidable	Cantidad de material en	Cantidad de planchas	Cantidad de planchas considerando desperdicio
Cubierta de redireccionador 1	23.57	7.92	8
Cubierta de redireccionador 2	18.47	6.20	7
Cubierta de válvula de paso	30.55	10.26	11
Total			26

-Costo de acero en barra de 6m de largo: 258 USD

El eje principal es de aproximadamente 15 m de largo, por lo que se consideran 3 barras de acero, tomando en cuenta la mayor longitud entre la cámara neumática y la conexión con el generador de las 3 alternativas; que se debe ensamblar las turbinas, redireccionadores y válvula, considerando el costo de los servicios por mecanizado de eje, se realizan los siguientes cálculos.

$$15 \text{ m} \cdot \frac{1 \text{ barra de acero}}{6 \text{ m}} = 2.5 \text{ barras} \approx 3 \text{ barras}$$

$$3 \text{ barras} \cdot \frac{258 \text{ USD}}{1 \text{ barra}} = 774 \text{ USD}$$

-Costo de planchas de acero inoxidable de mayor espesor: 290 USD

En el caso de la turbina Wells se considera planchas de acero inoxidable de mayor espesor para la estructura y los álabes, aluminio para los refuerzos y carcasa, recubrimientos anticorrosivos, sumando los sistemas de cojinetes, y la mecanización que requiere la turbina. Se consideran 2 piezas según el plano de la Turbina Wells.

-Costo del generador eléctrico

Para el generador eléctrico que se encarga de recibir la energía mecánica y transformarla en energía eléctrica, se toma en consideración la mayor potencia de

salida entre las 3 alternativas: 12690.9 W, aplicando un factor de seguridad de 1.5 para el sistema y aproximando a la potencia de generadores comerciales en el mercado.

$$P = 1.5 * 12690.9 = 19035.06 \text{ W}$$

Potencia aproximada: 20000 W

En el mercado nacional se encontró un generador que cubre la necesidad de los 20000 W por un valor de 3754 USD.

Tabla F.3 Costo total de la sección de la turbina

Elementos de la turbina Wells y generación eléctrica	Cantidades de material	Costo de material	Costo total
Planchas para cubiertas	26	205	5330
Generador	1	3754	3754
Eje principal	3	258	774
Eje de redireccionadores	1	258	258
Sistema de conexión eléctrica	3	200	600
Turbina Well	2	290	580
Válvula de paso	1	145	145
Manivela	1	100	100
Total			\$ 11,541

Con los resultados de esta tabla se hace la respectiva suma a los costos de materiales de cada alternativa para hacer los cálculos de los honorarios profesionales.

Tabla F.4 Costos de los materiales y las piezas que conforman cada alternativa

Costos	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Costos de materiales de OWC	2,173,600.00	2,050,400.00	1,093,400.00
Costos de turbina y generación eléctrica	11,541.00	11,541.00	11,541.00
Total	\$ 2,185,141.00	\$ 2,061,941.00	\$ 1,104,941.00

-Honorarios por servicios

Se toma en consideración para los servicios profesionales: los trabajos de diseño y modelado, implementación, consultaría ambiental, gestión y logística, supervisión y capacitación técnica para el personal que opere y brinde mantenimiento a este sistema. Los valores referenciales son tomados del “Reglamento de Aranceles Profesionales de Ecuador” [31]. Las alternativas 1 y 2 se ubican en la fracción de 11,50,001 hasta 2,300,000 con honorarios de 18400 USD, con los respectivos porcentajes por la fracción excedente. Mientras que para la alternativa 3, los honorarios entran en el rango 5 por la fracción básica: 580,001-1,150,000 USD que corresponde a honorarios de 9570 USD, como lo indica la Figura F.1.

Costo de la obra en dólares		Honorario sobre la fracción básica. Dólares	Honorario sobre la fracción excedente. %
Fracción básica	Exceso hasta		
0	70.000	0	1,80
70.001	140.000	1.260	1,75
140.001	290.000	2.450	1,70
290.001	580.000	4.930	1,65
580.001	1.150.000	9.570	1,60
1.150.001	2.300.000	18.400	1,55
2.300.001	en adelante	35.650	1,50

Figura F.1 Honorarios por servicios profesionales [31]

Tabla F.5 Costos de los honorarios profesionales

Servicios profesionales	Porcentaje de honorario por servicios	Honorario sobre la fracción básica y el excedente		
		Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Estudios preliminares	15%	4278	4278	2297
Anteproyecto	30%	8556	8556	4594
Presupuesto	10%	2852	2852	1531
Proyecto definitivo	20%	5704	5704	3062
Diseño y	5%	1426	1426	766

modelado				
Dirección de construcción	5%	1426	1426	766
Construcción	6%	1711	1711	919
Consultoría ambiental	2%	570	570	306
Fiscalización	4%	1141	1141	612
Capacitación técnica	3%	856	856	459
Total		\$28,520	\$28,520	\$15,312

Se obtiene la Tabla F.6 que resume los costos de materiales, turbina y generación eléctrica, incluyendo además los honorarios por servicios profesionales del proyecto.

Tabla F.6 Listado de precios de materiales, partes y servicios de cada alternativa

	Alternativa 1	Alternativa 2	Alternativa 3
Costos de materiales totales	2,185.14	2,061.94	1,104.94
Costos de honorarios por servicios profesionales	28,520	28,520	15,312
Costos totales	\$2,213,661.00	\$2,090,461.00	\$1,120,253.00

De la Tabla F.6 se puede identificar que la mejor opción en cuanto a gastos administrativos y de construcción es la alternativa 3, seguida por la alternativa 2 con una diferencia de \$970,208.

APÉNDICE G. Análisis del impacto ambiental

Los dispositivos de conversión de energía undimotriz provocan menos degradación ambiental que otras alternativas de generación de energía, en términos de contaminación atmosférica. Sin embargo, la implementación de dispositivos OWC puede provocar impactos negativos en la morfología costera y en el ecosistema marino, tal como se muestra en la Tabla 12, donde se expone de forma cuantitativa el impacto en distintas categorías por kWh de generación.

A diferencia de las otras cámaras, la cámara rectangular ocupa más superficie de tierra, lo que se traduce en un mayor grado de deforestación de la flora endémica y desplazamiento de la fauna. Además, la disposición horizontal de la sección que contiene la turbina, así como, su cercanía al suelo puede provocar que el ruido del movimiento de los sistemas mecánicos afecte a los animales sensibles a las vibraciones y frecuencias sonoras. De las 3 opciones propuestas, la cámara rectangular tiene un mayor impacto negativo en el ecosistema marino.

Tabla G.1 Resultados del análisis del ciclo de vida y cálculo de la demanda acumulativa de energía en el Pelamis Converter Device. Obtenida de Thomson R. [32]

Categoría	Cantidad por cada kWh
Cambio climático	35 g CO_2 eq/kWh
Agotamiento de la capa de ozono	3.7 ug CFC-11 eq/kWh
Formación de oxidantes fotoquímicos	325 mg NMVOC eq/kWh
Radiación ionizante	2.4 Bq 235U eq/kWh
Ocupación de tierras urbanas	393 mm^2 /kWh
Transformación de tierras naturales	8.5 mm^2 /kWh
Agotamiento de metales	26 g Fe eq/kWh
Agotamiento del agua	241 cm^3 /kWh

APÉNDICE H. Análisis de la innovación y flexibilidad del diseño

Los diseños de las cámaras cilíndricas son más innovadores que el de la cámara rectangular con respecto a la forma convencional de la estructura OWC, la cual comúnmente tiene una sección transversal rectangular. En el caso de la cámara cilíndrica se propuso dos ángulos de 45° en vez de un ángulo de 90° para disminuir las pérdidas energéticas. Para la cámara cilíndrica inclinada se propuso un ángulo de inclinación y una reducción de la sección circular a lo largo de la geometría, características que hacen de estos diseños, soluciones innovadoras.

En cuanto a la flexibilidad, todas las cámaras pueden ser mejoradas sin necesidad de una reestructuración completa y adaptadas a nuevas tecnologías y necesidades, sin embargo, la accesibilidad a la sección de la turbina en la cámara rectangular es más fácil, respecto a los otros diseños, por su geometría y su cercanía a tierra, lo cual permite que los costos y el tiempo de las modificaciones sean menores.

APÉNDICE I. Viabilidad técnica

La cámara cilíndrica tiene 2 codos de 45° que provocan pérdidas energéticas debido a las cavidades y redondeos en el perfil inferior. Además, la sección transversal de la cámara de aire es mayor que la sección de entrada a la turbina, lo que causa choques de aire contra la pared inferior y por ende desperdicios de energía. Por otro lado, la entrada de la cámara es ideal para condiciones de oleaje extremos donde las olas alcancen alturas mayores a la altura promedio, es decir, que superen los 1,5 metros. La entrada en forma de tobera permite que el área transversal disminuya poco a poco de tal manera que crea un efecto Venturi para que la velocidad vaya aumentando y desplace con más fuerza al aire contenido en la cámara.

La cámara cilíndrica inclinada tiene una abertura en la parte frontal, lo que permite mayor entrada de agua a la cámara y mejor aprovechamiento de los recursos energéticos. Así como la cámara cilíndrica, esta cámara tiene una reducción del diámetro en la parte inferior, lo que permite que el aire se desplace con mayor rapidez, según el principio de la dinámica de fluidos. En la parte superior, la sección transversal de la cámara es similar en tamaño al diámetro de entrada a la sección de la turbina, por tanto, existe un mejor aprovechamiento del aire. La sección circular a lo largo de toda la altura de la cámara contribuye a un flujo de agua y aire uniformes, evitando pérdidas energéticas causadas por esquinas y bordes afilados, a diferencia de las cámaras rectangulares. Además, la disposición inclinada de la cámara facilita la absorción y expulsión del agua, lo que se traduce en menor turbulencia y menores disipaciones energéticas. En una cámara convencional la pared de entrada suele ser vertical, lo que provoca que las partículas de las olas se reflejen en la pared y creen una especie de "ola estática" que, junto con la ola incidente, provoca una disminución en la altura de la ola que impulsa la columna de agua en el interior de la cámara OWC [20].

La cámara rectangular tiene varias esquinas rectas a lo largo de su geometría, las cuales significan pérdidas energéticas en toda la línea transversal de cada esquina, reduciendo la velocidad conforme avanza el fluido en el ducto. Por otro lado, la pared paralela a la salida del aire produce choques entre las partículas del gas lo cual actúa como un contraflujo que afecta al flujo lineal y a la velocidad del aire.

APÉNDICE J. Análisis de la facilidad de mantenimiento

Se considera el nivel de accesibilidad a cada etapa del dispositivo que requiere inspección para realizar mantenimientos, y la durabilidad de materiales que están expuestos a un factor de riesgo que se reduce a considerar la fatiga del oleaje, la acumulación de sedimentos en el sustrato de ingreso de agua a la cámara y la corrosión temprana en puntos de soldadura como en las zonas angulares; dado que son instalaciones nuevas, el enfoque de mantenimiento es en análisis preventivos de limpieza y lubricación en piezas como la turbina y sus conexiones con el generador; y análisis preventivos y predictivos eléctricos con respecto a estas mismas instalaciones. Debido al entorno corrosivo, los mantenimientos deben registrar revisiones periódicas de las estructuras metálicas de la turbina y el generador que permitan identificar el desgaste en los metales usados y en los refuerzos de placas de las cámaras internas. Con estas premisas se extiende el siguiente análisis de cada alternativa:

En la cámara cilíndrica: con la geometría cilíndrica se reducen los puntos de acumulación de residuos lo que agiliza la ejecución de los mantenimientos. No obstante, la accesibilidad al interior de la cámara por el ducto cónico y con áreas reducidas complica el cumplimiento de los mantenimientos.

En la cámara cilíndrica inclinada: los tramos largos de la cámara junto con los codos de esta geometría comprometen el mantenimiento interno de modo que se ajuste a sistemas especializados con herramientas extras por inserción de sedimentos en la parte inferior de ingreso de las olas, en la zona superior de la cámara, las inspecciones se simplifican por la inclinación suave que reduce la acumulación de corrosión.

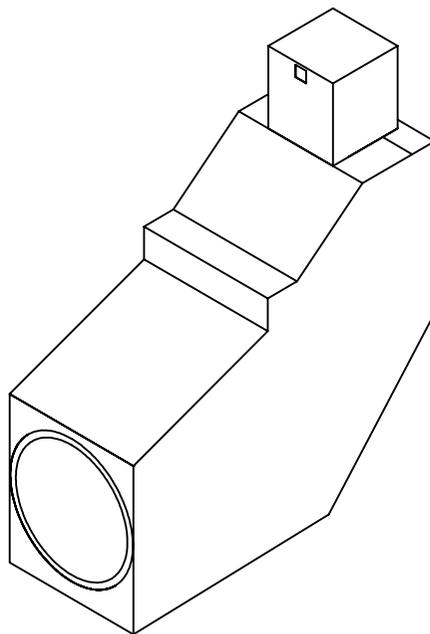
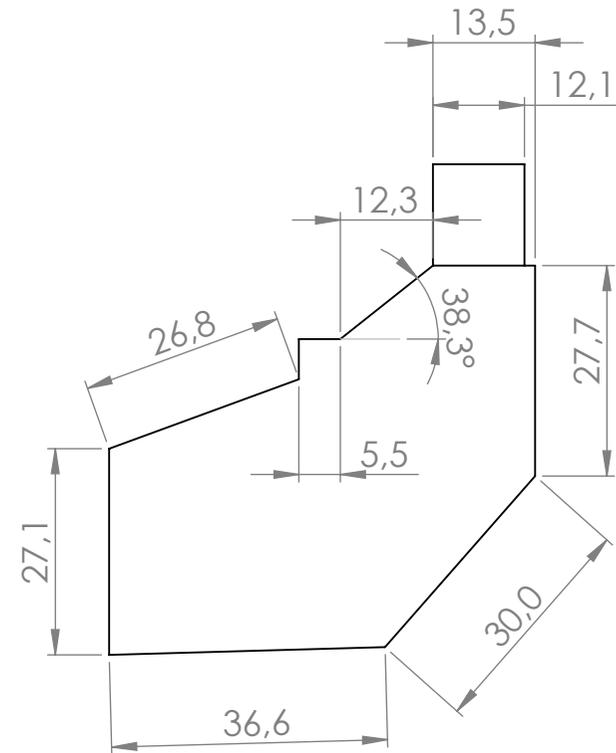
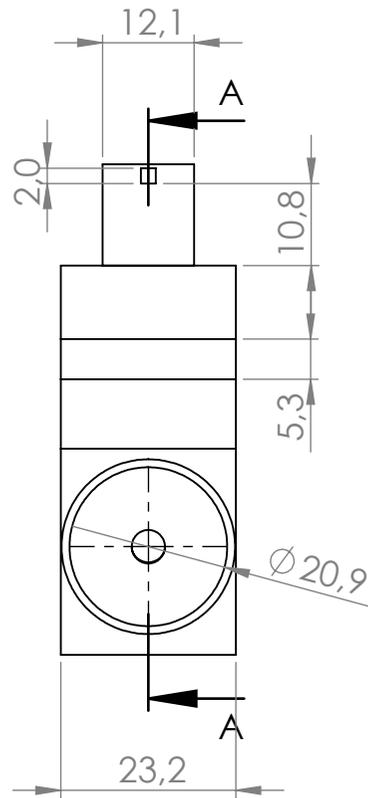
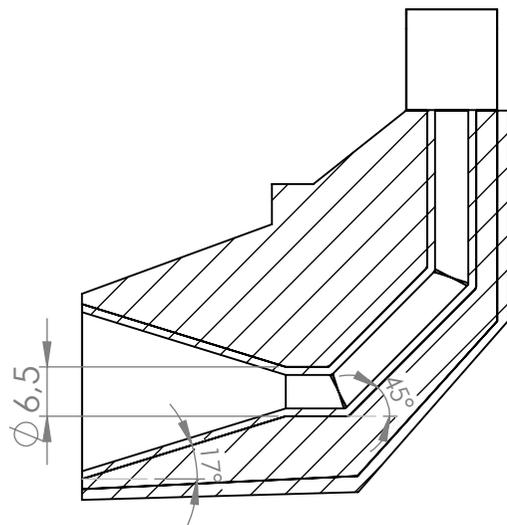
En la cámara rectangular: la geometría rectangular facilita el acceso para la ejecución del mantenimiento preventivo en los ángulos propuestos. Sin embargo, estas mismas juntas angulares conllevan a una acumulación de residuos y corrosión lo que se refleja en una mayor frecuencia de mantenimiento.

APÉNDICE K. Análisis de la adaptabilidad a las condiciones de oleaje

La cámara rectangular y cilíndrica inclinada son las más adaptables a las condiciones del oleaje porque, en el caso de que se desee aumentar o disminuir la entrada, solo bastaría con accionar una pared que se deslice hacia abajo o arriba y el agua entraría uniformemente sin desviaciones innecesarias. Por otro lado, la cámara cilíndrica es menos adaptable a las condiciones de las olas porque, si desea disminuir o aumentar la sección de entrada, sería necesario ubicar una pared frontal, lo que alteraría la uniformidad del flujo y provocaría desviaciones que no contribuyen a una mejor eficiencia del dispositivo.

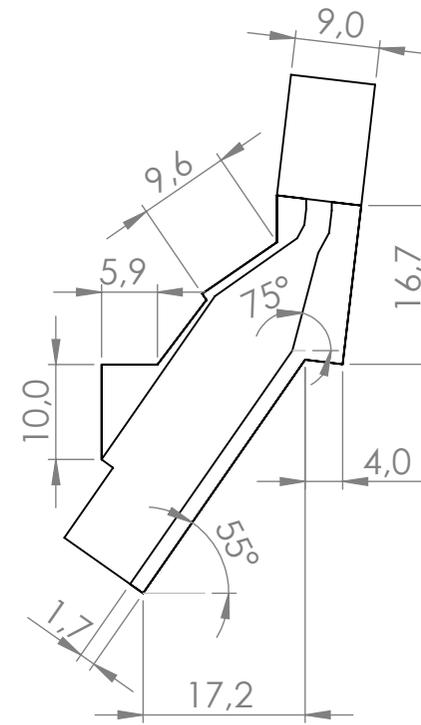
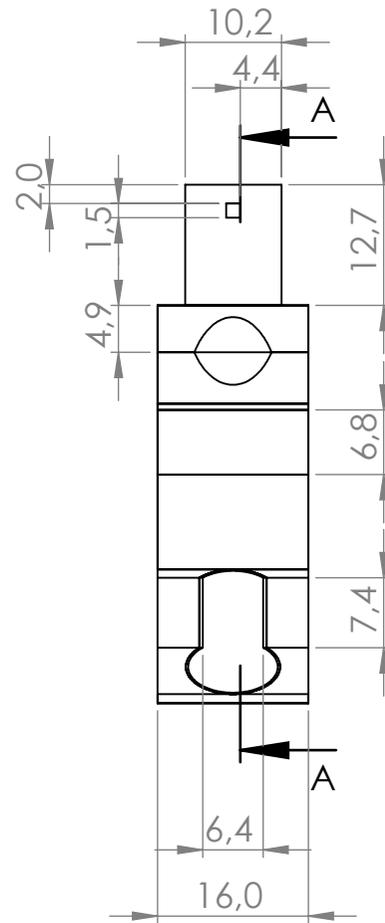
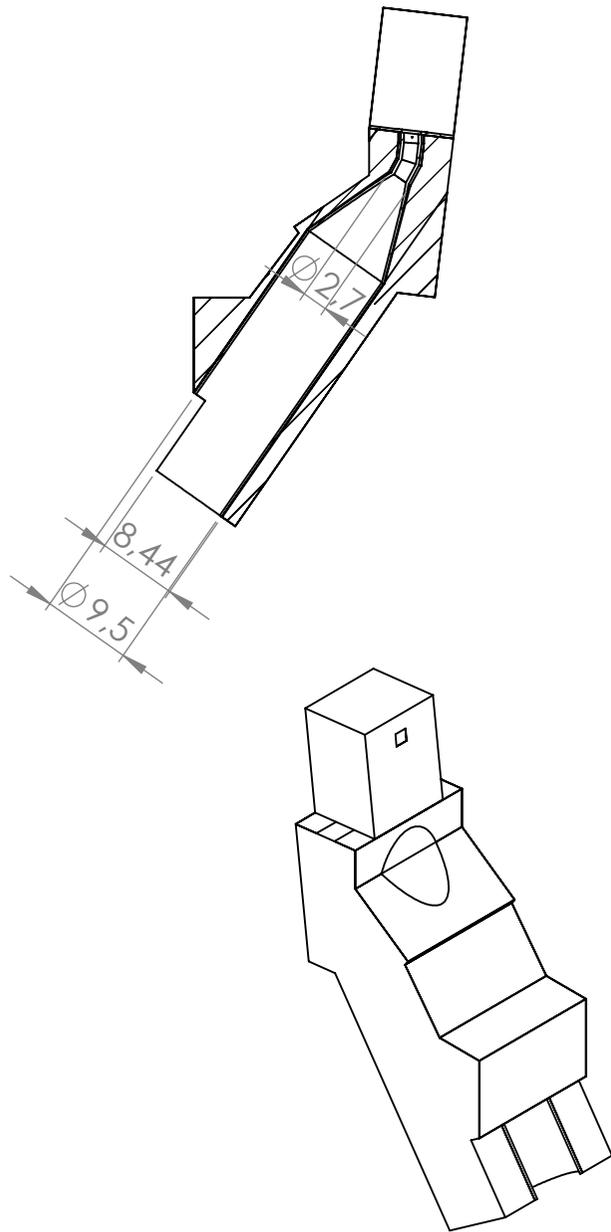
APÉNDICE L. Planos de construcción

SECCIÓN A-A

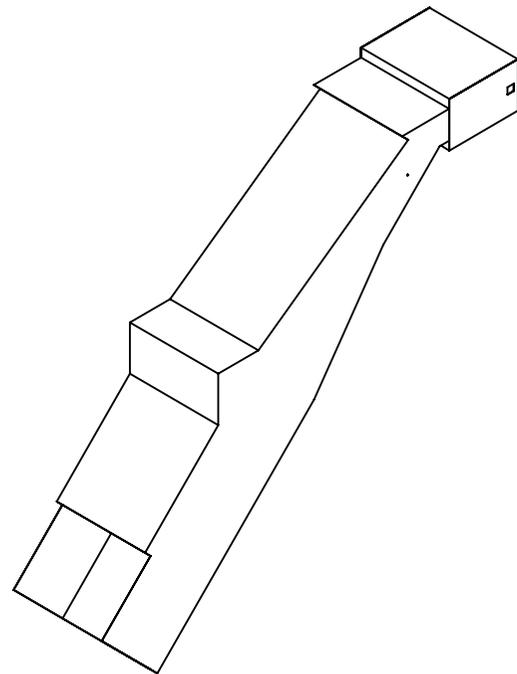
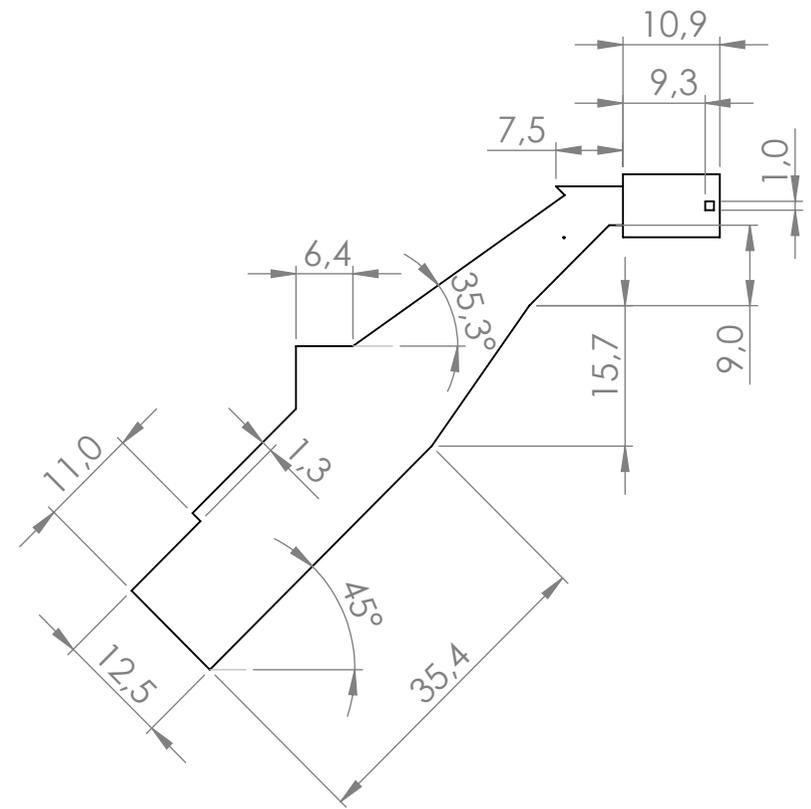
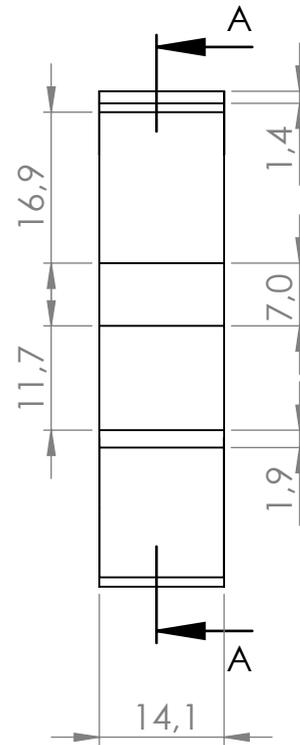
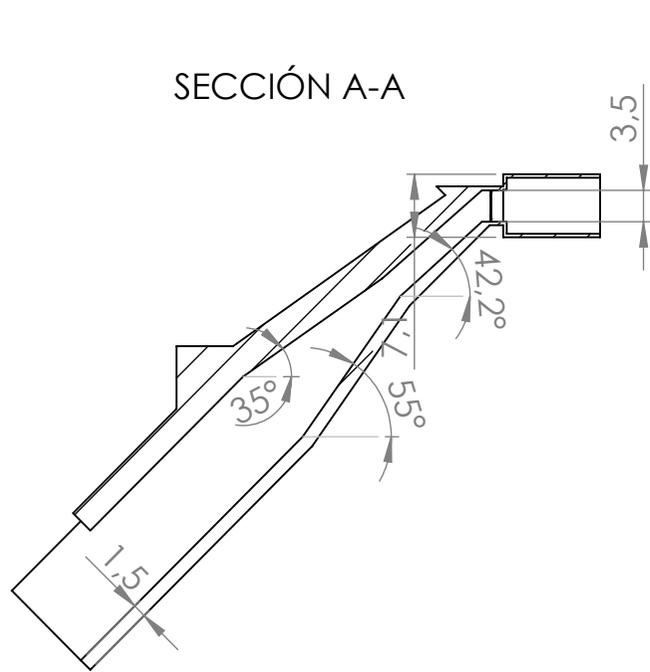


Nombre de la pieza				
Cámara cilíndrica				
Elaborado por	Natalia Velastegui	Fecha	Firma	
		10/11/24	Natalia V.	
Revisado por	Mayken Espinoza	29/11/24	Mayken E.	
		Material	Escala	Unidad
Hormigón	1:1000	m	A4	

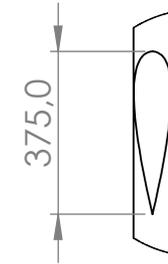
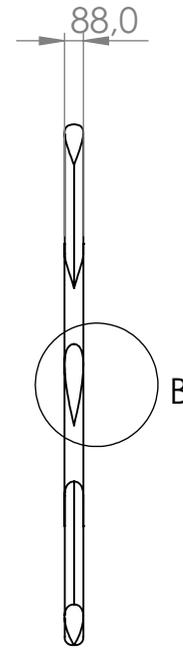
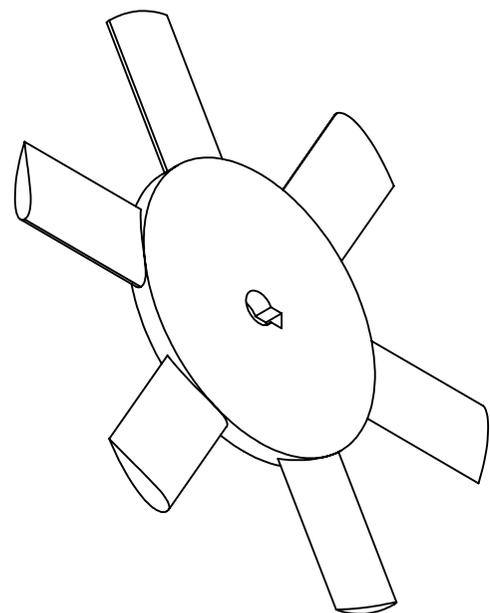
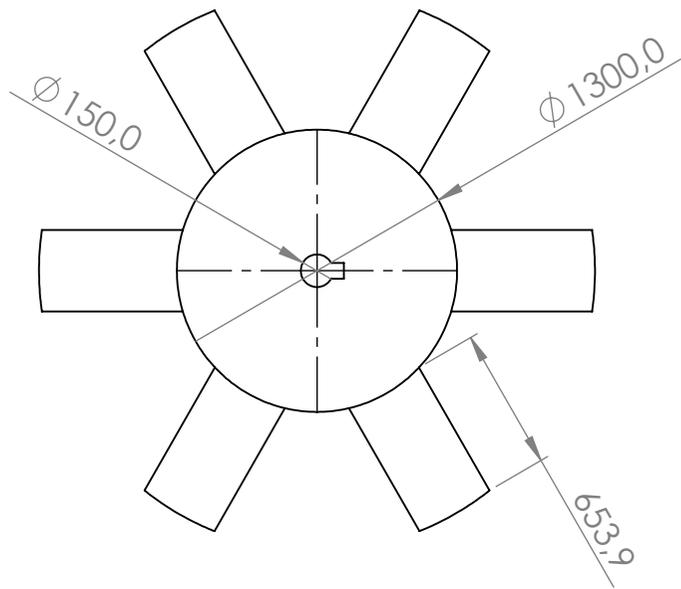
SECCIÓN A-A



Nombre de la pieza				
Cámara cilíndrica inclinada				
Elaborado por	Natalia Velastegui	Fecha	Firma	
		20/11/24	Natalia V.	
Revisado por	Mayken Espinoza	01/12/24	Mayken E.	
		Material	Escala	Unidad
Hormigón	1:800	m	A4	

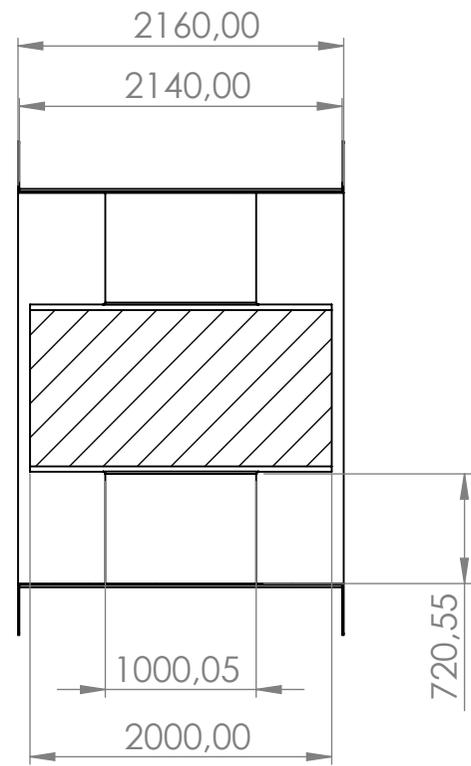
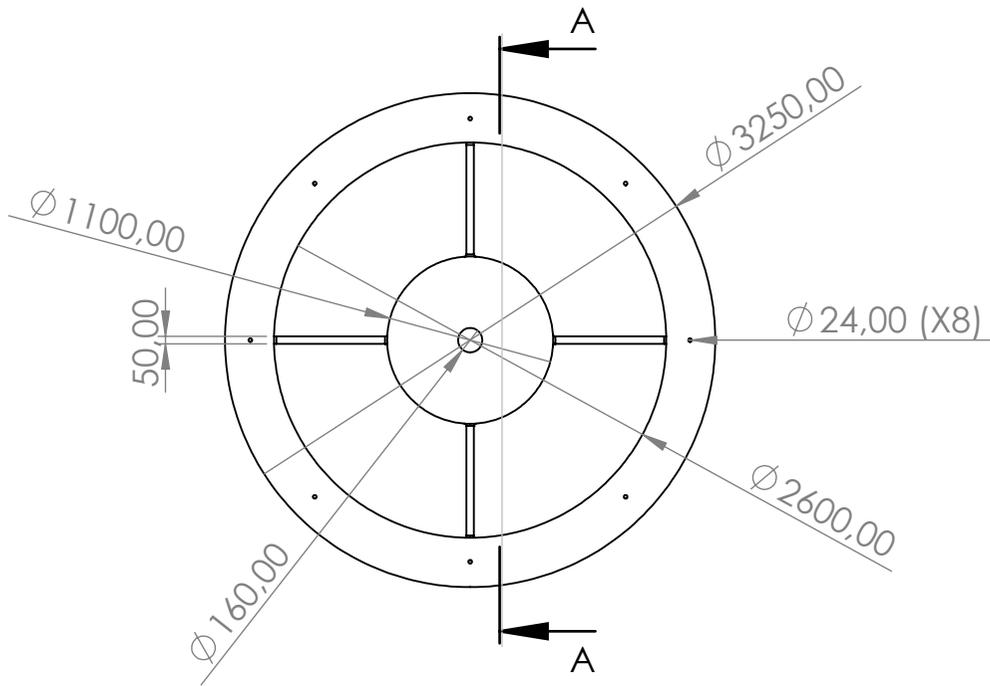


Nombre de la pieza				
Cámara rectangular				
Elaborado por	Natalia Velastegui	Fecha	Firma	
		17/10/24	Natalia V.	
Revisado por	Mayken Espinoza	19/11/24	Mayken E.	
		Material	Escala	Unidad
Hormigón	1:850	m	A4	

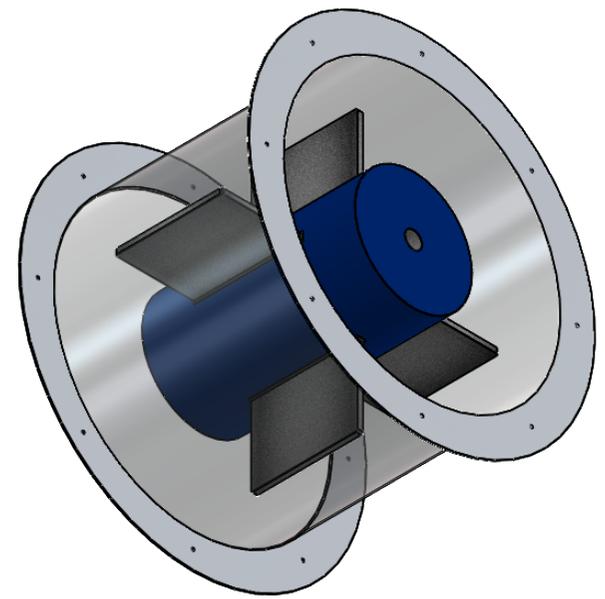


DETALLE B

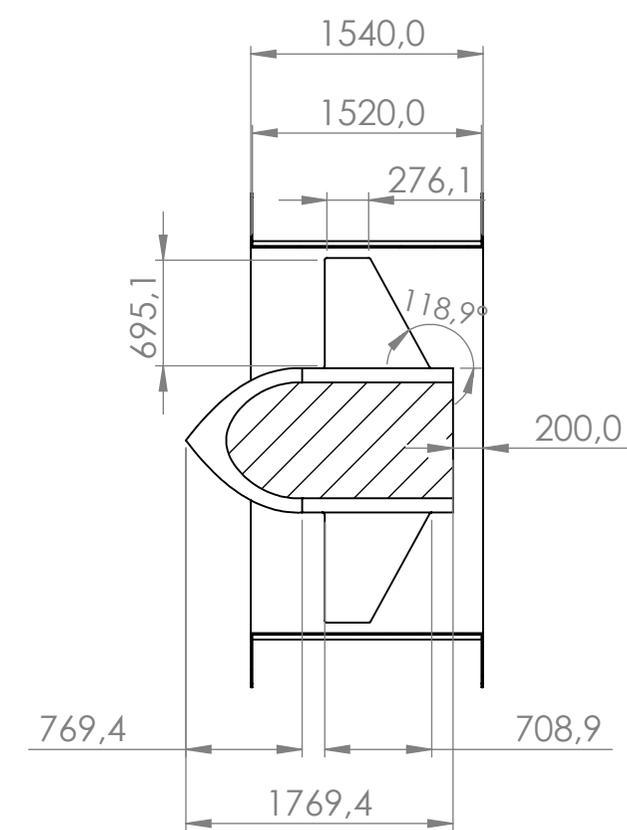
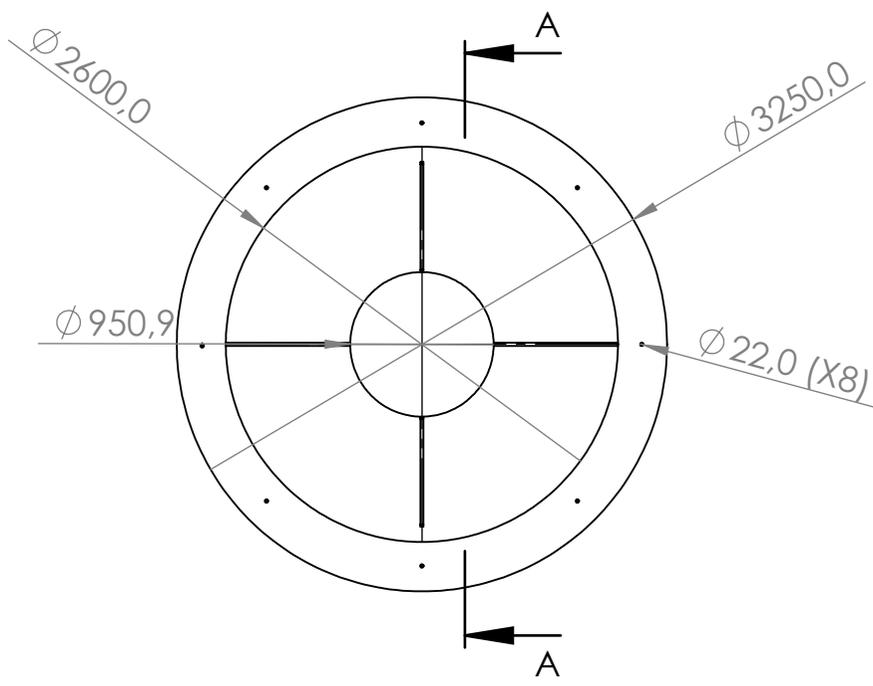
Nombre de la pieza				
Turbina Wells				
Elaborado por	Nashly Yange	Fecha	Firma	
		01/11/24	Nashly Y.	
Revisado por	Mayken Espinoza	10/11/24	Mayken E.	
		Material	Escala	Unidad
Acero inoxidable	1:35	mm	A4	04



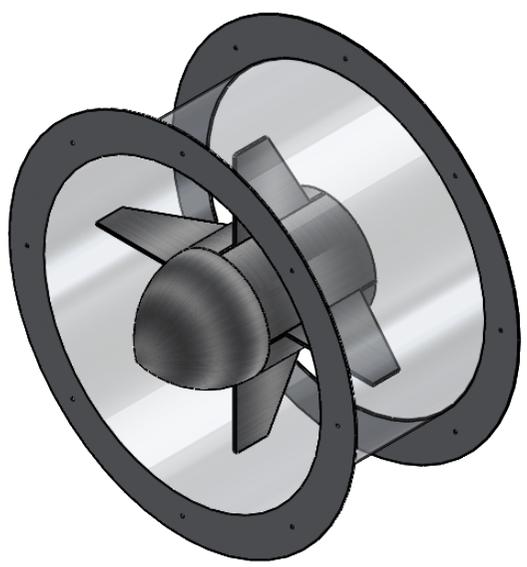
SECCIÓN A-A



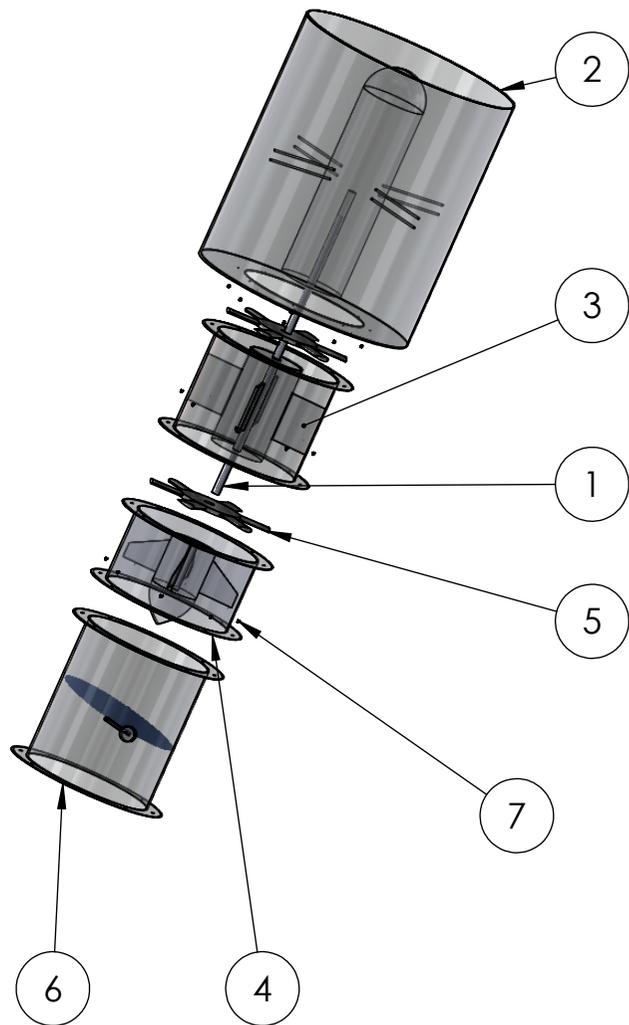
Nombre de la pieza				
Redireccionar superior				
Elaborado por	Natalia Velastegui	Fecha		Firma
		01/11/24		Natalia V.
Revisado por	Mayken Espinoza	Fecha		Firma
		10/11/24		Mayken E.
Material	Escala	Unidad	Formato	Plano No.
Varios	1:50	mm	A4	05



SECCIÓN A-A



Nombre de la pieza				
Redireccionar inferior				
Elaborado por	Natalia Velastegui	Fecha		Firma
		20/10/24		Natalia V.
Revisado por	Mayken Espinoza	Fecha		Firma
		01/11/24		Mayken E.
Material	Escala	Unidad	Formato	Plano No.
Varios	1:50	mm	A4	06



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Eje	1
2	Generador	1
3	Redireccionador 1	1
4	Redireccionador 2	1
5	Turbina Wells	2
6	Válvula	1
7	Hex cap screw, M20 x 2.5 x 30 --30N	24

Nombre del ensamble				
Sección Turbina Wells				
Elaborado por	Natalia Velastegui	Fecha	Firma	
		01/12/24	Natalia V.	
Revisado por	Mayken Espinoza	Fecha	Firma	
		15/12/24	Mayken E.	
Material	Escala	Unidad	Formato	Plano No. 07
Varios	N/A	mm	A4	