

Universidad Nacional de Ingeniería
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
UNIDAD DE POSGRADO



TESIS:

CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DE UNA COLUMNA DE
AGUA OSCILANTE FIJA MEDIANTE SIMULACIÓN NUMÉRICA
PARA MEJORAR LA CONVERSIÓN DE ENERGÍA OCEÁNICA EN
ENERGÍA ELÉCTRICA

PARA OBTENER EL GRADO ACADEMICO DE MAESTRO EN
CIENCIAS CON MENCIÓN EN ENERGÉTICA

ELABORADO POR:

CLAUDIA MILAGROS ESPINOZA ZEGARRA

ASESOR:

DSC. JUAN JOSÉ UCHUYA LÓPEZ

LIMA, PERÚ

2024

DEDICATORIA

*Dedicado a mis hijos por ser la fuerza que me anima
a seguir progresando, todo esfuerzo es por ustedes.*

Claudia Espinoza

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi asesor, el DSc. Ing. Juan José Uchuya López, por su amistad y el apoyo brindado en la elaboración y culminación de este trabajo tesis.

A los profesores y autoridades de la Universidad Nacional de Ingeniería, a CARELEC por el maravilloso programa de maestría desde que ingresé y a la Biblioteca Central UNI por facilitar un ordenador especializado con la licencia académica del Fluent del Ansys Academic para la simulación numérica.

A los amigos, colegas, compañeros de aulas y de trabajo de los cuales he aprendido a ser mejor persona y profesional.

A mis hijos, padres, hermanos, familiares por ser parte y apoyo fundamental de mi vida.

Y a Dios, por todo.

*“Nuestra mayor debilidad es rendirse, la única manera
de tener éxito es intentarlo siempre una vez más”*

Thomas A. Edison

RESUMEN

La presente tesis investiga sobre el sistema de conversión de energía de las olas, la Columna de Agua Oscilante (OWC) fija, para zonas costeras a través de la optimización de su diseño. Realiza una revisión bibliográfica sobre el potencial de la energía undimotriz como fuente de energía renovable y la evaluación del diseño de una OWC fija empleando la simulación numérica que incluya el dominio del fluido (ola) y el dominio del sólido (dispositivo). El trabajo analiza el comportamiento del flujo de aire de salida de la cámara del OWC fija en base a la diferencia de presión en la cámara interna del OWC debido a la oscilación de la columna del agua producto de la incidencia de la ola. Esto ocurre variando el diámetro de salida de aire de la cámara del OWC para que se evalúe la velocidad del aire a una determinada característica de ola según la teoría de onda de Airy, con altura y longitud de onda definida, utilizando la simulación numérica como herramienta de apoyo en la obtención de resultados. El empleo de la simulación numérica es un recurso computacional de bajo costo en comparación a ensayos experimentales a escala en laboratorios, además de disminuir las incertidumbres en el diseño previa su validación.

Palabras Clave: Columna de Agua Oscilante, OWC fija, perfil de velocidades, ola, flujo de aire y simulación numérica.

ABSTRACT

This thesis investigates the wave energy conversion system, the fixed Oscillating Water Column (OWC), for coastal areas through the optimization of its design. Conduct a literature review on the potential of wave energy as a renewable energy source and evaluate the design of a fixed OWC using numerical simulation that includes the fluid domain (wave) and the solid domain (device). The work analyzes the behavior of the exit air flow from the fixed OWC chamber based on the pressure difference in the internal chamber of the OWC due to the oscillation of the water column as a result of the incidence of the wave. This occurs by varying the air outlet diameter of the OWC chamber so that the air speed at a given wave characteristic is evaluated according to Airy's wave theory, with defined height and wavelength, using numerical simulation as a tool. support in obtaining results. The use of numerical simulation is a low-cost computational resource compared to scale experimental tests in laboratories, in addition to reducing uncertainties in the design prior to its validation.

Keywords: Oscillating Water Column, fixed OWC, velocity profile, wave, air flow and numerical simulation.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I ASPECTOS GENERALES Y METODOLÓGICOS	4
1.1 Antecedentes de la investigación	4
1.2 Identificación y descripción del problema de estudio	17
1.3 Formulación del problema	19
1.3.1 Problema General.....	19
1.3.2 Problemas Específicos	19
1.4 Justificación e importancia.....	20
1.5 Objetivos	21
1.5.1 Objetivo General.....	21
1.5.2 Objetivo Específico	21
1.6 Hipótesis	22
1.6.1 Hipótesis General	22
1.6.2 Hipótesis Específico.....	22
1.7 Variables, dimensiones e indicadores.....	22
1.8 Unidad de análisis	24
1.9 Fuentes de información	24
1.10 Tipo y nivel de investigación.....	24
1.10.1 Tipo de investigación	24
1.10.2 Nivel de investigación	24
1.11 Método de diseño de la investigación.....	25
1.12 Población y muestra.....	26
1.13 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	26
1.14 Análisis y procesamiento de datos	26
CAPÍTULO II MARCO TEÓRICO.....	28

2.1 Energía de las olas.....	28
2.1.1 Potencial.....	29
2.1.2 Barreras.....	30
2.2 Dispositivo de Columna de Agua Oscilante (OWC)	32
2.2.1 Eficiencia de conversión de OWC.....	33
2.2.2 Impacto de la OWC en la conversión de energía	34
2.3 Enfoque de optimización	36
2.3.1 Métodos.....	36
2.3.2 Análisis 2D.....	36
2.4 Condiciones de diseño	37
2.5 Dinámica de fluidos computacional (CFD).....	37
CAPÍTULO III DESARROLLO DE LA TESIS	39
3.1 Geometría del Columna de Agua Oscilante fija	39
3.1.1 Partes de una OWC fija	40
3.1.2 Relación de flujo de aire liberado con la energía de la turbina	41
3.1.3 Dimensiones principales de una OWC fija	43
3.2 Simulación por CFD de una OWC fija.....	44
3.2.1 Geometría y dominio.....	44
3.2.2 Enmallado.....	45
3.2.3 Condiciones de frontera.....	46
3.3 Teoría lineal de ondas	47
3.4 Componentes de costos y proceso de cálculo general de una OWC fija	54
CAPÍTULO IV ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS	59
4.1 Resultados de caso 1	60
4.2 Resultados de caso 2	62
4.3 Resultados de caso 3	63
4.4 Resultados de caso 4	64
4.5 Resultados de caso 5	66

4.6 Resultados de caso 6	67
4.7 Discusión de resultados	69
4.8 Contrastación de hipótesis	70
4.9 Aporte	71
CONCLUSIONES	73
RECOMENDACIONES.....	75
REFERENCIAS	76
ANEXO A MATRIZ DE CONSISTENCIA	79

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Configuración experimental (a) Fotografías del dispositivo OWC flotante y (b) Bosquejo de la configuración experimental.....	5
Figura 2 Esquema de turbina eólica marina flotante híbrida y convertidor de energía de las olas de Columna de Agua Oscilante	6
Figura 3 Principales dimensiones del MUP en el Sitio Atlántico (Unidades mm).....	7
Figura 4 Bosquejo de un OWCOB: (a) vista de pájaro; (b) vista superior.....	9
Figura 5 Configuración experimental (a) y disposición de los sensores para dispositivos de doble (b) y triple cámara (c)	10
Figura 6 Dominio del modelo y sección transversal conceptual del dispositivo OWC con reflexión de onda en la pared parabólica. (También se muestra la interfaz de superficie libre)	10
Figura 7 Representación esquemática de los tres tipos principales de OWC: a) OWC fijo equipado con una turbina Wells, b) Spar-boya con una turbina birradial instalada, y c) Backward Bent Duct Buoy (BBDB) con una turbina Wells instalada.	11
Figura 8 Prototipo de WEC.	12
Figura 9 Vista superior de la turbina Wells con protuberancias de borde de ataque (izquierda). Configuración experimental para la turbina Wells con protuberancias de borde de ataque (derecha)	13
Figura 10 Pasos de simulaciones	14
Figura 11 Modelo integral de geometría y las condiciones de contorno en Fluent - Ansys.....	15
Figura 12 Dibujo de diseño de Ocean Falls incl. turbina de aire - Vista isométrica - SketchUp Pro 2019.....	15
Figura 13 Análisis CFD para la altura de ola de diseño ($H = 4,55 \text{ m}$ $T = 9 \text{ s}$) - ANSYS Fluent	16

Figura 14 Esquema de Columna de Agua Oscilante fija	41
Figura 15 Vista Transversal de las Dimensiones de la Columna de Agua Oscilante Fija	43
Figura 16 Configuración del dominio computacional de la simulación OWC	44
Figura 17 Esquema de enmallado del sistema de Columna de Agua Oscilante.....	45
Figura 18 Esquema de condiciones de frontera en el sistema OWC fijo	46
Figura 19 Posicionamiento del sensor de velocidad de aire en la salida.....	47
Figura 20 Onda de Airy.....	52
Figura 21 Parámetros de Configuración para la Simulación Inicial en Ansys Fluent	53
Figura 22 Modelo Numérico de Parámetros de la Primera Simulación	54
Figura 23 Fases liquido aire de caso 1	61
Figura 24 Velocidades de caso 1.....	61
Figura 25 Sensor de velocidad de caso 1	61
Figura 26 Fases liquido aire de caso 2	62
Figura 27 Velocidades de caso 2.....	62
Figura 28 Sensor de velocidad de caso 2	63
Figura 29 Fases liquido aire de caso 3	63
Figura 30 Velocidades de caso 3.....	64
Figura 31 Sensor de velocidad de caso 3	64
Figura 32 Fases liquido aire de caso 4	65
Figura 33 Velocidades de caso 4.....	65
Figura 34 Sensor de velocidad de caso 4	66
Figura 35 Fases liquido aire de caso 5	66
Figura 36 Velocidades de caso 5.....	67
Figura 37 Sensor de velocidad de caso 5	67
Figura 38 Fases liquido aire de caso 6	68
Figura 39 Velocidades de caso 6.....	68
Figura 40 Sensor de velocidad de caso 6	68
Figura 41 Diagrama de barras para los casos de ola de 0.4 m y 0.2 m.....	69

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de variables.....	23
Tabla A.1 Matriz de consistencia	80

INTRODUCCIÓN

Esta tesis se enfoca en el estudio de un dispositivo de Columna de Agua Oscilante (OWC) mediante la caracterización hidrodinámica de los procesos que tienen lugar durante su funcionamiento. El objetivo principal es realizar la caracterización hidrodinámica de una Columna de Agua Oscilante fija mediante simulación numérica para mejorar la conversión de energía oceánica en energía eléctrica., y este proceso se manifiesta con la oscilación del agua dentro de la cámara del OWC comprime el aire, generando una velocidad de flujo suficiente para impulsar una turbina de aire, lo que convierte la energía neumática, representada por el flujo del aire comprimido, en energía eléctrica a través de la turbina. Este proceso garantiza la eficiencia de los sistemas de energía renovable basados en el movimiento de las olas, lo que ofrece una fuente sostenible de electricidad.

El estudio se centrará en la relación entre el comportamiento de las olas, tales como su altura y longitud, y la geometría del OWC fija en el que será evaluado el diámetro del orificio de salida del aire. Estos dos parámetros, el comportamiento de las olas y el OWC fijo, son esenciales para determinar la velocidad de salida del aire comprimido y, por lo tanto, la cantidad de energía que puede ser capturada y convertida visualizada a través de la simulación numérica por la interacción de fases (agua y aire). En concreto, la investigación analizará las variaciones de estos parámetros, mostrados en el capítulo IV, para evaluar su interacción y mejor resultado general del sistema, y resultante de ello seleccionar el diseño del OWC fijo más conveniente u, en aspectos del diseño hidrodinámico, optimizado. La capacidad del dispositivo para convertir energía de manera eficiente bajo diferentes condiciones operativas será un punto clave de esta investigación, ya que la demanda global de fuentes de energía sostenibles sigue en aumento.

Para cumplir con los objetivos planteados, se utilizará la simulación numérica a través de la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), lo que permite modelar y analizar el comportamiento del OWC en diferentes escenarios. Además, se aplicará una metodología para la evaluación de los resultados, que incluirá el estudio de las condiciones de frontera, la interacción de fases entre el agua y el aire dentro de la cámara, el enmallado y la transferencia de energía asociada inherentemente por el software de simulación en el sistemas OWC fija.

El trabajo está dividido en cuatro capítulos, además de las conclusiones y recomendaciones finales, los cuales se detallan a continuación:

- El capítulo 1, "Aspectos generales y metodológicos", incluye una revisión extensa de la literatura existente, sintetizando artículos científicos, tesis de maestría y estudios recientes relacionados con la tecnología de OWC. Se describe el estado actual de la investigación en esta área, los principales avances tecnológicos y los desafíos que enfrenta el sector. Este capítulo también aborda la metodología utilizada en la investigación, detallando las variables, indicadores y dimensiones clave que serán evaluadas, así como la estructura del diseño experimental.
- El capítulo 2, "Marco Teórico", presenta los fundamentos teóricos necesarios para comprender el funcionamiento del OWC. Se aborda el concepto de energía undimotriz y cómo esta se puede captar y transformar mediante dispositivos como el OWC. Además, se introduce la simulación numérica por CFD como una herramienta fundamental para modelar el comportamiento de estos sistemas bajo diferentes condiciones operativas.
- El capítulo 3, "Desarrollo de la Tesis", detalla la geometría y las dimensiones de la OWC fija, las cuales son clave para la caracterización hidrodinámica del sistema. Se presenta el procedimiento seguido en las simulaciones numéricas, describiendo las condiciones de frontera y las ecuaciones fundamentales, tales como la teoría lineal de ondas, que se emplearán para modelar el comportamiento del sistema.

Además, se discuten los componentes de costos y el proceso de cálculo para evaluar la viabilidad técnica y económica del sistema.

- El capítulo 4, "Análisis de Resultados y Contraste de Hipótesis", examina los seis casos estudiados que varían en función de la altura de las olas y el diámetro del orificio de salida de aire. Se evaluarán los resultados obtenidos mediante simulación para comparar la velocidad de salida del aire y su impacto en la eficiencia de conversión de energía. Cada caso se analizará con el objetivo de identificar las configuraciones que maximicen la producción de energía neumática y, en consecuencia, la energía eléctrica generada por la turbina de aire.

Finalmente, se presenta el capítulo de Conclusiones, donde se resumen los hallazgos clave de la investigación, destacando las configuraciones más eficientes del OWC y proporcionando recomendaciones para mejorar su rendimiento. Se proponen futuras líneas de investigación para profundizar en el estudio de este tipo de tecnologías y expandir su aplicación en el ámbito de las energías renovables.

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES Y METODOLÓGICOS

En este capítulo se presenta una síntesis detallada de la revisión bibliográfica realizada, la cual abarca artículos científicos y tesis recientes relacionadas con los sistemas de generación de energía eléctrica mediante Columnas de Agua Oscilante (OWC). Este dispositivo ha sido ampliamente investigado por su capacidad para convertir la energía de las olas en energía neumática, la cual puede ser posteriormente transformada en energía eléctrica a través de una turbina de aire. El análisis realizado no solo aborda los aspectos técnicos y teóricos de la OWC, sino también sus implicaciones hidrodinámicas y los avances más recientes en la tecnología.

El enfoque de este capítulo está orientado a proporcionar un marco de referencia claro y actualizado, que permita comprender las características hidrodinámicas que influyen en el rendimiento del sistema OWC. La revisión de la literatura cubre diversas áreas, como el diseño de la columna de agua, la optimización de los orificios de salida de aire, y la simulación numérica mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), lo que proporciona una base sólida para el desarrollo de la investigación.

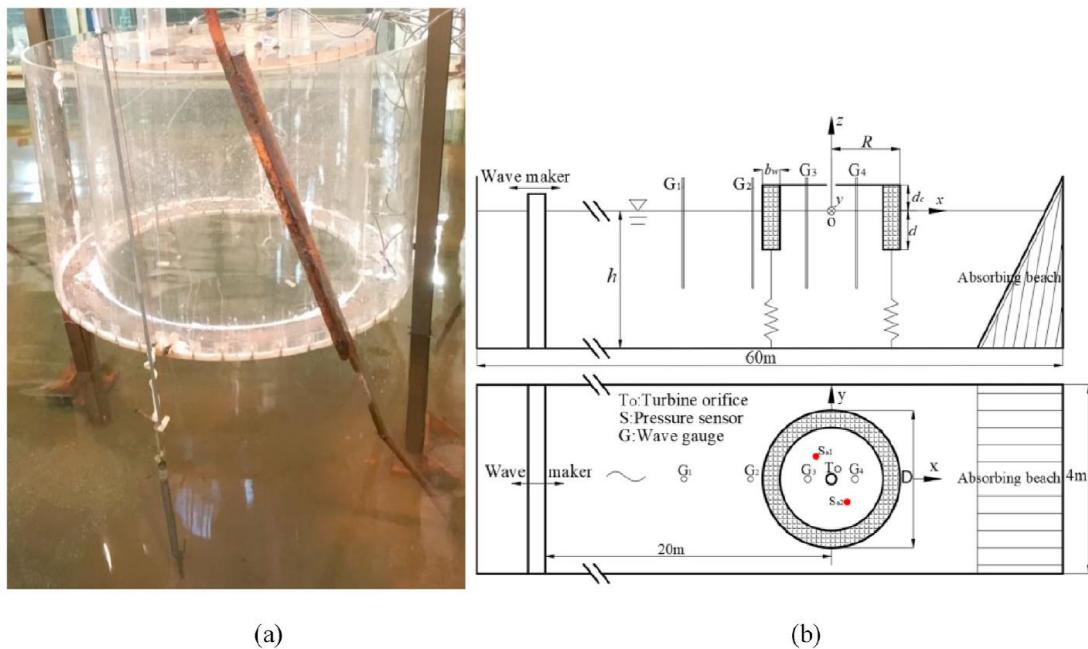
1.1 Antecedentes de la investigación

Zhou, Y., Ning, D., Liang, D., & Cai, S. (2021), en su artículo, se aborda extensamente sobre la energía undimotriz y los tipos de sistemas utilizados de aprovechamiento de la energía de las olas para conversión en energía eléctrica, siendo uno de esos sistemas el Columna de Agua Oscilante, en sus siglas en inglés OWC, de características cilíndrica flotante, pues no siempre son flotantes, algunas OWC son

instaladas en las costas de forma fija, con paredes de concreto, pero el autor trabajó en una flotante como se aprecia en la Figura 1, y el fin de su trabajo fue evaluar experimentalmente su rendimiento hidrodinámico y compararlo con una simulación numérica.

Figura 1

Configuración experimental (a) Fotografías del dispositivo OWC flotante y (b) Bosquejo de la configuración experimental



Nota: fuente Zhou et al. (2021)

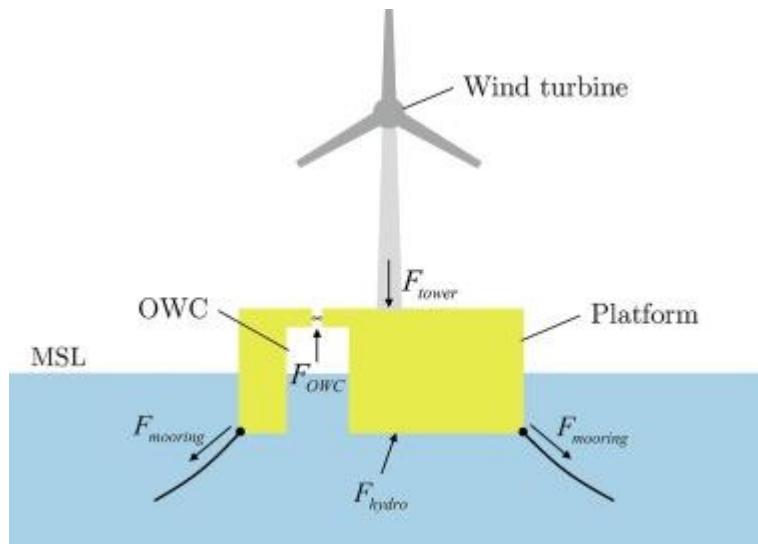
El aporte sustancial del artículo está en las limitaciones en la prueba experimental debido a que el OWC está limitado por muelles y los efectos actuantes se reflejarán en el movimiento vertical del nivel de agua. Estas limitaciones proveen una configuración matemática accesible para la simulación numérica, trabajando el contorno de los elementos con una modelo de segundo orden en el dominio del tiempo basado en la técnica de expansión de perturbaciones de ecuaciones diferenciales no lineales que servirán en la interacción de las olas con el dispositivo flotante. La expansión de perturbación es una relación de la polarización inducida de orden n a la n-ésima potencia utilizado en los campos eléctricos o magnéticos pero adaptado a corriente de onda. Dentro del dispositivo OWC, en su cámara, se trabajó la amortiguación neumática por la columna

de aire interna y la amortiguación viscosa en las condiciones de contorno de la superficie libre. Se concluye que la relación experimental con la numérica tiene buena aproximación en resultados generales respecto a la elevación de la superficie de la cámara, presión de aire, eficiencia hidrodinámica y el desplazamiento vertical del OWC (este siendo amarrado al lecho). Es un factor influyente las condiciones de la ola, la inclinación con la que incide respecto a la longitud y altura, además es evaluado la rigidez del amarre que influye en el rendimiento del calado de la cámara del OWC. Se encuentra una relación de apertura positiva, está debido a los efectos de amortiguamiento de la turbina obtenida por dos resortes que registrará el desplazamiento vertical, para los dos amortiguadores, se tuvo un rendimiento de 2% y 3%.

Zhang et al. (2022), en su artículo, presenta una propuesta híbrida de conversión de olas en energía eléctrica que combina una turbina eólica offshore y una Columna de Agua Oscilante (OWC), está última energía undimotriz, ver Figura 2.

Figura 2

Esquema de turbina eólica marina flotante híbrida y convertidor de energía de las olas de Columna de Agua Oscilante



Nota: fuente Zhang et al. (2022)

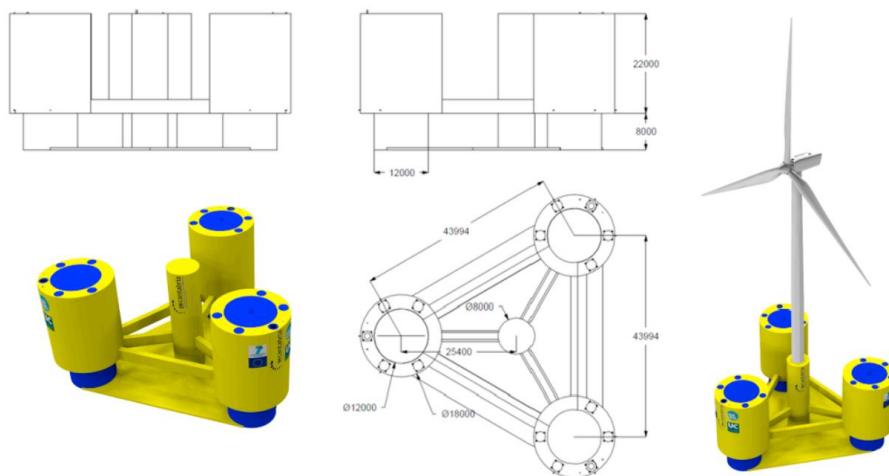
El desafío es su producción en altamar, más para el OWC que no solo incrementa la captación de energía potencial total, sino que debe reducir las respuestas dinámicas de la plataforma offshore y las cargas en los aerogeneradores por las vibraciones. El tipo de

investigación es experimental con un monitoreo de la influencia de los amarres en un plataforma, y se correlacionará con una simulación numérica respecto al dominio de tiempo y frecuencia de la ola para caracterizar la dinámica de la columna de agua para diversas condiciones ambientales, definidas en ola y viento. La parte experimental tiene olas escaladas 1:50 y ha tenido buena aproximación lo experimental con la simulación numérica lo que valida este último para técnicas predictivas de desarrollo experimental. Lo interesante del artículo es la intervención de estrategias para controlar el potencial del OWC respecto al amortiguamiento lineal tradicional, eso ha reducido el movimiento de cabeceo de la plataforma en 15% y una reducción de la carga estructural, de fatiga, en un 6%.

Sarmiento et al. (2019), en su artículo, amplia conceptos y funciones sobre los convertidores de energía flotantes y los desafíos que atraviesan en su diseño para evitar consecuencias negativas en su implementación. Juzga necesario la contrastación de los diseño numéricos con los experimentales, una validación que implique alternativas de solución es por ello por lo que propone una estructura semisumergible flotante, llamada MUP, con la particularidad de acoplar tres Columna de Agua Oscilantes (OWC) a una plataforma de turbina eólica offshore (OWT), ver Figura 3.

Figura 3

Principales dimensiones del MUP en el Sitio Atlántico (Unidades mm)



Nota: fuente Sarmiento et al. (2019)

En su artículo presenta varias pruebas en tanque de olas representando olas costeras y oceánicas debidamente caracterizadas, quiere decir, que estas olas incluyen viento o sin viento, condiciones de mar operables y de supervivencia (críticos). Para las pruebas se valieron de equipos para simular todos los efectos mencionados, y se obtuvieron resultados como períodos naturales, movimientos, cargas sobre el sistema de amarre o aceleraciones, que son representativos del rendimiento de la plataforma OWC+OWT.

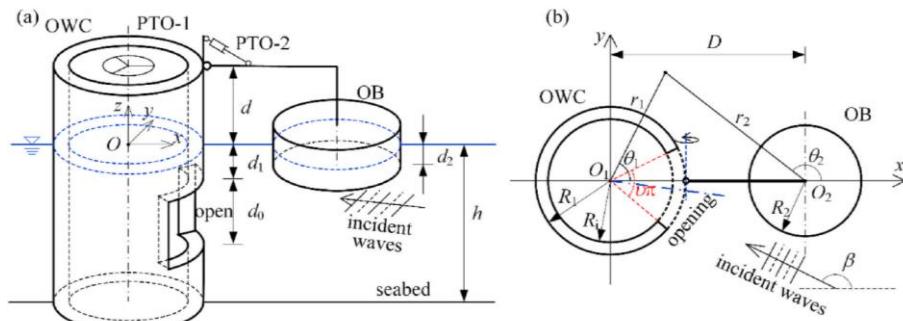
Mia et al. (2022), en su artículo, trabaja en la eficiencia hidrodinámica de dispositivos de Columna de Agua Oscilante (OWC) con condiciones de oleaje en alta mar con una característica de estudio bidimensional de la propagación de la ola, añadiendo a este fenómeno la dinámica de fluidos con ecuaciones bidimensionales incompresibles de Reynolds-Navier-Stokes y el modelo de turbulencia $k-\omega$ de transporte de esfuerzo cortante (en sus siglas en inglés SST) para obtener las ecuaciones de movimiento de agua y para el flujo de aire en la turbina se emplea el modelo aerodinámico comprimible. En el primer caso se establece la condición que el OWC solo cuenta con una cámara de columna de agua, pero para el segundo caso se cuenta con multicámaras. En el primer caso se evalúa la eficiencia de la columna de agua respecto a las paredes de la cámara de la OWC, esta cámara cuenta con dos paredes, la pared frontal y la pared trasera, siendo la pared frontal la que recibe la ola incidente y la pared trasera que contiene la oscilación de la columna de agua, la relación entre la pared frontal respecto de la pared trasera, según el estudio, debería ser menor o igual a 0.75 y de aumentarse esta relación significaría una reducción en la eficiencia de la OWC. Por otro lado, experimentar con dos cámaras con dos turbinas o dos cámaras con una turbina, en el segundo caso, le valió a la autora en concluir que el primer caso es más eficiente que la segunda.

Cui et al. (2021), en su artículo, presenta en la Figura 4 una integración de Columna de Agua Oscilante (OWC) y boyas oscilantes (OB) que integrándose se obtiene un OWCOB útil para convertir la energía de las olas en eléctrica. Este sistema híbrido donde la principal función del OWC es conocida en aprovechar la columna de agua para generar

una columna de aire que propiciará un flujo por una abertura superior debido a la diferencia de presión del aire en la cámara, activando una turbina, pero el trabajo del OB es impulsar un sistema hidráulico separado para resolver problemas de difracción de las olas e investigar el rendimiento del aprovechamiento de energía por olas. El autor aplica un modelo lineal empleadas en plataformas de turbinas eólicas offshore, analizando el dominio de frecuencia respecto al diseño del OWCOB, quiere decir, en elevación de la bisagra, brazo del OB, con la finalidad de optimizar el rendimiento del OWC. El autor concluye que funciona mejor un OWCOB, integrado, que de forma independiente cada uno, porque el estudio multiparamétrico demuestra que tiene más amplia la respuesta del factor de captura de energía en el OWCOB que independiente, y eso que se dieron varias direcciones de la ola para ampliar la respuesta de frecuencia. Finalmente, el trabajo aporta en una exploración en la optimización del diseño de un OWCOB.

Figura 4

Bosquejo de un OWCOB: (a) vista de pájaro; (b) vista superior



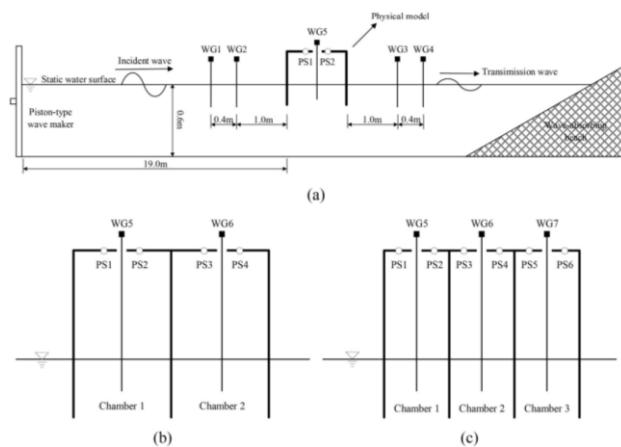
Nota: fuente Cui et al. (2021)

Zhao et al. (2021), en su artículo, presenta una Columna de Agua Oscilante (OWC) con múltiples cámaras, vale decir, de 1, 2 y 3 cámaras, mostrada en la Figura 5, y al igual que otros artículos revisados, el autor evalúa el comportamiento hidrodinámico del rompeolas OWC. Inicia con un estudio cuantitativo para comprender el principio hidrodinámico, luego evalúa el rendimiento de las cámaras respecto al ancho de cada una, el coeficiente de reflexión, el coeficiente de transmisión, el coeficiente de disipación y el ancho de banda de frecuencia efectiva. Al igual que Mia et al (2022), hay una relación de las múltiples cámaras con respecto a la eficiencia de la turbina, sin embargo, el Zhao

agrega que hay mejor rendimiento con olas más largas, se atenúan, dando un efecto mejorado en la banda de frecuencia efectiva.

Figura 5

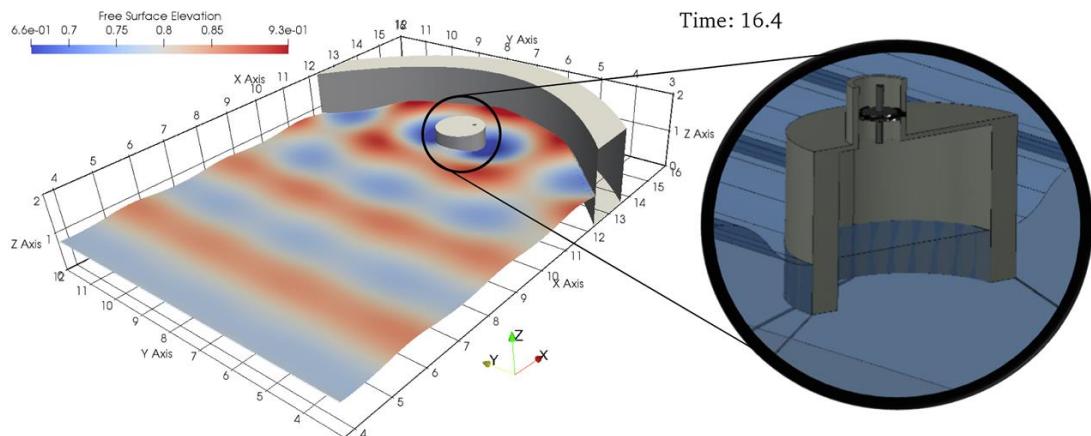
Configuración experimental (a) y disposición de los sensores para dispositivos de doble (b) y triple cámara (c)



Nota: fuente Zhao et al. (2021)

Figura 6

Dominio del modelo y sección transversal conceptual del dispositivo OWC con reflexión de onda en la pared parabólica. (También se muestra la interfaz de superficie libre)



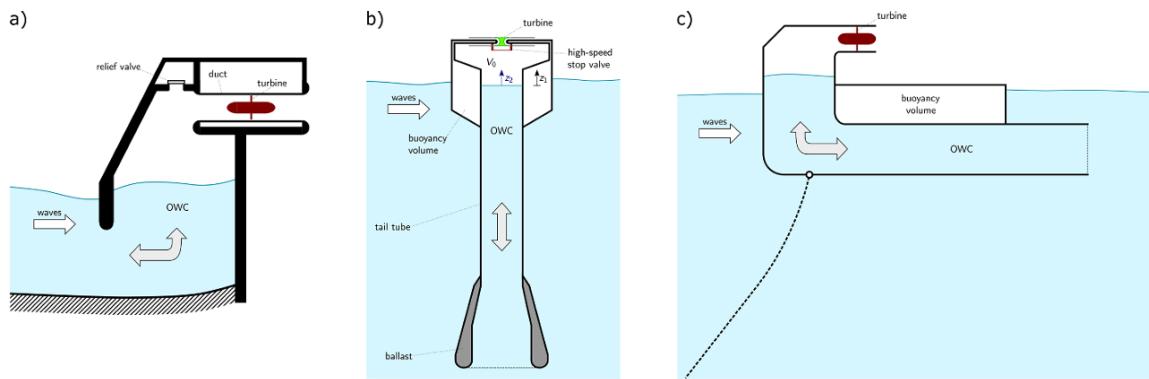
Nota: fuente Mayon et al. (2021)

Mayon et al. (2021), en su artículo, discute sobre la baja eficiencia de conversión de energía de las Columna de Agua Oscilante (OWC) y las limitaciones de su aplicación y comercialización. En fase de estudio se ha desarrollado mucho pero no ha explotado el lado comercial, por que propuso un novedoso sistema OWC cilíndrico y un reflecto de ondas parabólicas para probar la eficiencia hidrodinámica, como se aprecia en Figura 6. El

autor empleo un análisis numérico a través del código computacional abierto OpenFOAM para dos casos: 1) OWC en mar abierto y 2) OWC junto a pared de foco parabólico. El resultado del segundo caso como reflector es de 200% más eficiente que en mar abierto si no está en el punto focal, pero si estuviera, se aprecian cifras de eficiencia en 650%. Este hallazgo contribuye en diseños futuros para la captación de energía sostenible, por lo que merece también una experimentación en laboratorio.

Figura 7

Representación esquemática de los tres tipos principales de OWC: a) OWC fijo equipado con una turbina Wells, b) Spar-boya con una turbina birradial instalada, y c) Backward Bent Duct Buoy (BBDB) con una turbina Wells instalada.



Nota: fuente Rosati et al. (2022)

Rosati, M., Henriques, J. C. C., & Ringwood, J. V. (2022), en su artículo, por otro lado, resalta la simplicidad y practicidad de dispositivos de Columna de Agua Oscilante (OWC), ver Figura 7, como la promesa del futuro por los pocos componentes móviles que necesitaría y niveles de tensión mecánica bajos para mitigar excesos de energía de las olas, es importante ello para no comprometer los componentes del sistema y aumenten el factor de capacidad. El autor explora la viabilidad del OWC considerando los costos operativos y capital del sistema y la calidad de la energía e integridad del dispositivo. Para llevar a cabo ello, se revisa integralmente el problema en diseño, ingeniería y economía, luego se postulan estrategias de control disponibles en el mercado y, por último, se abre campos de optimización bajo supuestos de control aún no exploradas. El avance de la tecnología de control cierra cada vez más las brechas de llevar el OWC a convertir

eficientemente la energía de olas en eléctrica y ser viable económicamente en un futuro cercano.

Mora (2022), en su tesis de maestría, realiza un prototipo de Columna de Agua Oscilante (OWC) con protuberancias en las aspas de la turbina Wells, ver Figura 8, utilizando una turbina Wells para convertir las olas en el OWC por la diferencia de presión de aire, generando un flujo que active la turbina.

Figura 8

Prototipo de WEC.



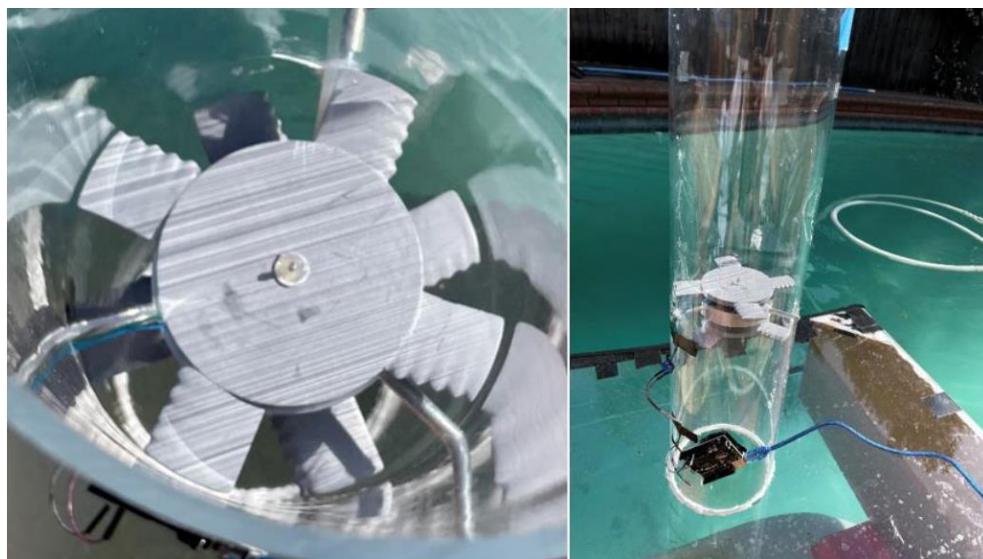
Nota: fuente Mora (2022)

El autor desarrolla dos etapas en su investigación, la primera fue un prototipo básico para evaluar la turbina Wells (diseñada en impresión 3D) y sus parámetros para optimizar el diseño del conjunto todo del OWC y garantizar su funcionamiento, y la segunda es adicionar las protuberancias en el borde del ataque del perfil hidrodinámico de las turbinas Wells para evaluar la potencia de salida, ver Figura 9. Como resultados se obtuvo que el segundo prototipo de turbina Wells con protuberancias mejoró el rendimiento en 57.3% respecto al original y el rango operativo mejoró en 8.7%. Resultados favorables, pero el trabajo no tiene una verificación con olas irregulares, por lo que se recomienda estudiarse

en escenario de mar irregular y también evaluar las ganancias de rendimiento y costo-beneficio.

Figura 9

Vista superior de la turbina Wells con protuberancias de borde de ataque (izquierda). Configuración experimental para la turbina Wells con protuberancias de borde de ataque (derecha)



Nota: fuente Mora (2022)

Barreiro (2020), en su tesis de maestría, realiza una simulación en una Columna de Agua Oscilante (OWC) empleando el Matlab R2020a para los cálculos matemáticos de forma de predecir el adecuado dispositivo flotante. Su tesis explica a profundidad la energía undimotriz, los dispositivos comúnmente utilizados y el funcionamiento y evolución del OWC. Presenta una lista de pasos para la implementación computacional en forma de ecuaciones que identificaran a las simulaciones (ver Figura 10), donde se consta dos cuerpos principales en el OWC, la boya cilíndrica hueca y el flotador. Según el autor, como en la Figura, es el sistema OWC más conveniente por su simpleza y ha sido modelizado en Matlab para simular el comportamiento general del sistema en el interfaz de movimiento entre el agua y la cámara de aire en la zona hueca, que, por intercambio de presión, genera una velocidad de flujo de aire con un empuje aprovechable por la turbina de aire. El trabajo presenta los algoritmos complejos computacionales, un aporte a la programación debido a

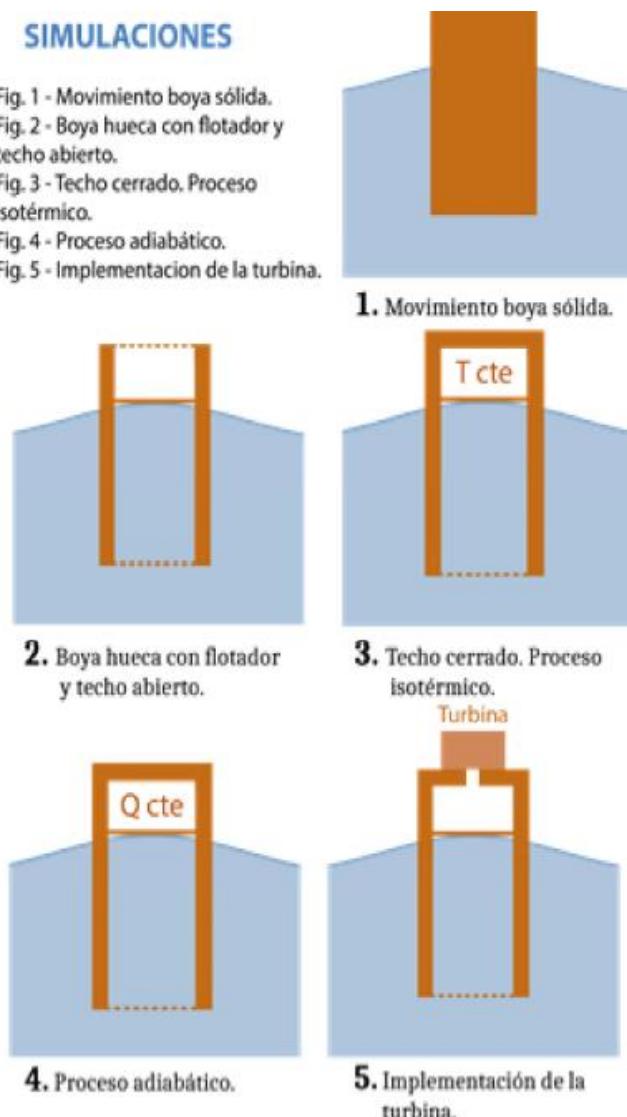
la característica de modificación del OWC en el diámetro exterior (adicionalmente la masa de la boyas), diámetro interior y volumen inicial de la cámara de aire.

Figura 10

Pasos de simulaciones

SIMULACIONES

- Fig. 1 - Movimiento boyas sólida.
- Fig. 2 - Boya hueca con flotador y techo abierto.
- Fig. 3 - Techo cerrado. Proceso isotérmico.
- Fig. 4 - Proceso adiabático.
- Fig. 5 - Implementación de la turbina.



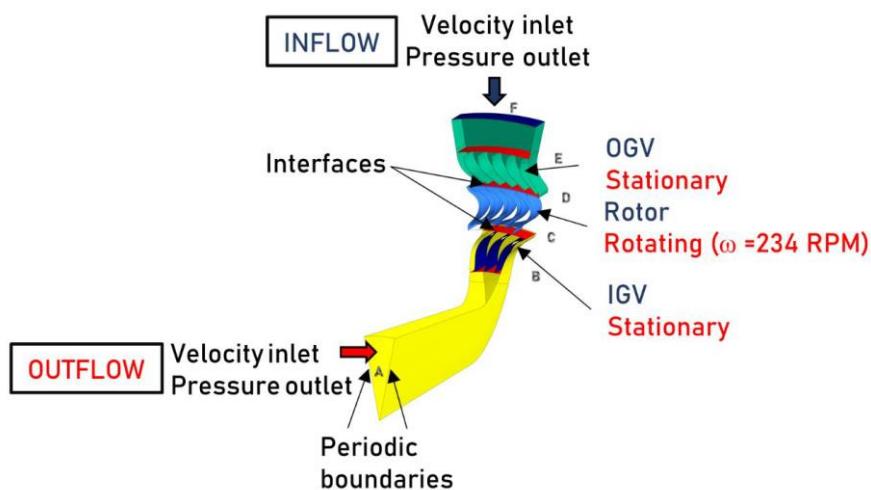
Nota: fuente Barreiro (2020)

Saad (2022), en su tesis de doctorado, enfoca más su estudio en el diseño y comprobación de una turbina radial, separada en tres partes, de una planta de Columna de Agua Oscilante (OWC) para el incremento global de la instalación con la optimización de la geometría de la turbina Wells, empleando modelos numéricos. Realiza previamente un estudio profundo sobre el OWC, tipos, evolución, características y comenta los más sobresalientes en el mundo. Comienza entonces con la evaluación del rendimiento, para

ello realiza configuraciones en las secciones de la turbina Wells para tener una base de la simulación numérica en CFD. Luego, se estableció la geometría y las condiciones de contorno en el código Fluent del Ansys del modelo integral, ver Figura 11. Por último, pasó por una validación de consistencia de los resultados con otros experimentales para caudales bajos y elevados, así como también fueron evaluados las pérdidas evidenciados por la presión total y ángulos de flujo de las corrientes. El desarrollo de la matemática aplicada en el diseño de los álabes de la turbina Wells es compleja, pero ofrece características útiles para establecer el dominio y condiciones de contorno para elegir el correcto álabe en términos de solidez y analizadas respecto los ángulos de flujo.

Figura 11

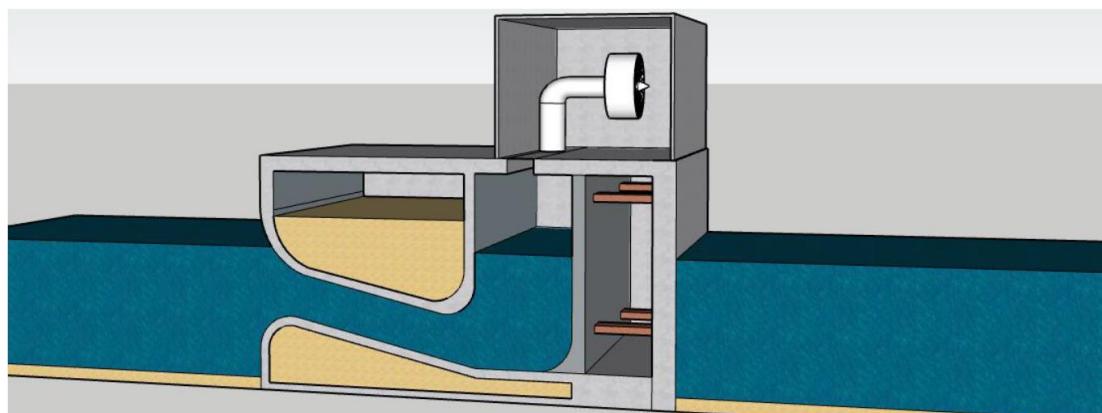
Modelo integral de geometría y las condiciones de contorno en Fluent - Ansys



Nota: fuente Saad (2022)

Figura 12

Dibujo de diseño de Ocean Falls incl. turbina de aire - Vista isométrica - SketchUp Pro 2019

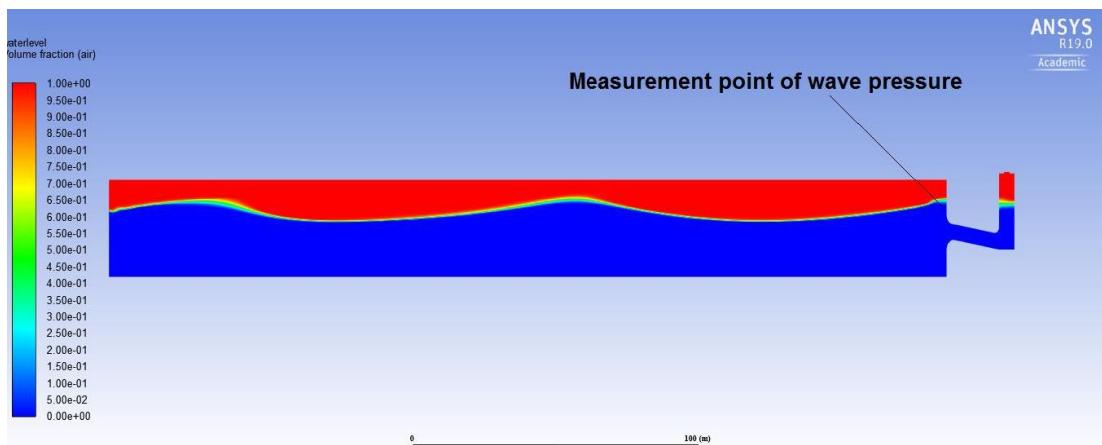


Nota: fuente Van Den (2019)

Van Den (2019), en su tesis de maestría, explora el dispositivo Ocean Falls cuyo OWC fue inventado por BAM infraconsult b.v. (ver Figura 12) La particularidad de este OWC es la inclusión de tubos de conexión y una pared trasera ajustable para hacer coincidir la frecuencia naval con la frecuencia de onda entrante. Una evolución de la ingeniería en captación de energía por olas, pero para evaluar las interacciones hidrodinámicas, el autor realizar análisis empleando el 3D ANSYS AQWA para modelar paramétricamente los coeficientes hidrodinámicos y fuerzas de excitación en el OWC.

Figura 13

Análisis CFD para la altura de ola de diseño ($H = 4,55 \text{ m}$ $T = 9 \text{ s}$) - ANSYS Fluent



Nota: fuente Van Den (2019)

Lo interesante de la tesis es la configuración de 13 diseños de geometría y se les evalúan los rendimientos respecto a la potencia disponible y el sistema de toma de fuerza (en sus siglas en inglés PTO) dividida por el flujo de las olas disponibles. Tomando como base el diseño del Ocean Falls, este tiene una altura del tubo de conexión $A=5.32 \text{ m}$, el ancho de la cámara de aire $B=5.37 \text{ m}$ y la longitud del tubo de conexión $L=13.05$, y sirven para comparar con los 13 diseños que forma correlacionada se obtuvo que en teoría y con respecto al caso base un valor de $A > 5.32 \text{ m}$ reduce el rendimiento y un valor de $A < 5.32 \text{ m}$ mejora el rendimiento. En caso de que $B > 5.37 \text{ m}$ el rendimiento mejore mientras que $B < 5.37 \text{ m}$ lo reduzca. Asimismo, $L > 13.05 \text{ m}$ mejora el rendimiento y $L < 13.05 \text{ m}$ reduce el rendimiento. Aplicando CFD para validar estos rendimientos se encontraron resultados similares para OWC con cámara abierta, pero con una resonancia con los períodos de

olas, ver Figura 13, y respecto a cámaras parcialmente cerradas, se difiere entre un 15 a 20% con la elevación de la superficie del agua y la presión del aire. Vale mencionar que el autor hace un detallado importante en la implementación del OWC Ocean Falls, aporta planos, códigos computacionales de manera tal que sirva para interactuar con la programación y simulación en CFD.

1.2 Identificación y descripción del problema de estudio

El problema principal se discute en el diseño y prueba de las Columnas de Agua Oscilante (OWC) fijo respecto a su potencial de convertir la energía de las olas en energía eléctrica. Hay OWC fijas, flotantes, amarradas, entre otras configuraciones que hasta se complementan con plataformas offshore, pero la dificultad es conseguir un buen desempeño con la proyección de un dispositivo que obtenga el mayor flujo posible como producto de la diferencia en una columna de agua, tomando en cuenta la altura y longitud de una ola.

Investigaciones apuntan que los problemas en el diseño de las OWC fijas se reflejan en las pérdidas de energía en vórtices por disipación viscosa, esta llega hasta el 8% del desarrollo de la onda incidente, aquella que interactúa con la OWC. Esta pérdida es predecible con simulación del campo de velocidades que forma el flujo en la cámara interna del dispositivo. Sin embargo, aparece otro problema, la comprensión de la hidrodinámica de los OWC, es decir, entender la influencia de las características de la ola en la toma de fuerza y como es reflectada la onda y como varía la disipación de energía.

Hay un largo camino para desarrollar diseños de OWC más eficientes, el problema es que se gasta mucho recurso económico y humano con la prueba de prototipos experimentalmente, por lo que se opta por la simulación numérica en CFD para modelar la dinámica de fluidos de ondas regulares e irregulares incidentes al OWC.

La Columna de Agua Oscilante (OWC) fija es una tecnología joven en comparación con la exploración y conocimiento de otras fuentes de energía renovables, se asocian altos costos en su fabricación, implementación y generación de electricidad, por lo que se está

invirtiendo en la simulación numérica para nivelar costos de energía con un dispositivo más eficiente, además de haber zonas en el litoral peruano con potencial undimotriz para aprovechar las energías de las olas y traer beneficio y desarrollo a pueblos o ciudades con una energía limpia y sostenible.

Algunos de los problemas comunes en el diseño de OWC fija son:

1. La complejidad fluidodinámica del entorno alrededor de los dispositivos de OWC es resultado de la interacción entre las olas y las estructuras, lo que dificulta la predicción y modelado de la turbulencia, presión hidrodinámica y fuerzas en el dispositivo. Se requieren análisis detallados y simulaciones numéricas precisas para comprender y mejorar su comportamiento.
2. La variabilidad de las olas, una fuente de energía intermitente y fluctuante presenta desafíos en el diseño de los OWC para adaptarse a diversas condiciones de oleaje. Es esencial desarrollar dispositivos que operen eficientemente en una amplia gama de situaciones de olas.
3. La implementación de dispositivos de OWC en el ambiente marino causa impactos ambientales, como alteración de hábitats marinos y afectación de la vida acuática. Es necesario tomar medidas de mitigación y realizar evaluaciones ambientales para asegurar un desarrollo responsable y sostenible.
4. Los dispositivos de OWC deben resistir las fuerzas y cargas generadas por las olas y el ambiente marino, lo que podría requerir el uso de materiales y técnicas de construcción adecuadas para garantizar su durabilidad y seguridad a largo plazo.
5. Los costos asociados al diseño, construcción e instalación de dispositivos de OWC pueden ser elevados. Se deben buscar soluciones que reduzcan los

costos y mejoren la viabilidad económica para competir con otras fuentes de energía establecidas.

6. La ubicación de dispositivos de OWC en el océano podría afectar actividades marítimas como la navegación y la pesca. Se debe considerar cuidadosamente su emplazamiento para evitar conflictos y colaborar con otras industrias marítimas.
7. El desarrollo de dispositivos de OWC requiere cumplimiento con regulaciones y la obtención de permisos específicos, lo que puede ser un proceso complejo y demorado que afecta el tiempo de implementación y la viabilidad del proyecto.
8. Algunas tecnologías de OWC enfrentan desafíos en cuanto a su capacidad para generar grandes cantidades de energía. Es fundamental desarrollar tecnologías escalables que permitan su implementación a gran escala para maximizar su potencial de generación de energía de las olas.

Superar estos problemas y desafíos en el diseño de dispositivos de Columna de Agua Oscilante fija es fundamental para lograr una integración exitosa y efectiva de la energía de las olas como una fuente renovable y sostenible de energía. Se requiere un enfoque multidisciplinario que combine la ingeniería, la ciencia ambiental y la colaboración con las comunidades locales y las autoridades reguladoras para garantizar un desarrollo responsable y sostenible de esta tecnología prometedora.

1.3 Formulación del problema

1.3.1 Problema General

¿Es posible que la caracterización hidrodinámica de una Columna de Agua Oscilante (OWC) fija, utilizando simulaciones numéricas, optimice la conversión de energía oceánica en energía eléctrica?

1.3.2 Problemas Específicos

Así también, los problemas específicos se formulan con las siguientes

1. ¿Cuáles son las variaciones geométricas óptimas de una Columna de Agua Oscilante (OWC) fija para adaptarse a diferentes escenarios de comportamiento de la ola incidente y maximizar la captura de energía?
2. ¿Cómo se establecen las dimensiones precisas y las condiciones de frontera para realizar simulaciones CFD en una superficie 2D que represente de manera adecuada el comportamiento del flujo en una Columna de Agua Oscilante (OWC) fija?
3. ¿Cómo se cuantifican la velocidad del aire generada por la oscilación del nivel del agua en diferentes escenarios de comportamiento de una Columna de Agua Oscilante (OWC) fija y cómo esta velocidad se relaciona con la conversión efectiva de energía oceánica?

1.4 Justificación e importancia

La caracterización hidrodinámica de una Columna de Agua Oscilante (OWC) fija para la conversión de energía oceánica a través de simulaciones numéricas es un área de investigación clave debido a su potencial para impulsar la eficiencia y desarrollo de la energía oceánica.

La energía proveniente del movimiento de las olas representa una valiosa fuente renovable y sostenible y se justifica el estudio de los convertidores de energía de las olas tipo OWC fija porque aprovechan la oscilación del agua dentro de una cámara para generar electricidad. La eficiencia y rendimiento de estos convertidores están íntimamente ligados a la interacción compleja entre el aire comprimido dentro de la cámara y las variaciones en el nivel del agua.

Son importante las simulaciones numéricas, pues ofrecen una plataforma esencial para la caracterización hidrodinámica de la Columna de Agua Oscilante. Estas simulaciones permiten modelar y analizar virtualmente el comportamiento fluidodinámico dentro de la cámara OWC, evaluando factores como la cinética del aire y el flujo de agua, presiones y velocidades, para optimizar el diseño y eficiencia del convertidor de energía

oceánica. La utilización de simulaciones numéricas evita la necesidad de pruebas costosas y complejas en condiciones marítimas reales. Ofrece la capacidad de modificar y estudiar diversos escenarios hidrodinámicos, permitiendo ajustes precisos en el diseño para maximizar la eficiencia energética y estabilidad del sistema.

Por otro lado, es importante el avance en la caracterización hidrodinámica de la Columna de Agua Oscilante (OWC) para el progreso de la energía oceánica. Proporciona información detallada sobre cómo interactúan el aire y el agua dentro del convertidor OWC, permitiendo optimizar su diseño para obtener un mayor rendimiento y eficiencia en la generación eléctrica. Además, contribuye al desarrollo tecnológico en el campo de las energías renovables, impulsando la viabilidad y competitividad de la energía de las olas como una fuente confiable y sostenible de electricidad.

1.5 Objetivos

1.5.1 Objetivo General

Realizar la caracterización hidrodinámica de una Columna de Agua Oscilante fija mediante simulación numérica para mejorar la conversión de energía oceánica en energía eléctrica.

1.5.2 Objetivo Específico

Como objetivos específicos, se tienen:

1. Evaluar las características geométricas de una Columna de Agua Oscilante (OWC) fija para escenarios de comportamiento de la ola incidente.
2. Establecer las dimensiones y condiciones de frontera del comportamiento del flujo mediante CFD para superficie 2D de una Columna de Agua Oscilante (OWC) fija.
3. Evaluar la velocidad de aire que se genera producto de oscilación del nivel de agua para escenarios de comportamiento de una Columna de Agua Oscilante (OWC) fija.

1.6 Hipótesis

1.6.1 Hipótesis General

La caracterización hidrodinámica de una Columna de Agua Oscilante (OWC) fija, a través de simulaciones numéricas, permite optimizar la conversión de energía oceánica en energía eléctrica, mejorando significativamente la eficiencia del sistema.

1.6.2 Hipótesis Específico

Como objetivos específicos, se tienen:

1. Diferentes variaciones geométricas en una Columna de Agua Oscilante (OWC) fija tendrán un impacto significativo en su capacidad para adaptarse a diversos escenarios de comportamiento de la ola incidente, influenciando así la eficiencia en la captura de energía.
2. La adecuada determinación de las dimensiones precisas y las condiciones de frontera para las simulaciones CFD en una superficie 2D que represente el comportamiento del flujo en una Columna de Agua Oscilante (OWC) fija será para comprender mejor los patrones de flujo y optimizar su eficiencia energética.
3. Existe una relación directa entre la velocidad del aire generada por la oscilación del nivel del agua en una Columna de Agua Oscilante (OWC) fija y la conversión efectiva de energía oceánica, siendo esta velocidad un factor determinante en la maximización de la eficiencia del sistema de conversión de energía.

1.7 Variables, dimensiones e indicadores

A continuación, la operacionalización de las variables.

Tabla 1*Operacionalización de variables*

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	OPERACIONALIZACIÓN		ESCALA DE MEDICIÓN
			DIMENSIONES	INDICADORES	
Variable dependiente (Y): Y1: Conversión de energía oceánica en energía eléctrica	Se refiere a la conversión de la energía que desarrolla el movimiento de las olas en energía eléctrica, por medio de la generación eléctrica a través de una Columna de Agua Oscilante fija.	Se mide cuantitativamente a través de evaluación cuantitativa se realiza a través de la capacidad de una Columna de Agua Oscilante (OWC) fija para transformar la energía cinética derivada del movimiento de las olas en forma de energía mecánica o eléctrica. Esta capacidad se representa mediante la eficiencia de la velocidad del aire para la conversión energética.	Potencia eléctrica generada Velocidad de aire	<ul style="list-style-type: none"> • Cantidad de energía producida • Velocidad de aire (m/s) 	<ul style="list-style-type: none"> • (W) • (m/s)
Variable independiente (X): X1: Caracterización hidrodinámica de una Columna de Agua Oscilante mediante simulación numérica	Se refiere al estudio detallado de las dimensiones geométricas, el flujo de condiciones y el comportamiento inherente de una Columna de Agua Oscilante fija en relación con las particularidades del entorno marino y las características de las olas mediante simulación numérica.	Se mide cuantitativamente mediante la evaluación de parámetros fundamentales, tales como las dimensiones geométricas óptimas de la OWC fija, la precisa representación del comportamiento del flujo utilizando herramientas como la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), y la medición de la generación de aire a partir de la oscilación del nivel de agua en la OWC. Todo esto se realiza con el propósito de mejorar la conversión de energía proveniente del océano a eléctrica.	Dimensiones geométricas de OWC fija Comportamiento de la ola Interacción de fases de simulación	<ul style="list-style-type: none"> • Altura, largo y diámetro de cámara OWC (m) • Diámetro de orificio de salida de aire de cámara OWC (m) • Altura y longitud de ola (m) • Frecuencia de ola (1/s) • Tipo de enmallado • Condiciones de contorno (m x m) • Dominio computacional • Perfil de velocidades del aire (m/s) 	<ul style="list-style-type: none"> • (m) • (m) • (m) • (s) • # de lados (4) • entrada, salida, atmósfera y paredes • m3 • m/s

1.8 Unidad de análisis

Se tiene como unidad de análisis una Columna de Agua Oscilante (OWC) fija, para estudiar su caracterización hidrodinámica en su efecto de generar velocidad de aire de salida para convertir energía neumática, por diferencia de columna de agua, en eléctrica por una turbina de aire. Se analizarán seis casos respecto a altura de ola y diámetro de orificio de la salida de aire.

1.9 Fuentes de información

Las fuentes de información son:

- Esquemas referenciales de convertidor de ola tipo Columna de Agua Oscilante (OWC) fija de la literatura de Heath (2012) y Goswami et al. (2018).
- Normas Técnicas Hidrográficas Nº 24.
- Teoría lineal de ondas (o teoría de Airy).

1.10 Tipo y nivel de investigación

1.10.1 Tipo de investigación

Considerando la posición de Hernández et al. (2014), la investigación es aplicada o técnica, pues analiza la relación entre la altura de las olas, la respuesta del nivel de agua en la columna de agua de la OWC y la velocidad del aire de salida. Además, contiene un enfoque explicativo al intentar comprender la caracterización hidrodinámica del OWC mediante la relación de estos resultados. El objetivo es mejorar la eficiencia de la conversión de energía neumática a eléctrica en una turbina de aire, con el propósito aplicado de optimizar el diseño y el rendimiento del dispositivo para la generación de energía eléctrica a partir de la energía de las olas.

1.10.2 Nivel de investigación

El nivel de investigación sería explicativo o causal, pues se enfoca en entender la relación causa-efecto entre la altura de las olas, la respuesta del nivel de agua en la columna del OWC y la velocidad del aire de salida. Se busca comprender cómo estas

variables influyen directamente en la conversión de energía neumática a eléctrica en una turbina de aire. Este enfoque intenta explicar cómo cambios en la altura de las olas inciden en la caracterización hidrodinámica del OWC, identificando la influencia de estos factores para optimizar la generación eléctrica a partir de la energía de las olas, buscando obtener la máxima eficiencia en la conversión de energía.

1.11 Método de diseño de la investigación

El método de diseño para la caracterización hidrodinámica de una Columna de Agua Oscilante (OWC) fija destinada a la conversión de energía eléctrica implica tanto un enfoque cuantitativo como cualitativo, principalmente basado en simulación numérica.

El enfoque cuantitativo implica la aplicación de modelos matemáticos y físicos para representar los fenómenos fluidodinámicos dentro de la columna de agua del OWC. Se utilizan ecuaciones que describen las leyes de la física, como la Teoría lineal de ondas, para calcular y predecir con precisión las variables clave, como las velocidades del aire y del agua, las presiones y las variaciones del nivel del agua. Estos modelos cuantitativos permiten obtener datos numéricos precisos y cuantificables sobre el comportamiento del flujo, proporcionando información valiosa para la optimización del diseño del OWC.

Por otro lado, el enfoque cualitativo se centra en comprender la dinámica del flujo en un sentido más descriptivo y visual. La simulación numérica también genera representaciones gráficas tridimensionales que muestran la distribución del flujo de aire y agua, permitiendo una visualización detallada de los patrones de flujo y otros fenómenos hidrodinámicos relevantes. Esta representación cualitativa facilita la comprensión intuitiva de cómo se comporta el flujo dentro del OWC y ayuda a identificar áreas de mejora en el diseño para una mejor conversión de energía.

En conjunto, la combinación de métodos cuantitativos y cualitativos, a través de simulación numérica, ofrece un enfoque integral para la caracterización hidrodinámica de una Columna de Agua Oscilante, lo que permite optimizar su diseño para una conversión más eficiente de energía eléctrica a partir de la energía de las olas marinas.

1.12 Población y muestra

La población y a su vez muestra, es la Columna de Agua Oscilante (OWC), también conocido en inglés como Oscillating Water Column (OWC). La selección de su diseño es inspirada de la información y el enfoque metodológico basados en los trabajos de Poercher et al. (2017) y Henriques et al. (2017) sobre el diseño y optimización de OWC, quienes se centraron en la maximización de la eficiencia en la captación de energía mediante el uso de diferentes configuraciones de orificios de salida de aire y la geometría de la garganta de flujo del OWC fija.

1.13 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se emplearán simulación numérica mediante el software de ingeniería Ansys Academic 2022 – Fluent, en la fase de preprocesamiento, se parametrizará un Columna de Agua Oscilante (OWC) fija de forma geométrica y se establecerá el enmallado, el dominio y contorno respecto al flujo circulante de agua. Se realizarán variaciones en la geometría del OWC y el comportamiento de la ola para obtener por un sensor de velocidad de salida de aire, el comportamiento del flujo de aire.

Se recolectará datos de las simulaciones y verificará el diseño óptimo evaluado en seis casos de estudio. Se desarrolla simulación numérica de forma iterativa y con tiempos de 30 segundos, el gasto computacional sí es sustancial, entre 3 a 4 horas de simulación del procesamiento, sin embargo, no se cuenta el tiempo por los errores en la simulación que alargarían el tiempo de análisis. Se presentarán seis casos para el estudio de análisis con tiempos relacionados al consumo computacional dada el equipo computacional.

1.14 Análisis y procesamiento de datos

El análisis de los datos es parte del paquete de procesamiento de Ansys Academic 2022 – Fluent, por lo que se recopilará los resultados y se analizará un diagrama de barras comparativo de velocidades de aire en el sensor para cada caso simulado. Son seis los casos que se presentarán y una metodología de comportamiento de fluidos por la teoría lineal de ondas (o teoría de Airy).

Por último, las simulaciones han sido realizadas en el software Ansys Academic 2022 disponible por la Biblioteca Central desde el 2022, bajo supervisión de docente encargado para disponer de un computadora especial con el paquete Fluent instalado.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

En este capítulo, se abordarán los fundamentos teóricos necesarios para comprender el funcionamiento y el potencial de los sistemas basados en la energía de las olas. Se examinarán tanto las ventajas como las barreras que presentan estas fuentes de energía, que se consideran una de las alternativas más prometedoras dentro del campo de las energías renovables. Posteriormente, se describirá el funcionamiento de un dispositivo específico, la Columna de Agua Oscilante (OWC) fija, detallando su geometría y sus principios operativos.

Además, se presentarán enfoques de optimización para maximizar la eficiencia del sistema OWC, así como los métodos y análisis en dos dimensiones (2D) que se utilizan para simular su rendimiento en condiciones controladas. Otro aspecto crítico que se discutirá son las condiciones de diseño que deben ser tomadas en cuenta para garantizar que el sistema sea funcional y eficiente. Finalmente, se analizará la aplicación de la dinámica de fluidos computacional (CFD) como una herramienta esencial para la modelización y simulación del comportamiento del fluido en el interior de la columna de agua, lo que permite evaluar su efectividad antes de su implementación real.

2.1 Energía de las olas

La energía de las olas, también conocida como energía undimotriz o energía del océano, proviene del movimiento ondulatorio de las olas en el océano, generado principalmente por la fuerza del viento. Es una forma de energía renovable con gran potencial para la generación de electricidad y la reducción de los combustibles fósiles. Se

captura mediante sistemas de conversión de energía de las olas (WECs), que transforman el movimiento de las olas en energía mecánica y luego en electricidad a través de generadores eléctricos.

Existen diversas tecnologías de WECs en desarrollo, como dispositivos flotantes, sistemas de presión del agua, turbinas sumergidas y columnas de agua oscilantes. Cada tecnología presenta ventajas y desafíos específicos que están siendo investigados para mejorar su eficiencia y viabilidad económica.

La energía de las olas tiene beneficios como su naturaleza renovable y predecible, ya que las olas son generadas por el viento, impulsado por el sol, lo que la convierte en una fuente inagotable de energía. Sin embargo, enfrenta desafíos debido a los altos costos y mantenimiento en ambientes marinos extremos, así como a restricciones geográficas y ambientales para su despliegue.

A pesar de los desafíos, se espera que la continua investigación y desarrollo, junto con una mayor implementación, contribuyan a su viabilidad y competitividad. La energía de las olas muestra un gran potencial para ofrecer una fuente limpia y sostenible de energía, ayudando a diversificar el suministro energético y enfrentar los desafíos del cambio climático.

2.1.1 Potencial

El potencial de la ola es generado por el viento sobre la superficie del mar u océano. Debido a este origen natural, la energía de las olas no se distribuye homogéneamente sobre la superficie terrestre. Se han realizado múltiples estimaciones de la energía potencial total de las olas y, según autores, se estiman entre 18,000 a 32,000 TWh/año. Sin embargo, no todo llega a la costa, ya que la energía se disipa por la fricción y el rompimiento de las olas, lo que significa que el potencial real que llega a la costa es menor por lo que se recomienda aprovechar la energía a 30 millas náuticas o por el rompimiento de olas. La energía de las olas disponible podría representar alrededor del 10% del consumo mundial de energía.

Otra definición del potencial de la energía de las olas es la cantidad teórica de energía que es capturada y convertida en electricidad a partir del movimiento ondulatorio de las olas en los océanos. Representa la máxima cantidad de energía que es extraída de las olas en una determinada área y periodo de tiempo, considerando condiciones ideales y sin limitaciones tecnológicas.

El potencial de la energía de las olas depende de varios factores, como la ubicación geográfica, la extensión de la zona costera y la intensidad y frecuencia de las olas. Lugares con fuertes vientos y grandes extensiones de aguas oceánicas tienen un mayor potencial de energía de olas, ya que la interacción entre el viento y el agua crea olas más intensas y constantes.

Estimaciones del potencial de la energía de las olas sugieren que es una fuente considerable de energía renovable a nivel mundial. Sin embargo, su aprovechamiento y desarrollo aún enfrentan desafíos tecnológicos, económicos y ambientales. La industria de energía undimotriz está en constante evolución, y se realizan investigaciones y pruebas para mejorar la eficiencia y viabilidad de los sistemas de conversión de energía de las olas.

El potencial de la energía de las olas ofrece una oportunidad significativa para diversificar el mix energético y reducir la dependencia de los combustibles fósiles, lo que contribuye a la mitigación del cambio climático y promover una transición hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles. Sin embargo, el desarrollo de la energía de las olas requiere una planificación cuidadosa, considerando aspectos ambientales, sociales y económicos, para asegurar un aprovechamiento responsable y efectivo de este recurso natural.

2.1.2 Barreras

Las barreras para la implementación de la energía de las olas como fuente de energía sostenible a nivel mundial incluyen la falta de tecnología madura y rentable, la falta de políticas y regulaciones claras y estables, la falta de financiamiento y apoyo

gubernamental, la falta de infraestructura adecuada y la falta de aceptación pública y social.

La energía de las olas presenta varias barreras y desafíos que dificultan su plena adopción y desarrollo a gran escala. Algunas de las principales barreras son las siguientes:

1. Desde el punto de vista tecnológico, la captura y conversión de la energía de las olas está en constante desarrollo y mejora. Aunque existen diversos diseños de sistemas de conversión de energía de las olas (WECs), aún no hay una tecnología dominante y completamente madura que sea económicamente viable a gran escala.
2. Los costos asociados con la instalación y operación de WECs son significativos, especialmente en ambientes marinos extremos. Los altos costos de desarrollo, fabricación, instalación y mantenimiento dificultan la competitividad de la energía de las olas en comparación con otras fuentes de energía establecidas y más económicas.
3. La implementación de WECs en el entorno marino tiene impactos ambientales, como la alteración de hábitats marinos y el efecto en la vida acuática. Por lo tanto, es esencial llevar a cabo una evaluación cuidadosa de los impactos ambientales y considerar medidas de mitigación para garantizar un desarrollo responsable y sostenible de la energía de las olas.
4. La ubicación de WECs en el océano interfiere con otras actividades marítimas, como la navegación, la pesca y el turismo. Esta situación genera conflictos de uso del espacio marino y requerir la colaboración y coordinación con otras industrias para abordar adecuadamente estas cuestiones.
5. La energía de las olas posee una naturaleza intermitente y fluctuante debido a la variabilidad en el movimiento de las olas. Esto presenta desafíos en su integración en la red eléctrica y podría requerir soluciones de almacenamiento o combinación con otras fuentes de energía renovable para garantizar un suministro energético estable.

6. El potencial de energía de las olas varía según la ubicación geográfica y la geología costera. No todas las regiones tienen un potencial adecuado para la energía de las olas, lo que limita su despliegue en áreas específicas y requerir una planificación cuidadosa para su implementación exitosa.

A pesar de estas barreras, la energía de las olas sigue siendo una prometedora fuente de energía renovable y sostenible. A medida que la tecnología avanza, se superan obstáculos y se realizan inversiones en investigación y desarrollo, es posible que la energía de las olas juegue un papel importante en la transición hacia un sistema energético más limpio y sostenible.

2.2 Dispositivo de Columna de Agua Oscilante (OWC)

La Columna de Agua Oscilante (OWC, por sus siglas en inglés) es uno de los muchos tipos de convertidores de energía de las olas. Funciona mediante la captura de la energía de las olas en una cámara de aire que se encuentra encima del nivel del agua. Cuando las olas entran en la cámara, el aire es comprimido y cuando las olas salen, el aire se expande. Esta oscilación del aire se utiliza para hacer girar una turbina que genera electricidad. La OWC es un dispositivo pasivo, lo que significa que no tiene partes móviles en contacto con el agua, lo que lo hace más resistente y duradero en comparación con otros dispositivos de energía de las olas.

La OWC utiliza el principio de capturar la energía de las olas en una cámara de aire, que luego se utiliza para impulsar una turbina y generar electricidad. La tecnología se ha utilizado para diferentes propósitos en el pasado, como en boyas silbantes y boyas emisoras de luz, pero desde entonces se ha desarrollado y optimizado para la generación de energía.

Siendo un dispositivo ingenioso que aprovecha el movimiento de las olas del mar para generar energía eléctrica de manera sostenible y renovable. El Principio de funcionamiento es como sigue:

- Una sección de la estructura se sumerge parcialmente en el agua.

- Cuando una ola se aproxima e incide, el nivel del agua dentro de la columna varía, elevando la columna de agua.
- Por encima del nivel del agua en la columna, hay una cámara de aire cerrada.
- Cuando el nivel del agua sube debido a una ola, el aire en la cámara se comprime. De manera similar, cuando el nivel del agua baja, el aire se expande.
- La compresión y expansión del aire crean un flujo de aire bidireccional dentro de la cámara.
- Este flujo de aire se canaliza a través de una turbina especial situada en la parte superior de la cámara.
- La turbina está conectada a un generador eléctrico. El flujo de aire, al pasar por la turbina, hace que esta gire, generando electricidad.

2.2.1 Eficiencia de conversión de OWC

La eficiencia de conversión en una Columna de Agua Oscilante (OWC) se evalúa considerando la relación entre la energía eléctrica generada y la energía cinética total contenida en las olas del mar. Se describen los pasos y acciones para calcularla:

1. Captura de energía de las olas
 - Una parte de la estructura de la OWC se sumerge en el agua.
 - Cuando una ola se aproxima, el nivel del agua dentro de la columna varía debido a la oscilación de la ola.
 - La onda incidente provoca una elevación de la columna de agua, comprimiendo el aire interno en la cámara superior.
2. Generación de flujo de aire
 - La compresión y expansión del aire crean un flujo de aire bidireccional dentro de la cámara.
 - Este flujo de aire se canaliza a través de una turbina especial ubicada en la parte superior de la columna.
3. Conversión en energía eléctrica

- La turbina está conectada a un generador eléctrico.
- El flujo de aire, al pasar por la turbina, hace que esta gire, generando electricidad.

4. Cálculo de eficiencia

- La eficiencia se calcula como la relación entre la energía eléctrica generada y la energía cinética total de las olas incidentes.
- Matemáticamente, la eficiencia (η) se expresa como:

$$\eta = \frac{E_{eléctrica}}{E_{cinética}}$$

5. Ventajas y desafíos

- Las OWC aprovechan una fuente inagotable y limpia de energía.
- Los desafíos son respecto a la corrosión e incrustaciones que reducen la eficiencia de conversión, cuyo tratamiento conviene en utilizar materiales resistentes como también en la mejora del diseño de la turbina.

2.2.2 Impacto de la OWC en la conversión de energía

En esta sección se presentan componentes relacionados al impacto que la OWC genera en la conversión de energía:

1. Influencia del OWC en la energía del aire y eléctrica

- Cuando una ola se aproxima, el nivel del agua dentro de la columna OWC varía debido a la oscilación de la ola.
- La onda eleva la columna de agua, comprimiendo el aire en la cámara superior.
- La compresión y expansión del aire crean un flujo de aire bidireccional dentro de la cámara.
- Este flujo de aire se canaliza a través de una turbina especial ubicada en la parte superior de la columna.
- La turbina, conectada a un generador eléctrico, convierte el flujo de aire en energía eléctrica.

2. Mejora de la energía eléctrica mediante simulación numérica
 - La simulación numérica por la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) evalúa y optimiza el diseño de la OWC.
 - Se modelan las características geométricas y las condiciones de frontera del flujo de aire y agua para interpretación de la interacción de las dos fases.
 - La simulación determina la eficiencia de conversión e identifica áreas de mejora.
3. Conversión de energía de las olas: mecánica y eléctrica
 - La energía cinética contenida en las olas se convierte en energía mecánica al elevar la columna de agua.
 - El flujo de aire generado por la OWC convierte esta energía mecánica en energía eléctrica.
 - La turbina, al girar, activa el generador eléctrico, produciendo electricidad.
4. Caracterización del aire: presión, temperatura, velocidad y cambios de energía
 - La presión del aire en la cámara varía con la oscilación de la columna de agua.
 - La temperatura también afecta la densidad del aire y, por lo tanto, su capacidad para generar energía.
 - La velocidad del flujo de aire es crucial para la eficiencia de conversión.
 - Los cambios de energía se reflejan en la compresión y expansión del aire.
5. Reducción de costos mediante optimización de la OWC
 - Diseñar una OWC optimizada reduciría futuros costos de instalación y mantenimiento.
 - La simulación numérica ajusta parámetros para maximizar la eficiencia.
 - Materiales resistentes a la corrosión y mejoras en las turbinas contribuyen a la optimización.

2.3 Enfoque de optimización

El enfoque de optimización con relación a la energía de las olas es reducir el costo de la energía producida por los convertidores de energía de las olas, específicamente los dispositivos de Columna de Agua Oscilante (OWC), a través de la optimización estructural. Esto se logra mediante la evaluación de la estructura en condiciones de oleaje de diseño y la determinación de si está sobredimensionada. Si es así, se estima el grado de sobredimensionamiento y determinar la cantidad de material que podría haberse utilizado menos. Además, se cambia la geometría de la estructura para influir en la presión a lo largo de las diferentes paredes y mejorar el rendimiento energético del dispositivo.

2.3.1 Métodos

Hay dos categorías de métodos para reducir el costo de la energía producida por los convertidores de energía de las olas, específicamente los dispositivos de Columna de Agua Oscilante (OWC): reducción de costos o aumento de la producción. En este caso, se enfoca en la primera categoría, específicamente en la optimización de diseño y los dos métodos para lograr esto:

- a) analizar el diseño en su estado actual para determinar si está sobrediseñada y, de ser así, estimar el grado de sobrediseño y reducir el grosor requerido para la sección transversal.
- b) cambiar la geometría del diseño para influir en la presión a lo largo de las diferentes paredes y monitorear el rendimiento energético del dispositivo.

2.3.2 Análisis 2D

El método de análisis 2D específico para convertidores de energía de las olas, específicamente dispositivos de Columna de Agua Oscilante, es crear un modelo numérico para una geometría de OWC que sea contenida en un dominio tanto fluido como sólido, y se realicen simulaciones automáticamente capturando la interacción fluida-estructura requerida. Los dos dominios están acoplados unidireccionalmente, de fluido a estructura. Las olas se generan en la entrada y se propagan al OWC. En la interfaz, las presiones se

asignan directamente a la estructura como cargas externas. Las presiones dan como resultado una distribución de tensiones 3D completa en la estructura. Luego se extraen para su posterior análisis.

2.4 Condiciones de diseño

Las condiciones de diseño se refieren a las condiciones ambientales extremas, como la altura de las olas y la velocidad del viento, que se utilizan para diseñar y dimensionar los dispositivos de Columna de Agua Oscilante (OWC) y otros convertidores de energía de las olas. Estas condiciones son importantes para garantizar que los dispositivos sean capaces de soportar las cargas extremas y funcionar de manera segura y eficiente en condiciones de oleaje extremo. En el contexto del análisis de optimización estructural de los dispositivos OWC, se utilizan las condiciones de diseño para modelar el comportamiento estructural del dispositivo bajo cargas extremas y determinar si el dispositivo está sobredimensionado o si se optimiza su diseño para reducir los costos de materiales.

2.5 Dinámica de fluidos computacional (CFD)

La dinámica de fluidos computacional, en sus siglas en inglés CFD, se utiliza en el análisis de convertidores de energía de las olas, específicamente dispositivos de Columna de Agua Oscilantes, para simular la interacción entre las olas y el dispositivo. En el caso de los dispositivos de Columna de Agua Oscilante, se utiliza CFD para modelar el comportamiento de la columna de agua y el flujo de aire a través de la turbina. Esto permite a los investigadores estudiar el comportamiento hidrodinámico del dispositivo y optimizar su diseño para la máxima producción de energía.

En particular, se crea un modelo numérico utilizando el software CFD, que contiene un dominio tanto fluido como sólido. Los dos dominios están acoplados unidireccionalmente, de fluido a estructura. Con esto, las simulaciones se realizan automáticamente capturando la Interacción Fluido-Estructura requerida. Las olas se generan en la entrada y se propagan al OWC. En la interfaz, las presiones se asignan

directamente a la estructura como cargas externas. Las presiones dan como resultado una distribución de tensiones 3D completa en la estructura. Luego se extraen para su posterior análisis.

En general, CFD es una herramienta valiosa para analizar el rendimiento de los convertidores de energía de las olas y ayuda a los investigadores a optimizar sus diseños para la máxima producción de energía.

La aplicación y ampliación de la simulación numérica y aspectos matemáticos se ampliarán en el capítulo 3 del desarrollo de la tesis.

CAPÍTULO III

DESARROLLO DE LA TESIS

En este capítulo se desarrollará en detalle el sistema de Columna de Agua Oscilante (OWC), también conocido en inglés como Oscillating Water Column (OWC). El análisis se enfocará en la geometría del OWC, la matemática empleada para modelar su funcionamiento, y las simulaciones realizadas mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD). La información y el enfoque metodológico están basados en los trabajos de Poercher et al. (2017) sobre el diseño y optimización de OWC, así como en Henriques et al. (2017), quienes se centraron en la maximización de la eficiencia en la captación de energía mediante el uso de diferentes configuraciones de orificios de salida de aire y la geometría de la garganta de flujo. Estos estudios resultan particularmente útiles para definir las variables clave que afectan el rendimiento de una OWC fija en condiciones específicas.

3.1 Geometría del Columna de Agua Oscilante fija

La geometría de la Columna de Agua Oscilante (OWC) es crucial para su operación eficiente, ya que determina cómo interactúan las olas con el sistema, y cómo el aire es comprimido y liberado a través de la turbina. El diseño más común de una OWC fija no incluye partes móviles en el agua, lo que mejora significativamente la durabilidad del sistema y reduce los costos de mantenimiento, ya que el diseño está optimizado para aprovechar la energía del aire comprimido en la cámara. Según Heath (2012), este tipo de sistemas es ampliamente utilizado en costas donde la infraestructura debe ser robusta y

resistente a las condiciones ambientales cambiantes, maximizando la vida útil del equipo y minimizando los costos operativos.

La geometría juega un papel fundamental en la captación de energía, ya que la eficiencia de la OWC depende de cómo el agua y el aire interactúan dentro del sistema. Un diseño eficiente debe garantizar que las olas entrantes generen suficiente presión en la cámara de aire para impulsar la turbina, sin causar turbulencias excesivas que puedan reducir la eficiencia del sistema. Además, la forma de la estructura debe ser lo suficientemente robusta para resistir el impacto continuo de las olas sin comprometer la estabilidad del sistema. Por ello, las dimensiones y el diseño de los orificios de salida de aire y de la garganta de flujo son elementos clave que determinan el rendimiento general de la OWC.

3.1.1 Partes de una OWC fija

La Columna de Agua Oscilante fija tiene partes definidas, según Goswami et al. (2018), cuenta con los siguiente:

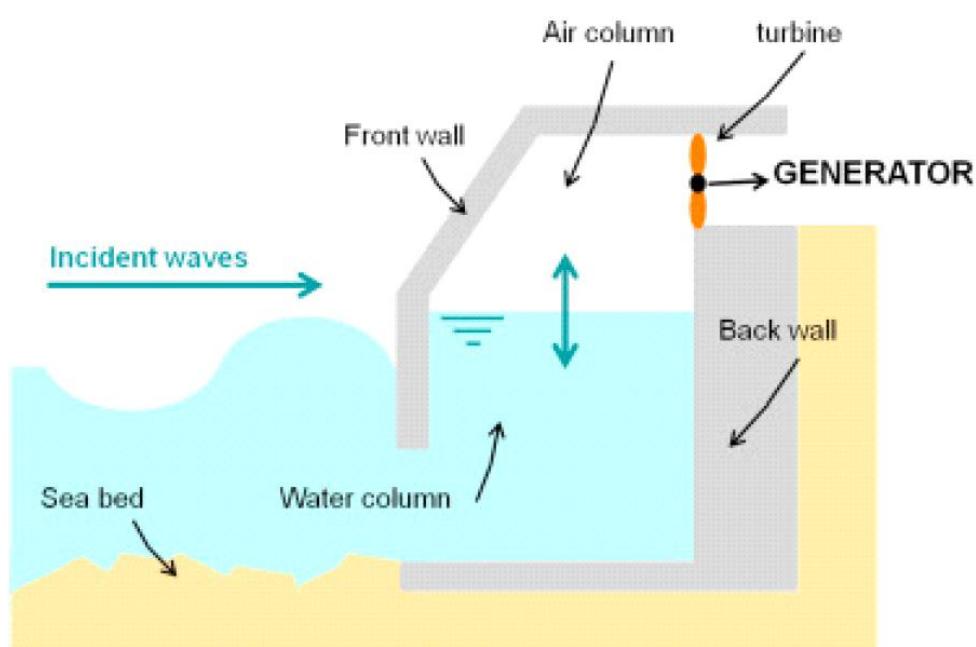
1. Pared frontal: Elemento estructural, usualmente de concreto, que protege la cámara de columna de agua. Es la superficie contra la que inciden las olas.
2. Pared trasera: Elemento estructural, también usualmente de concreto, que contiene la presión de la cámara de columna de agua y resiste el empuje del terreno, extendiéndose hasta la base en el lecho marino.
3. Olas incidentes: Desarrollo de olas que se dirigen a impactar con la pared frontal. Estas olas tienen una longitud y altura significativa, produciendo efectos hidrodinámicos.
4. Columna de agua: Subida y bajada del nivel del agua en respuesta a las olas incidentes dentro de una cámara entre la pared frontal y trasera.
5. Columna de aire: Variación del espacio de aire en la cámara entre la pared frontal y trasera, que genera una diferencia de flujo de aire liberado a través de una superficie pequeña y circular. Esta forma circular es óptima para maximizar

el flujo de aire a través de las aspas de la turbina, garantizando un mejor aprovechamiento de la energía.

6. Generador: Elemento electromecánico que convierte la energía neumática en eléctrica, generalmente utilizando una turbina de aire. Las aspas de la turbina están diseñadas para funcionar eficientemente con el flujo de aire dirigido a través de la apertura circular.

Figura 14

Esquema de Columna de Agua Oscilante fija



Nota: donde se señala turbina, el orificio es siempre circular. Fuente Goswami et al. (2018)

3.1.2 Relación de flujo de aire liberado con la energía de la turbina

En el contexto de la caracterización hidrodinámica de una Columna de Agua Oscilante fija, es fundamental entender cómo el flujo de aire liberado se relaciona directamente con la energía generada por la turbina. La Columna de Agua Oscilante (OWC, por sus siglas en inglés) funciona mediante el movimiento ascendente y descendente del agua en una cámara, lo que provoca la compresión y descompresión del aire en su interior. Este flujo de aire oscilante es el que impulsa una turbina, convirtiendo la energía neumática en energía eléctrica.

Cuando las olas inciden sobre la pared frontal de la cámara de columna de agua, el nivel del agua dentro de la cámara sube y baja en sincronía con las olas. Este movimiento alterno del agua causa una compresión y descompresión del aire atrapado en la cámara superior, generando un flujo de aire oscilante. La superficie pequeña y circular por donde se libera este flujo de aire está diseñada específicamente para maximizar la eficiencia de la turbina.

Relación del flujo de aire y la energía

1. Volumen de aire desplazado: La cantidad de aire desplazado en cada ciclo de las olas es directamente proporcional a la amplitud y frecuencia del movimiento del agua en la cámara. Un mayor volumen de aire desplazado implica un mayor flujo de aire, lo que potencialmente genera más energía.
2. Velocidad del aire: La velocidad del aire a través de la apertura circular influye significativamente en la cantidad de energía que se extrae. Una mayor velocidad del aire incrementa la fuerza que actúa sobre las aspas de la turbina, mejorando la eficiencia de conversión energética.
3. Presión del aire: La diferencia de presión generada dentro de la cámara, debido a la oscilación del agua, afecta la potencia del flujo de aire. Una mayor diferencia de presión resulta en un flujo de aire más potente, que sería más eficazmente convertido en energía mecánica por la turbina.
4. Diseño de la apertura y turbina: La forma circular de la apertura está optimizada para asegurar un flujo de aire uniforme y concentrado sobre las aspas de la turbina. Este diseño minimiza las pérdidas por turbulencia y maximiza la transferencia de energía del aire a la turbina. Las aspas de la turbina están diseñadas para capturar la energía del aire de manera eficiente, convirtiendo el flujo de aire oscilante en rotación mecánica.

El flujo de aire liberado en la cámara de la OWC para la conversión eficiente de la energía oceánica en energía eléctrica. Los parámetros hidrodinámicos, como la frecuencia y amplitud de las olas, junto con el diseño de la cámara y la turbina, determinan la cantidad

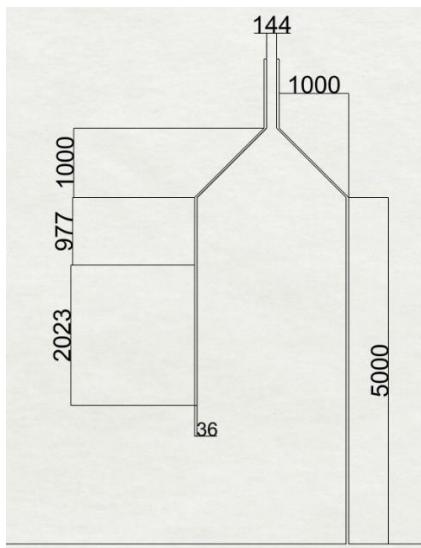
de energía que es capturada. Sin embargo, en la presente tesis no estudiará el diseño de la turbina como de su eficiencia, asumiéndose que es eficaz y que el interés de este trabajo es sobre la mejor opción de diseño del OWC fijo que presente mejor flujo de aire de salida.

3.1.3 Dimensiones principales de una OWC fija

Las dimensiones principales de la Columna de Agua Oscilante (OWC) fija son fundamentales para comprender cómo el sistema interactúa con el flujo de aire y agua. Estas dimensiones se pueden observar en la Figura 15, que ilustra el diseño básico del sistema en un plano transversal. En esta figura se destacan las alturas y longitudes clave de la estructura OWC, necesarias para el análisis y la posterior simulación.

Figura 15

Vista Transversal de las Dimensiones de la Columna de Agua Oscilante Fija



En el desarrollo experimental, las dimensiones del **orificio de salida de aire**, una de las variables más importantes del sistema, se han establecido en tres diámetros diferentes: **8 cm, 14 cm y 20 cm**. Estas variaciones permitirán analizar cómo el tamaño del orificio afecta la eficiencia del sistema en la conversión de energía, dado que el flujo de aire es fundamental para la transferencia de energía desde la columna de agua hasta la turbina. Además, estas dimensiones influirán en la dinámica del flujo y en la presión dentro de la cámara de aire, lo que impactará directamente en el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones de operación.

3.2 Simulación por CFD de una OWC fija

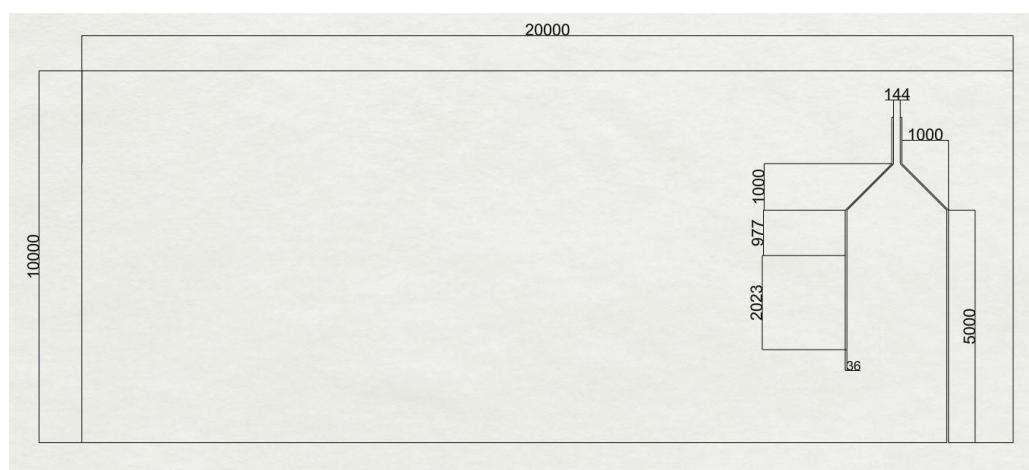
La simulación por Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), realizada mediante el software ANSYS Academic - Fluent, permite estudiar el comportamiento del flujo en una columna de agua oscilante (OWC) en dos dimensiones. El análisis CFD es una herramienta clave para predecir cómo se comportará el aire al interactuar con las olas y el sistema en general, proporcionando una visión detallada del comportamiento hidrodinámico.

3.2.1 Geometría y dominio

Para esta simulación, se utilizó un dominio computacional de 20 metros de largo por 10 metros de ancho, lo que abarca el sistema OWC y una porción representativa del medio acuático circundante. La elección de una geometría 2D se debe a que ofrece un balance adecuado entre precisión y eficiencia computacional, ideal para realizar análisis comparativos en simulaciones de fluidos bidimensionales. Esta disposición geométrica se muestra en la Figura 16, donde se aprecian claramente las dimensiones utilizadas para el análisis.

Figura 16

Configuración del dominio computacional de la simulación OWC



La estructura del dominio permite representar cómo el aire y el agua interactúan a lo largo de la columna oscilante, proporcionando un contexto para evaluar la transferencia de energía y la dinámica del flujo en el sistema. El diseño del dominio asegura que las

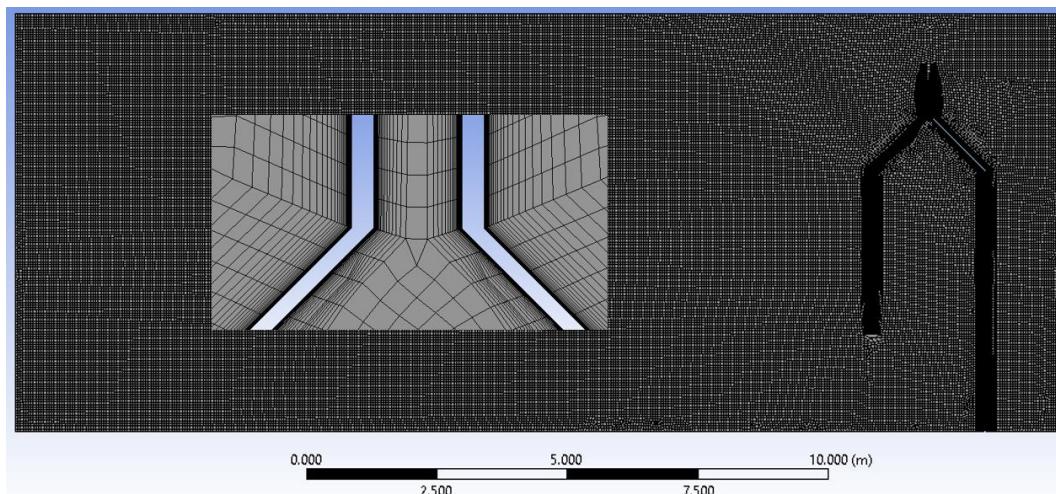
condiciones de contorno estén correctamente definidas para evitar errores en la simulación y garantizar que los resultados sean representativos.

3.2.2 Enmallado

El proceso de enmallado del dominio es fundamental para lograr una simulación precisa. En este caso, se ha utilizado un enmallado estructurado cuadrangular, adecuado para simulaciones en 2D. Este tipo de malla es particularmente eficaz en geometrías regulares y permite un mayor control sobre la distribución de los elementos, lo que facilita la resolución de las ecuaciones de flujo. La malla utilizada, mostrada en la Figura 17, está cuidadosamente diseñada para capturar los detalles del flujo tanto en el interior del sistema OWC como en el medio circundante.

Figura 17

Esquema de enmallado del sistema de Columna de Agua Oscilante



El enmallado tiene una distribución más fina en las áreas cercanas al orificio de salida del sistema y en las regiones donde se espera mayor variación de velocidad y presión. Esto asegura que las variaciones rápidas en el comportamiento del aire y el agua sean modeladas con precisión, mejorando así la confiabilidad de los resultados obtenidos. Un enmallado adecuado permite que las simulaciones CFD logren resultados más precisos y detallados, especialmente en áreas donde se producen mayores gradientes de velocidad o presión.

3.2.3 Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera son esenciales para definir cómo interactúan las distintas regiones del dominio de simulación con su entorno. Estas condiciones se configuraron durante la etapa de preprocesamiento para establecer el flujo de aire dentro del sistema, tal como se muestra en la Figura 18. Las condiciones comprenden varios elementos importantes: la entrada del flujo (inlet), la salida (outlet), las paredes del sistema (wall) y la atmósfera circundante (atm), que juega un papel en la presión exterior al sistema. En este contexto, la configuración adecuada de estos parámetros es crítica para simular con precisión el comportamiento del aire en el interior de la columna de agua oscilante (OWC).

Figura 18

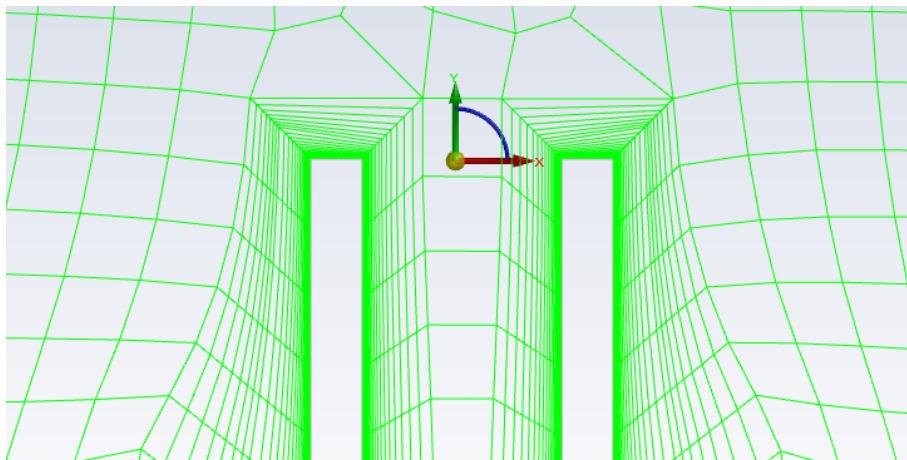
Esquema de condiciones de frontera en el sistema OWC fijo



Además, se posicionó un sensor de monitoreo de velocidad del aire en el orificio de salida de la cámara de la columna de agua. Este sensor, mostrado en la Figura 19: Posicionamiento del Sensor de Velocidad de Aire en la Salida, es fundamental para registrar el comportamiento dinámico del flujo de aire a medida que entra y sale del sistema. El sensor proporcionará datos sobre la velocidad del aire durante toda la simulación, permitiendo analizar con precisión cómo las variables del sistema afectan el flujo a través de la apertura. Este monitoreo continuo es clave para evaluar la eficiencia del sistema OWC en convertir la energía del aire en energía utilizable.

Figura 19

Posicionamiento del sensor de velocidad de aire en la salida



3.3 Teoría lineal de ondas

Basado en la tesis de Soto (2024), menciona que la teoría de ondas de Airy, desarrollada en 1845, sigue siendo una de las más utilizadas para caracterizar el comportamiento de las olas en aplicaciones prácticas, aunque presenta ciertas limitaciones. Esta teoría asume varias hipótesis fundamentales. En primer lugar, se considera que el agua es homogénea e incompresible, lo que implica que su densidad se mantiene constante. También se asume que la tensión superficial puede ser despreciada, y que el efecto de Coriolis debido a la rotación terrestre no afecta significativamente el flujo de agua. Además, la presión en la superficie libre del mar es uniforme y constante, y el agua se comporta como un fluido sin viscosidad. El flujo es irrotacional, sin interacción con ningún otro movimiento. El fondo marino se considera horizontal, fijo e impermeable, lo que implica que no hay movimiento en la dirección vertical.

El modelo de ondas lineales desarrollado por Airy se basa en una serie de hipótesis que simplifican el análisis del comportamiento de las olas en la superficie del mar. Estas suposiciones son esenciales para facilitar la modelización matemática y obtener soluciones que describan el movimiento de las olas de manera precisa bajo condiciones controladas.

En primer lugar, se asume que el agua es homogénea e incompresible, lo que significa que la densidad del fluido, representada por ρ , permanece constante en todo

momento. Esta característica es clave, ya que permite aplicar las ecuaciones de continuidad y momento sin tener que considerar cambios en la densidad, lo que simplifica considerablemente los cálculos.

Además, la tensión superficial del agua puede ser despreciada, ya que, en el análisis de olas de gran escala, las fuerzas asociadas a la tensión superficial son insignificantes en comparación con las fuerzas iniciales y gravitacionales. Esto hace que las interacciones en la superficie del agua no afecten de manera considerable el comportamiento general de las olas.

Otro aspecto importante es que el efecto de Coriolis, debido a la rotación de la Tierra, también puede ser despreciado para el análisis de olas de corta longitud de onda o para regiones geográficas limitadas. Este efecto se vuelve relevante solo en el estudio de fenómenos a gran escala o en zonas cercanas a los polos, pero para olas típicas en la mayoría de los océanos, su influencia es mínima.

En cuanto a la superficie libre del mar, se asume que la presión es uniforme y constante. Esto implica que no hay diferencias significativas en la presión a lo largo de la superficie del agua, lo que contribuye a que las olas se comporten de manera predecible bajo las condiciones establecidas en el modelo.

También se considera que el agua no tiene viscosidad, es decir, se comporta como un fluido ideal. Esta hipótesis elimina la fricción interna del agua, permitiendo que las partículas del fluido se desplacen sin pérdida de energía debido a las interacciones viscosas, lo que resulta en un análisis más simple del flujo de las olas.

El flujo del agua se modela como irrotacional, lo que significa que las partículas de agua no giran sobre su propio eje mientras se desplazan. Esta suposición es válida en la mayoría de los escenarios en los que las olas son de pequeña amplitud y no generan grandes turbulencias, lo que permite utilizar el potencial de velocidad para describir el movimiento del agua.

En cuanto al fondo marino, se asume que es un límite horizontal, fijo e impermeable, lo que implica que no hay movimiento de agua a través de esta frontera. En consecuencia,

la velocidad vertical del agua en el fondo es nula, lo que simplifica el análisis de las interacciones entre las olas y el lecho marino.

La amplitud de las olas se considera pequeña en comparación con la longitud de onda, y su forma es invariable en el tiempo y en el espacio. Esto permite aplicar la teoría lineal de ondas, ya que las perturbaciones del agua son lo suficientemente pequeñas como para que el movimiento sea lineal y no afecte de manera significativa el comportamiento general del sistema.

Por último, se asume que las ondas son planas y bidimensionales, es decir, que su movimiento se restringe a un plano horizontal y vertical. Esto simplifica el análisis, ya que se puede ignorar cualquier variación en la dirección perpendicular al movimiento de las olas.

Estas hipótesis simplifican el análisis de muchos problemas relacionados con la dinámica de olas. A partir de estas simplificaciones, la teoría de Airy permite derivar ecuaciones que describen el comportamiento del agua bajo la acción de las olas, lo que es fundamental para diversas aplicaciones en ingeniería costera.

La ecuación fundamental que gobierna el comportamiento del flujo es la ecuación de continuidad.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{u}) = 0 \quad (1)$$

Bajo el supuesto de incompresibilidad del fluido, implica que no existe ningún cambio temporal en la densidad, es representada por ρ la densidad y \vec{u} el vector de velocidad se escribe como:

$$\nabla(\rho \vec{u}) = 0 \quad (2)$$

Esta ecuación establece que no hay acumulación ni pérdida de masa dentro del fluido, y que el volumen de agua permanece constante a lo largo del tiempo. Esto implica que, en cualquier punto del fluido, la suma de los flujos que entran y salen debe ser igual, lo cual es un principio clave para modelar la dinámica de fluidos.

En flujos irrotacionales, el movimiento del agua puede describirse utilizando un potencial de velocidad ϕ (x, z, t), del cual se derivan las componentes de la velocidad horizontal y vertical. Las expresiones que relacionan la velocidad con el potencial de velocidad son:

$$u = \frac{\partial \phi}{\partial x} \quad v = \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (3)$$

Estas ecuaciones permiten describir el movimiento del fluido en el plano horizontal-vertical. Dichas componentes reflejan cómo las partículas de agua se desplazan bajo la acción de las olas, proporcionando una forma práctica de calcular el flujo de agua en función de las variaciones en la superficie libre.

En cuanto a las condiciones de contorno, el fondo marino se asume como un límite rígido e impermeable. Esto impone la condición de que no debe haber flujo a través del fondo, lo que se traduce en la siguiente relación:

$$v = -\frac{\partial \phi}{\partial z} = 0 \quad \text{en } z = -d \quad (4)$$

Esta ecuación indica que la velocidad vertical es cero en el fondo, lo cual es esencial para garantizar la conservación de la masa en el sistema y evitar pérdidas de fluido. Esta condición es particularmente importante cuando se modelan interacciones de olas con fondos marinos planos y horizontales.

En la superficie libre, el movimiento de las partículas de agua debe coincidir con las variaciones de la superficie misma. Para modelar este comportamiento, se utiliza la siguiente ecuación de frontera libre:

$$\frac{\partial y}{\partial t} = -\frac{\partial \phi}{\partial z} = v \quad \text{en } z = y \quad (5)$$

Esta relación indica que la variación temporal de la superficie del agua está relacionada directamente con la velocidad vertical en la superficie. Es una condición clave para modelar correctamente el movimiento de las olas en la superficie libre del agua.

Finalmente, la presión en la superficie libre del agua se rige por la ecuación de Bernoulli, que establece un equilibrio entre la energía cinética, la energía potencial y la presión. En la superficie, esta ecuación se expresa como:

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = \frac{p}{\rho} + \frac{1}{2}(u^2 + w^2) + gz \quad (6)$$

Aquí, g es la aceleración debida a la gravedad y z representa la altura de la superficie libre. Esta ecuación proporciona una descripción completa del comportamiento de las partículas en la superficie bajo la influencia de las olas.

Las soluciones para este problema se asumen que son armónicas en el tiempo y se obtiene por separación de variables. Las soluciones tienen la siguiente forma:

$$\phi(t, x, z) = \frac{Hg}{2\omega} \cdot \frac{\cosh(k \cdot (z + d))}{\cosh(kd)} \cdot \cos(kx - \omega t) \quad (7)$$

La solución armónica de la superficie libre de las olas puede representarse mediante una función sinusoidal que combina las variables espaciales y temporales:

$$y(t, x) = H_o \cdot \cos(kx - \omega t) \quad (8)$$

donde H_o es la amplitud de la ola, k es el número de onda y $\omega(k)$ es la frecuencia angular. Estos parámetros están relacionados a través de la relación de dispersión, que describe cómo la frecuencia de las olas depende de su longitud de onda y de la profundidad del agua:

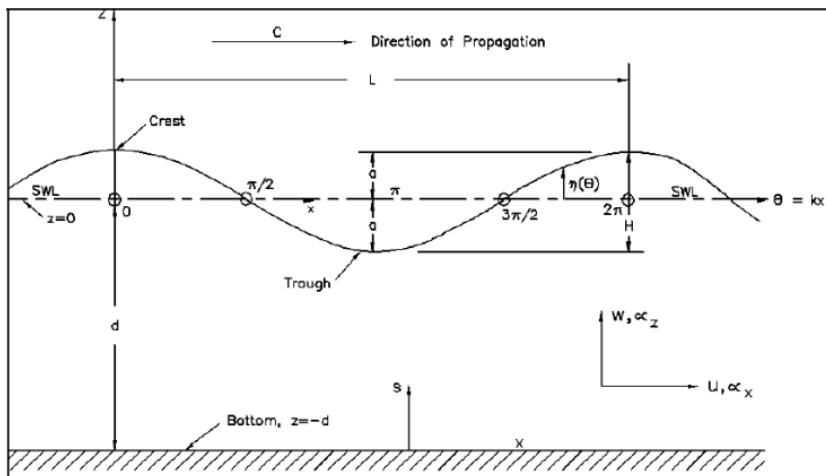
$$\omega^2(k) = kg \tan h(kd); \quad \text{donde } k = \frac{2\pi}{L} \quad (9)$$

Esta ecuación es fundamental para predecir el comportamiento de las olas en función de la profundidad del agua y la longitud de onda. La relación de dispersión establece que, a mayor profundidad, la velocidad de las olas aumenta, mientras que en aguas someras, la velocidad disminuye, lo que impacta en la forma y el comportamiento de las olas.

La Figura 20 muestra la propagación de una onda periódica en un medio acuoso, ilustrando el movimiento sinusoidal de la superficie del agua en un fondo horizontal fijo. Este gráfico es una representación visual del modelo teórico descrito anteriormente.

Figura 20

Onda de Airy



Nota: fuente Internet

Dado que la teoría de Airy es particularmente útil para el análisis de olas de pequeña amplitud, se ha seleccionado este modelo para su simulación numérica. El software utilizado para esta simulación es Ansys Fluent, que ofrece una interfaz gráfica que permite la configuración directa de parámetros como la longitud y la altura de las olas. La simulación se llevó a cabo en dos dimensiones, lo que reduce significativamente la demanda computacional en comparación con simulaciones en 3D.

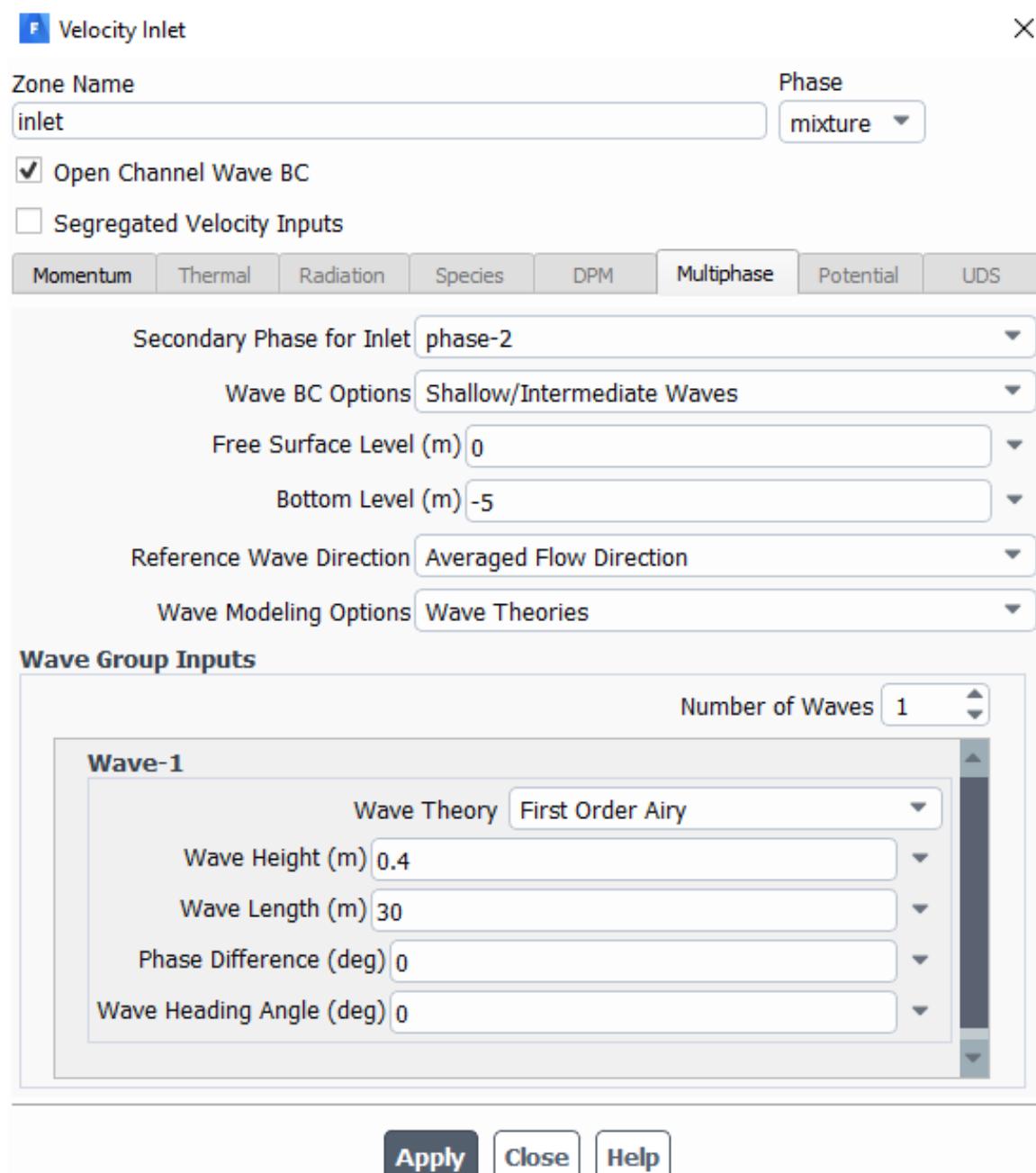
La Figura 21 ilustra cómo se introdujeron los parámetros para la primera simulación, con un énfasis en la elección de condiciones de contorno y la entrada de datos para la simulación de olas en un canal abierto.

La Figura 22 muestra los valores de entrada y salida en el análisis de ondas utilizando Ansys Fluent. Los parámetros incluyen la altura y la longitud de las olas, el número de pasos de tiempo y los resultados esperados en términos de velocidad y comportamiento de la superficie libre del agua. Con un paso de tiempo de 0.02 segundos durante 1500 pasos (equivalentes a 30 segundos de simulación), se analizó el

comportamiento del sistema bajo las condiciones descritas. Los resultados serán discutidos y comparados con los casos experimentales en el Capítulo IV.

Figura 21

Parámetros de Configuración para la Simulación Inicial en Ansys Fluent



Nota: fuente Ansys – Fluent

Figura 22

Modelo Numérico de Parámetros de la Primera Simulación

```
define/boundary-condition/open-channel-wave-setting

Wave Input Analysis for Velocity Inlet : Thread ID = 6
*****
Wave-1 Analysis
*****

Current Settings :
-----
Wave theory : Airy , Wave regime = Shallow/Intermediate
Wave Height (H) = 0.2000, Wave Length (L) = 30.0000
Liquid Depth (h) = 5.0000, Ursell Number (H*L*L/(h*h*h)) = 1.4400

Mandatory checks for full wave regime within wave breaking limit
-----
Relative Height: H/h = 0.0400 , Maximum theoretical limit = 0.7800
Maximum numerical limit = 0.5500
Relative height within wave breaking limit

Wave Steepness: H/L = 0.0067 , Maximum theoretical limit = 0.1420
Stable numerical limit = 0.1000 , Maximum numerical limit = 0.1200
Wave steepness within wave breaking limit

Checks for selected wave theory within wave breaking and stability limit
-----
Relative height check
H/h = 0.0400 , Min : 0.0000 , Max : 0.1000
Relative height check : successful

Wave Steepness check
H/L = 0.0067 , Min : 0.0000 , Max : 0.0156
Wave steepness check : successful

Ursell Number check
Ur = 1.4400 , Min : 0.0000 , Max : 105.0000
Ursell number check : successful

Wave regime check
h/L = 0.1667 , Min : 0.0000 , Max : 10000.0000
Wave regime check : successful

Summary
-----
Checks : passed
Selected wave theory is appropriate for application.
```

Nota: fuente Ansys - Fluent

3.4 Componentes de costos y proceso de cálculo general de una OWC fija

Calcular los costos de una Columna de Agua Oscilante (OWC) fija implica considerar una variedad de factores que abarcan desde el diseño inicial y la construcción hasta el mantenimiento y operación a lo largo del tiempo. La presente tesis no realiza un estudio de la estructura de costos de la OWC fija pues no está es una propuesta en fase conceptual de diseño con la referida aplicación de la simulación numérica para la

determinación del mejor diseño posible, sin embargo, se lista una serie de componentes de costos que son descritos y deben ser considerados en el proceso de la construcción y mantenimiento de la OWC fija. A continuación, se describen los componentes principales para estimar estos costos:

Componentes de Costos de una OWC Fija

1. Costos de Diseño e Ingeniería

- Estudios de viabilidad
- Diseño conceptual y detallado
- Simulaciones numéricas y modelos físicos
- Evaluación de impacto ambiental

2. Costos de Construcción

- Materiales de construcción (concreto, acero, etc.)
- Mano de obra
- Equipos y maquinaria
- Instalación de componentes mecánicos y eléctricos
- Preparación del sitio y fundaciones

3. Costos de Equipamiento

- Generador y turbina
- Sistema de control y monitoreo
- Sistemas eléctricos y de transmisión de energía
- Sistemas de protección y seguridad

4. Costos de Instalación

- Transporte de materiales y equipos al sitio
- Construcción e instalación de la estructura en el mar
- Conexión a la red eléctrica
- Comisionamiento y pruebas

5. Costos Operativos y de Mantenimiento

- Inspecciones regulares

- Reparaciones y reemplazo de componentes
- Personal de operación y mantenimiento
- Seguro y licencias
- Costos administrativos

6. Costos Financieros

- Intereses sobre préstamos y financiamiento
- Depreciación de activos

Proceso General de Cálculo

1. Estimación de Costos de Diseño e Ingeniería
 - Recopilar datos de proyectos similares y ajustar según las especificaciones del proyecto actual.
 - Consultar con ingenieros y diseñadores para obtener estimaciones detalladas.
2. Estimación de Costos de Construcción y Equipamiento
 - Desglosar el proyecto en tareas específicas (ej. construcción de la cámara de agua, instalación de la turbina).
 - Obtener cotizaciones de proveedores y contratistas.
 - Incluir contingencias para imprevistos.
3. Estimación de Costos de Instalación
 - Considerar el transporte y la logística para llevar los materiales y equipos al sitio.
 - Calcular los costos de la instalación en el mar, incluyendo las condiciones climáticas y marítimas.
4. Estimación de Costos Operativos y de Mantenimiento
 - Basarse en datos históricos de proyectos similares.
 - Incluir costos de mano de obra, repuestos y servicios.
5. Cálculo de Costos Financieros
 - Estimar los intereses sobre cualquier financiamiento requerido.

- Incluir la depreciación de los activos a lo largo de la vida útil del proyecto.

6. Suma Total de Costos

- Agregar todos los costos estimados para obtener el costo total del proyecto.
- Realizar un análisis de sensibilidad para considerar posibles variaciones en los costos.

Ejemplo de Cálculo Simplificado

1. Diseño e Ingeniería: \$500,000

2. Construcción:

- Materiales: \$1,000,000
- Mano de obra: \$500,000
- Equipos y maquinaria: \$300,000

3. Equipamiento:

- Generador y turbina: \$700,000
- Sistemas eléctricos: \$200,000

4. Instalación: \$400,000

5. Operación y Mantenimiento Anual: \$100,000 (durante 20 años)

6. Costos Financieros:

- Intereses: \$200,000
- Depreciación: \$150,000

Cálculo Total

1. Costo Inicial = Diseño + Construcción + Equipamiento + Instalación

$$\circ \quad \$500,000 + \$1,800,000 + \$900,000 + \$400,000 = \$3,600,000$$

2. Costo de Operación y Mantenimiento (20 años) = $\$100,000 \times 20 = \$2,000,000$

3. Costos Financieros = $\$200,000 + \$150,000 = \$350,000$

4. Costo Total del Proyecto = Costo Inicial + Costos de Operación y Mantenimiento
+ Costos Financieros

$$\circ \quad \$3,600,000 + \$2,000,000 + \$350,000 = \$5,950,000$$

Este ejemplo es una simplificación y los costos reales varían según las condiciones específicas del proyecto, la ubicación y los cambios en los precios de los materiales y la mano de obra. Es recomendable realizar un análisis y ajustarlo a la realidad del proyecto específico para obtener una estimación precisa.

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS Y CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

En la simulación numérica realizada para un sistema de Columna de Agua Oscilante (OWC) fijo, se evaluaron diversos escenarios con el fin de analizar el comportamiento del sistema bajo distintas alturas de ola y diámetros del orificio de salida del aire. Estos escenarios, inspirados en el trabajo de Henriques et al. (2017), incluyeron una altura de ola de 0.4 m y un orificio de salida de aire con diámetros de 8 cm, 14 cm y 20 cm, así como otra altura de ola de 0.2 m con diámetros de orificio de 8 cm, 14 cm y 20 cm. Adicionalmente, se estableció una longitud de ola fija de 30 m para todos los casos. El análisis comparativo se centró en la velocidad del aire que se genera en la cámara superior del sistema OWC, destacando cómo las variaciones en la altura de la ola y el diámetro del orificio influyen en el flujo de aire. Este análisis se realizó tanto en los picos de velocidad como durante el ciclo completo de oscilación del fluido. Los resultados obtenidos proporcionan información valiosa sobre cómo mejorar el diseño de futuros sistemas OWC para optimizar su rendimiento, ofreciendo una base sólida para la aplicación en distintos contextos, aunque se advierte que los valores pueden variar en función de las condiciones específicas de cada implementación.

Para calcular la potencia generada por una turbina de Wells, se usa la fórmula de potencia para un fluido en movimiento a través de una turbina. La fórmula general es:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 \eta$$

donde:

- P es la potencia (en watts, W)

- ρ es la densidad del aire (aproximadamente 1.225 kg/m^3 a nivel del mar y a 15°C)
- A es el área de la sección transversal del flujo de aire (en metros cuadrados, m^2)
- v es la velocidad del aire (en metros por segundo, m/s)
- η es la eficiencia de la turbina (valor que generalmente se estima en un rango entre 0.3 y 0.7 para turbinas de Wells)

Con los resultados se investiga cómo las variaciones en la velocidad del aire dentro del OWC impactan en la eficiencia de la captura de energía, evaluando la interacción física entre la fase del fluido líquido y la respuesta del aire en diferentes momentos de la simulación. Además, los datos obtenidos proporcionan una visión más clara sobre cómo ajustar el diseño del orificio para mejorar el rendimiento en futuras aplicaciones, especialmente en configuraciones de olas de baja altura y gran longitud, como las descritas en este caso. Este análisis es fundamental para perfeccionar las futuras implementaciones de columnas de agua oscilantes en condiciones similares.

4.1 Resultados de caso 1

En este apartado se detallarán los resultados obtenidos para el caso 1, donde la simulación se realizó con una ola de 30 metros de longitud y una altura de 0.4 metros, junto con un orificio de salida de aire de 8 cm de diámetro. Durante el análisis, se pudo observar la interacción dinámica entre el aire y el fluido líquido, lo cual ayuda a comprender cómo estas fases afectan el rendimiento del sistema. Además, se evaluaron las velocidades del aire en los momentos pico y su comportamiento a lo largo de un periodo de 30 segundos, utilizando un sensor que registró las variaciones de velocidad del flujo de aire en el transcurso de la simulación.

Para una eficiencia en promedio de la turbina Wells de 0.5, se tiene para el primer caso.

Para el caso 1, la potencia eléctrica generada es 2.66 W.

Figura 23

Fases liquido aire de caso 1



Nota: fuente Ansys – Fluent

Figura 24

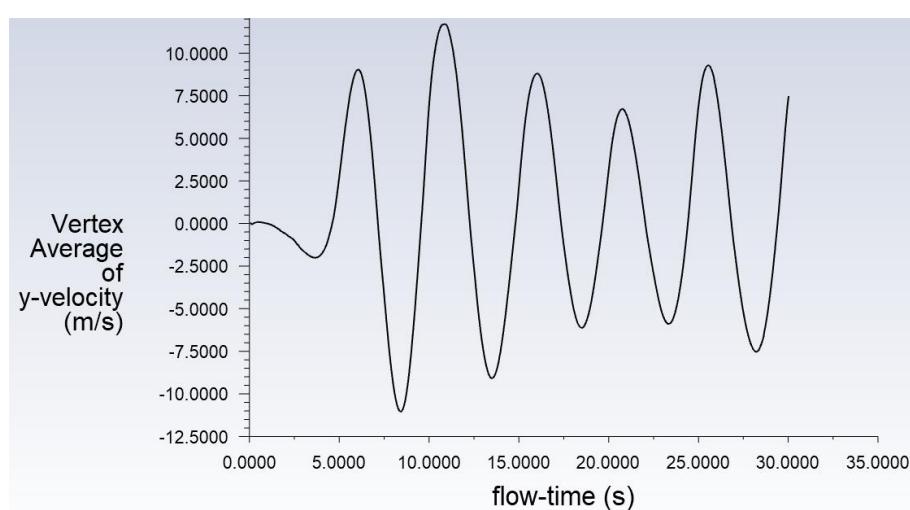
Velocidades de caso 1



Nota: fuente Ansys – Fluent

Figura 25

Sensor de velocidad de caso 1



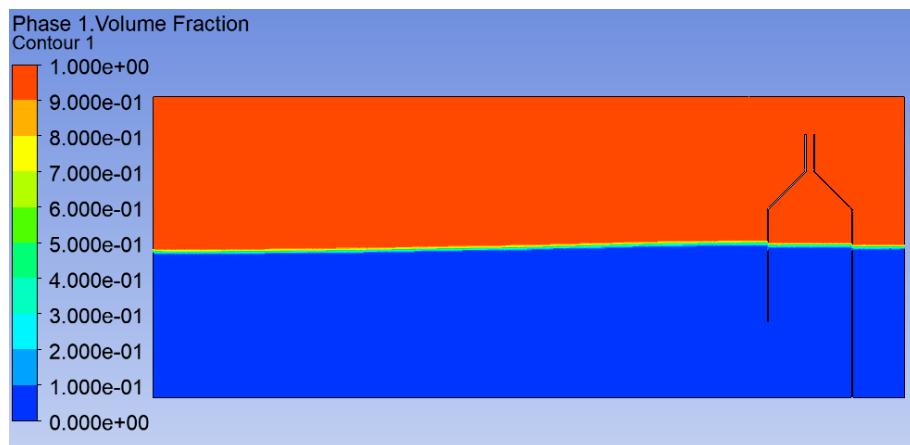
Nota: fuente Ansys – Fluent

4.2 Resultados de caso 2

En este apartado se detallarán los resultados obtenidos para el caso 2, donde la simulación se realizó con una ola de 30 metros de longitud y una altura de 0.4 metros, junto con un orificio de salida de aire de 14 cm de diámetro. Durante el análisis, se pudo observar la interacción dinámica entre el aire y el fluido líquido, lo cual ayuda a comprender cómo estas fases afectan el rendimiento del sistema. Además, se evaluaron las velocidades del aire en los momentos pico y su comportamiento a lo largo de un periodo de 30 segundos, utilizando un sensor que registró las variaciones de velocidad del flujo de aire en el transcurso de la simulación. Para el caso 2, la potencia eléctrica generada es 1.62 W.

Figura 26

Fases líquido aire de caso 2



Nota: fuente Ansys – Fluent

Figura 27

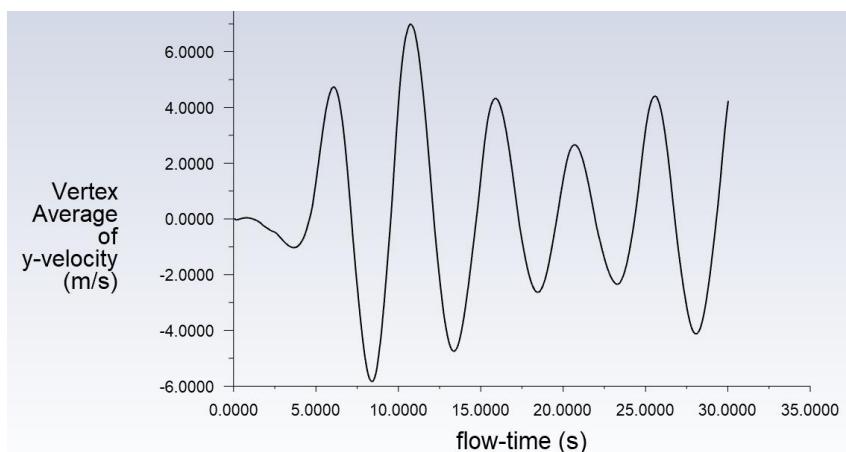
Velocidades de caso 2



Nota: fuente Ansys – Fluent

Figura 28

Sensor de velocidad de caso 2



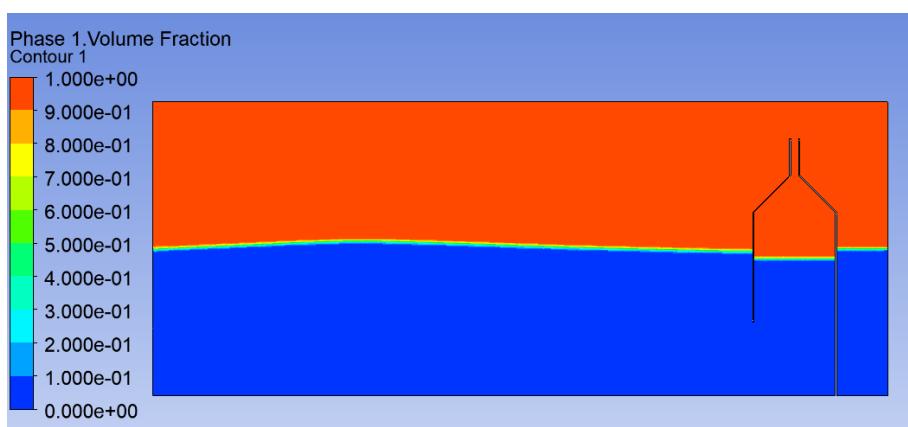
Nota: fuente Ansys – Fluent

4.3 Resultados de caso 3

En este apartado se detallarán los resultados obtenidos para el caso 3, donde la simulación se realizó con una ola de 30 metros de longitud y una altura de 0.4 metros, junto con un orificio de salida de aire de 20 cm de diámetro. Durante el análisis, se pudo observar la interacción dinámica entre el aire y el fluido líquido, lo cual ayuda a comprender cómo estas fases afectan el rendimiento del sistema. Además, se evaluaron las velocidades del aire en los momentos pico y su comportamiento a lo largo de un periodo de 30 segundos, utilizando un sensor que registró las variaciones de velocidad del flujo de aire en el transcurso de la simulación. Para el caso 3, la potencia eléctrica generada es 2.08 W.

Figura 29

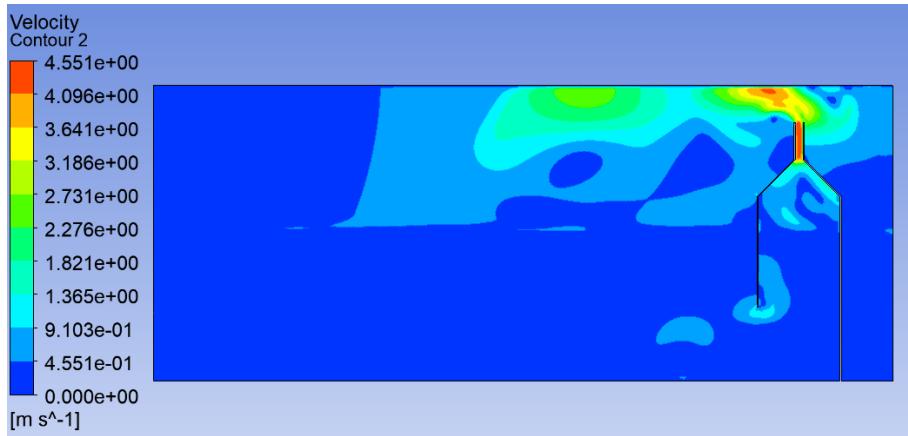
Fases liquido aire de caso 3



Nota: fuente Ansys – Fluent

Figura 30

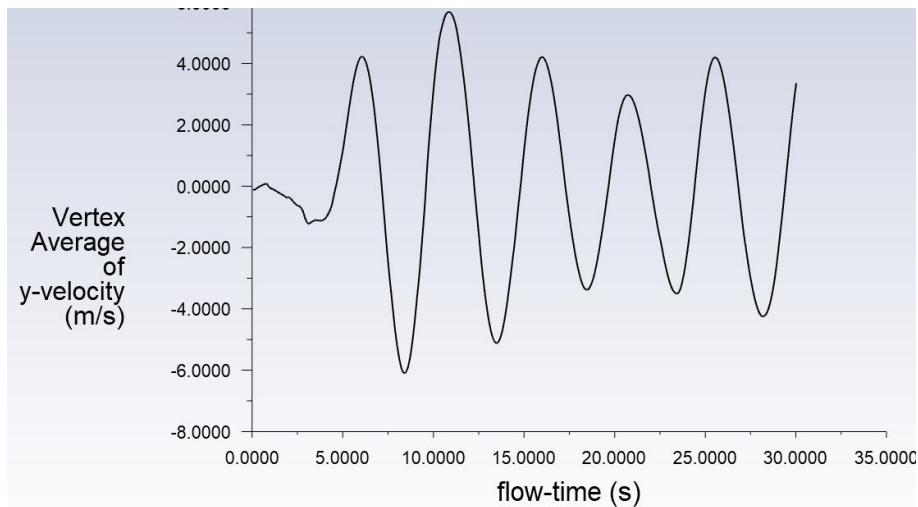
Velocidades de caso 3



Nota: fuente Ansys – Fluent

Figura 31

Sensor de velocidad de caso 3



Nota: fuente Ansys – Fluent

4.4 Resultados de caso 4

En este apartado se detallarán los resultados obtenidos para el caso 4, donde la simulación se realizó con una ola de 30 metros de longitud y una altura de 0.2 metros, junto con un orificio de salida de aire de 8 cm de diámetro. Durante el análisis, se pudo observar la interacción dinámica entre el aire y el fluido líquido, lo cual ayuda a comprender cómo estas fases afectan el rendimiento del sistema. Además, se evaluaron las velocidades del aire en los momentos pico y su comportamiento a lo largo de un periodo de 30 segundos,

utilizando un sensor que registró las variaciones de velocidad del flujo de aire en el transcurso de la simulación. Para el caso 4, la potencia eléctrica generada es 0.53 W.

Figura 32

Fases liquido aire de caso 4



Nota: fuente Ansys – Fluent

Figura 33

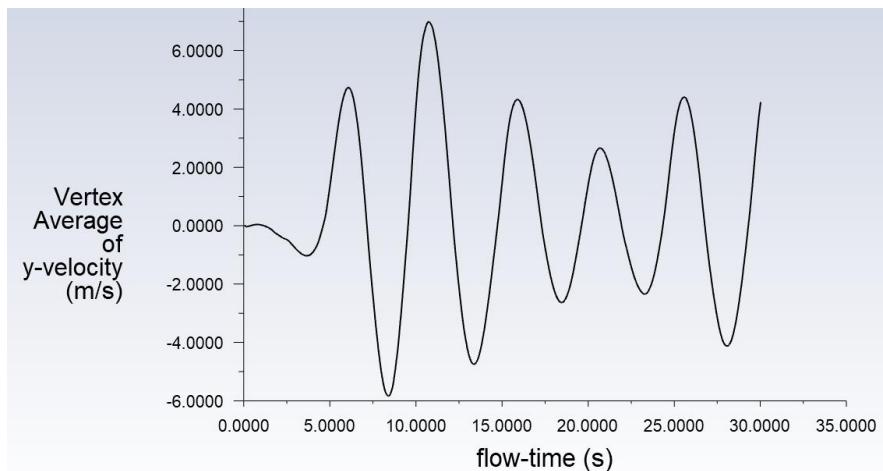
Velocidades de caso 4



Nota: fuente Ansys – Fluent

Figura 34

Sensor de velocidad de caso 4



Nota: fuente Ansys – Fluent

4.5 Resultados de caso 5

En este apartado se detallarán los resultados obtenidos para el caso 5, donde la simulación se realizó con una ola de 30 metros de longitud y una altura de 0.2 metros, junto con un orificio de salida de aire de 14 cm de diámetro. Durante el análisis, se pudo observar la interacción dinámica entre el aire y el fluido líquido, lo cual ayuda a comprender cómo estas fases afectan el rendimiento del sistema. Además, se evaluaron las velocidades del aire en los momentos pico y su comportamiento a lo largo de un periodo de 30 segundos, utilizando un sensor que registró las variaciones de velocidad del flujo de aire en el transcurso de la simulación. Para el caso 5, la potencia eléctrica generada es 0.43 W.

Figura 35

Fases liquido aire de caso 5



Nota: fuente Ansys – Fluent

Figura 36

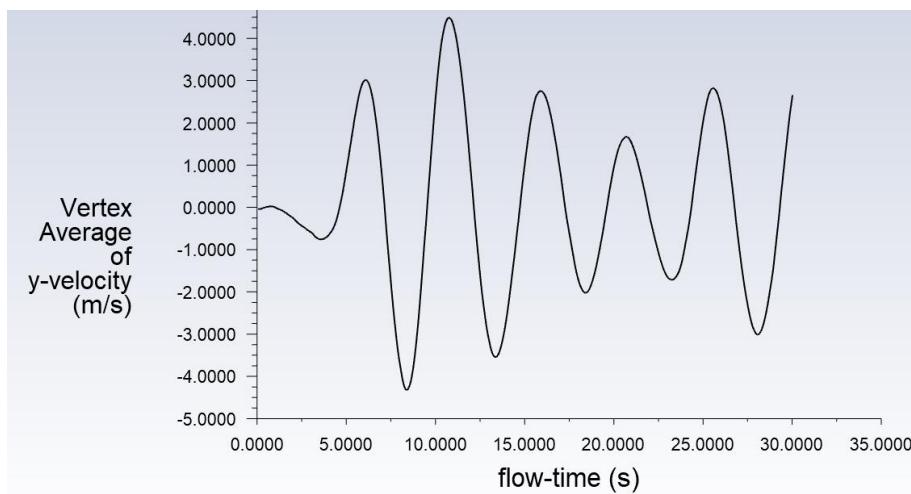
Velocidades de caso 5



Nota: fuente Ansys – Fluent

Figura 37

Sensor de velocidad de caso 5



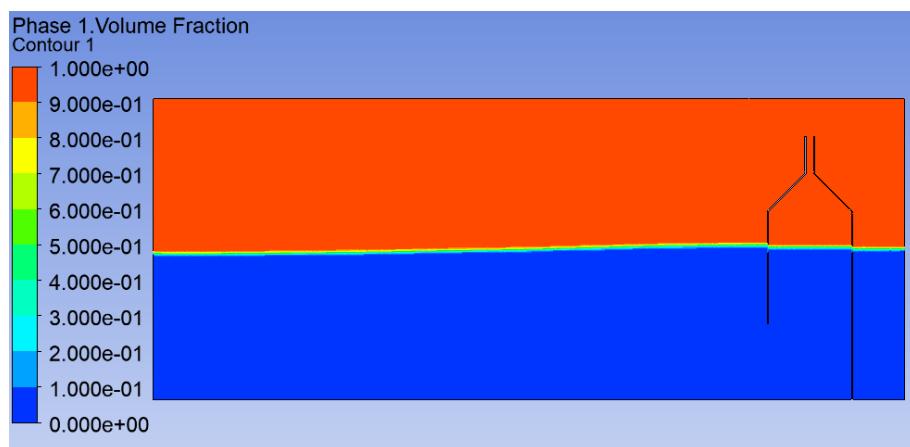
Nota: fuente Ansys – Fluent

4.6 Resultados de caso 6

En este apartado se detallarán los resultados obtenidos para el caso 6, donde la simulación se realizó con una ola de 30 metros de longitud y una altura de 0.2 metros, junto con un orificio de salida de aire de 20 cm de diámetro. Además, se evaluaron las velocidades del aire en los momentos pico y su comportamiento a lo largo de un periodo de 30 segundos, utilizando un sensor que registró las variaciones de velocidad del flujo de aire en el transcurso de la simulación. Para el caso 6, la potencia eléctrica generada es 0.41 W.

Figura 38

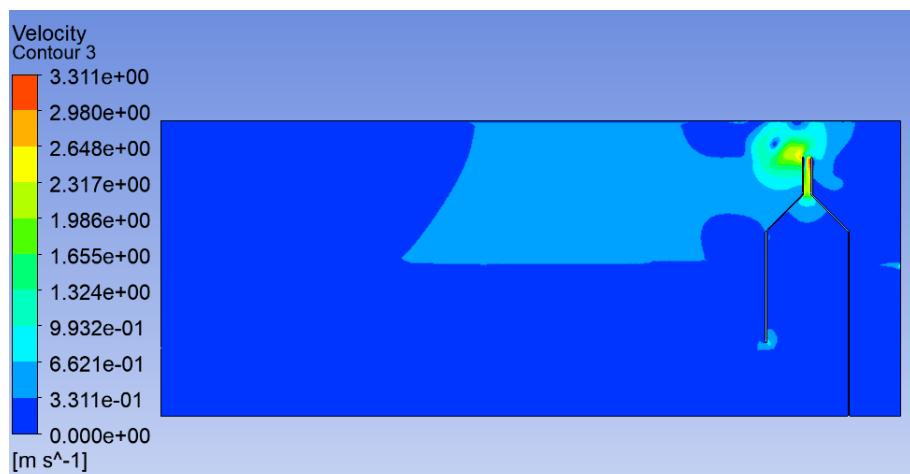
Fases liquido aire de caso 6



Nota: fuente Ansys – Fluent

Figura 39

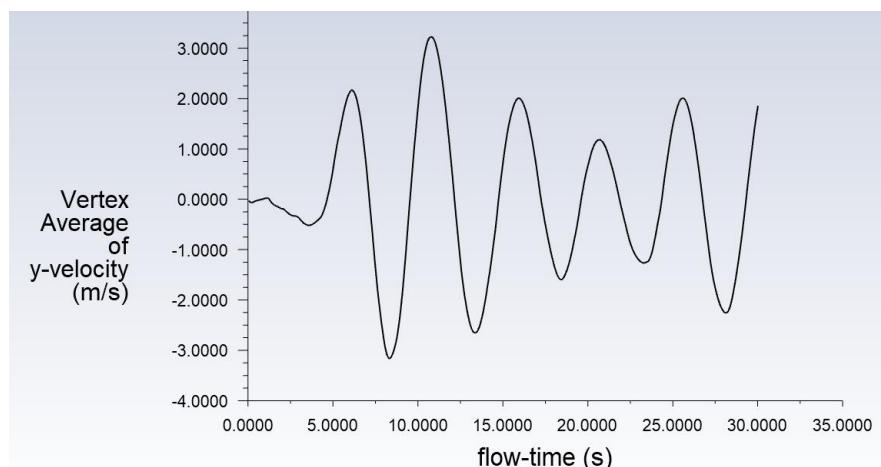
Velocidades de caso 6



Nota: fuente Ansys – Fluent

Figura 40

Sensor de velocidad de caso 6



Nota: fuente Ansys – Fluent

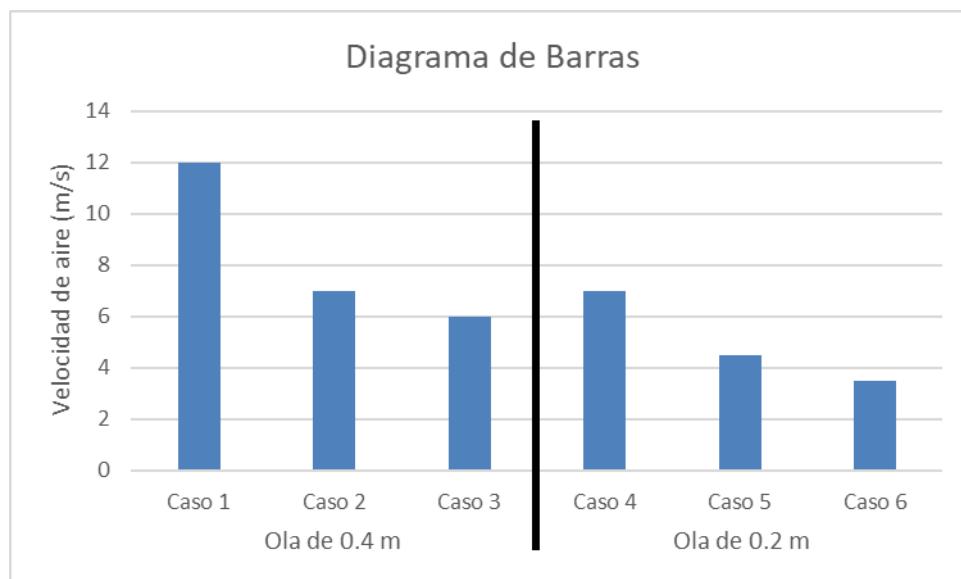
4.7 Discusión de resultados

Los resultados obtenidos en los seis casos analizados, junto con el diagrama de barras mostrado en la Figura 41, revelan que la velocidad del aire que entra y sale de la parte superior del OWC varía directamente con el tamaño del orificio. En situaciones simuladas, a mayor diámetro del orificio, menor es el flujo de aire, lo que se traduce en velocidades más bajas. De manera similar, la altura de las olas tiene un impacto directo: olas más altas generan un flujo de aire más rápido. Estos comportamientos observados son esenciales para optimizar el diseño de futuros sistemas OWC fijos, basados en simulaciones en 2D.

Este análisis cualitativo permite estudiar diferentes escenarios con condiciones similares, lo cual proporciona una visión comparativa clara sobre el rendimiento del sistema. Al evaluar las distintas configuraciones, se ha demostrado que, para sensores de salida de aire capaces de captar velocidades de hasta 12 m/s, las olas de mayor altura y los orificios más pequeños presentan un comportamiento más eficiente. Además, la disponibilidad de tecnología avanzada para controlar la velocidad del aire mediante turbinas específicas puede mejorar significativamente el rendimiento, lo cual es clave para futuros diseños de columnas de agua oscilantes.

Figura 41

Diagrama de barras para los casos de ola de 0.4 m y 0.2 m



El tiempo computacional requerido para cada simulación fue de 3 a 4 horas, utilizando equipos de alto rendimiento que incluyeron un ordenador con 64 GB de RAM y 40 hilos a 2.3 GHz. Estos datos reflejan la gran capacidad computacional necesaria para este tipo de simulaciones, mostrando la importancia de contar con recursos robustos en el análisis de velocidad del aire y su relación con el tamaño del orificio y la altura de las olas.

Tomando en consideración el resultado obtenido, para el cálculo de la potencia generada por una turbina de Wells con un diámetro de 8 cm (0.08 m) y un flujo de aire de 12 m/s, se usa la fórmula de potencia para un fluido en movimiento a través de una turbina, suponiendo una eficiencia promedio de la turbina de 0.5, se obtiene una potencia $P \approx 2.664$ W. Por un número de OWC fijas, previamente planificadas, y en combinación con baterías son parte de un sistema de energía de respaldo o de sistema de iluminación, señalización, o de una planta de desalación de agua, entre otras aplicaciones. Este cálculo tiene la finalidad de ilustrar su aplicación, pero no es el fin de esta investigación puesto que aún hay etapas posteriores que deben ser consideradas en futuras investigaciones.

4.8 Contrastación de hipótesis

Los resultados obtenidos en los seis casos simulados confirman que la caracterización hidrodinámica, utilizando simulación numérica CFD, permite ajustar las variables geométricas y operativas del sistema OWC para mejorar la conversión de energía. Se observó que cambios en la altura de ola y el diámetro del orificio de salida del aire impactan directamente en la velocidad del aire dentro de la cámara de la OWC, lo cual, a su vez, mejora la eficiencia del sistema en la captura de energía. En los casos donde se implementaron configuraciones con orificios de menor tamaño y mayores alturas de ola, la velocidad del aire y, por ende, la potencia generada, fueron mayores.

Además, al calcular la potencia generada con una turbina Wells de diámetro de 8 cm (0.08 m) y un flujo de aire de 12 m/s, se obtuvo una potencia aproximada de 2.664 W, asumiendo una eficiencia de la turbina del 50%. Esta potencia generada puede ser aprovechada para sistemas de energía de respaldo, señalización o incluso plantas de

desalación de agua, aunque este no es el objetivo final de la investigación, que aún requiere análisis adicionales en fases futuras.

Contraste de hipótesis específicas:

- 1) Los resultados mostraron que las variaciones geométricas (altura de ola y diámetro del orificio de salida) influyen de manera notable en la eficiencia del sistema. Los casos con alturas de ola mayores y orificios de salida más pequeños registraron una mayor velocidad del aire, lo que mejoró la eficiencia en la captura de energía. Esto evidencia que las configuraciones geométricas deben adaptarse según las condiciones del entorno para maximizar la eficiencia energética, confirmando la hipótesis.
- 2) Los resultados de las simulaciones CFD validaron esta hipótesis. Las simulaciones permitieron observar patrones claros de interacción entre las fases líquida y gaseosa, destacando cómo las dimensiones del sistema y las condiciones de frontera influyen en la dinámica del flujo. Las configuraciones que optimizaron estas condiciones mejoraron la velocidad del aire y la eficiencia energética, confirmando que una correcta representación numérica es esencial para comprender el comportamiento del sistema.
- 3) Los gráficos y resultados obtenidos muestran que la velocidad del aire es crucial para la conversión efectiva de energía. Los picos de velocidad del aire coincidieron con los momentos de mayor conversión de energía, lo que valida la relación directa entre ambos parámetros. Los casos con velocidades de aire superiores a 10 m/s lograron una mejor conversión, confirmando la hipótesis de que la velocidad del aire es un factor determinante para la eficiencia del sistema.

4.9 Aporte

La contribución del trabajo es explorar el potencial de la simulación numérica para la interacción de una ola incidente en un dispositivo de Columna de Agua Oscilante (OWC) fija desde el punto de vista hidrodinámico para disminuir los riesgos de deficiencia de

diseño y gastos de implementación en una posterior prueba experimental, siendo que la simulación numérica tiene un gasto apenas computacional y sirve para investigar varios escenarios del comportamiento de un dispositivo e identifica tendencias claras de operación a través del flujo de salida de aire que conllevaría a un dimensionamiento de la turbina para su mejor aprovechamiento.

Por otro lado, la simulación numérica desempeña un papel clave en el diseño y optimización de dispositivos de Columna de Agua Oscilante (OWC) fija, evaluándose diversos diseños, tamaños y materiales, identificando la configuración óptima para maximizar la captura de energía de las olas y aporten en la eficiencia del dispositivo con altas velocidades de aire de salida de la cámara del OWC. También permitiría el estudio del flujo de agua, o llamado a veces flujo circulante, alrededor del OWC, analizando la interacción entre las olas y las estructuras, la turbulencia y las fuerzas hidrodinámicas. Esto mejoraría la comprensión del comportamiento fluidodinámico y optimización del diseño.

El aporte de la simulación numérica es evaluar el rendimiento del OWC respecto a la velocidad de aire de salida por el orificio superior de la cámara, cuanta mayor sea la velocidad más eficiente es el rendimiento del OWC. Esta información sirve para un estudio o análisis posterior de dimensionamiento de una turbina Wells, posicionada a la salida del orificio de salida de aire, cuya variable sería el coeficiente de potencia e incluiría un estudio en el diseño de palas, eficiencia de la turbina y la selección de la turbina comercial que convertirá la energía de las olas en energía eléctrica.

En resumen, la simulación numérica es esencial para el desarrollo eficiente y efectivo de dispositivos de Columna de Agua Oscilante fija. Proporciona herramientas para el diseño óptimo, comprendiendo el comportamiento fluidodinámico y evaluando el rendimiento bajo diversas condiciones. La validación experimental fortalecería la confianza en los resultados y avanza hacia una implementación exitosa de la energía de las olas como fuente renovable y sostenible.

CONCLUSIONES

La caracterización hidrodinámica de una Columna de Agua Oscilante (OWC) fija, basada en simulaciones numéricas, ha demostrado ser una herramienta eficaz para optimizar la conversión de energía oceánica en eléctrica. Los resultados confirman que las variaciones en la geometría del sistema OWC fija y el comportamiento de olas, como la altura de la ola y el diámetro del orificio de salida del aire, tienen un impacto directo en la eficiencia del sistema. Esto destaca la importancia de ajustar estos parámetros para maximizar la captura de energía y su conversión en aplicaciones prácticas, como sistemas de energía de respaldo y desalación de agua.

Como conclusiones específicas se tienen:

1. Generación de mallas: La creación y ajuste de las mallas para la simulación numérica ha requerido un mayor tiempo de preparación debido a los ajustes en la configuración del preprocesamiento. Este paso es esencial para lograr una mayor precisión en los resultados, y futuras investigaciones deberán buscar la optimización de este proceso para reducir el tiempo de simulación sin comprometer la exactitud de los resultados.
2. Estudios de orificios de 8, 14 y 20 cm de diámetro: Los resultados obtenidos con diferentes tamaños de orificio han mostrado una significativa influencia en la interacción del flujo dentro del sistema OWC. Estos estudios permitieron identificar configuraciones óptimas que mejoran el rendimiento del sistema, lo que sugiere que, para ciertas alturas de ola, los orificios más pequeños pueden ofrecer un rendimiento más eficiente al aumentar la velocidad del aire y, por ende, la capacidad de conversión de energía.

3. Rendimiento óptimo del sistema: Se determinó que el sistema OWC muestra su mejor rendimiento cuando la altura de las olas varía entre 0.4 m y 0.8 m, con un orificio de salida del aire cuyo diámetro oscila entre 8 cm y 20 cm. Sin embargo, este rango no debe ser considerado como una limitación estricta. Los resultados sugieren que es posible realizar ajustes en las condiciones de frontera y en los parámetros geométricos para mejorar la eficiencia bajo diferentes condiciones de operación.

RECOMENDACIONES

Como recomendaciones se tienen:

- Es recomendable llevar a cabo un análisis exhaustivo de la velocidad de salida del aire considerando distintos diámetros del orificio. Esto permitirá obtener datos más precisos en cuanto a su impacto en la eficiencia del sistema, teniendo en cuenta tanto el tiempo de preprocesamiento como el procesamiento durante la simulación.
- Otro enfoque importante es realizar un estudio que examine la relación entre la velocidad del aire expulsado y las dimensiones verticales y horizontales del sistema, como la altura de la ola y la longitud de ola. Dicho análisis podría demandar múltiples configuraciones para obtener resultados precisos, evaluando diferentes geometrías del sistema OWC.
- Es fundamental investigar cómo la variación en las alturas de las paredes frontales y traseras del sistema puede influir en la fluctuación de la columna de agua, especialmente bajo cambios de nivel del mar. Este estudio ayudará a determinar el diseño óptimo para maximizar el flujo de aire.
- En cuanto a la turbina de aire, se recomienda un análisis profundo que permita diseñarla de tal manera que aproveche al máximo el flujo de salida de aire. Para esto, sería importante conocer y mitigar posibles pérdidas aerodinámicas que podrían surgir en el proceso, mejorando así la eficiencia global del sistema.

REFERENCIAS

- Barreiro Montes, J. (2020). *Simulación de un sistema de generación de energía undimotriz de dispositivos de Columna de Agua Oscilante (OWC)*. (Master's Thesis). Universidad da Coruña. <http://hdl.handle.net/2183/30575>
- Cui, L., Zheng, S., Zhang, Y., Miles, J., & Iglesias, G. (2021). *Wave power extraction from a hybrid oscillating water column-oscillating buoy wave energy converter*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 135, 110234. doi:10.1016/j.rser.2020.110234
- Goswami, P., Deshmukh, S.P.: *Assessment of reduction in carbon dioxide emission with wave solar hybrid generation along coastal Karnataka*. Nat. Environ. Pollut. Technol. 17(3), 863–868 (2018)
- Heath, T. V. (2012). *A review of oscillating water columns*. Philosophical Transactions. Series A, Mathematical, Physical, and Engineering Sciences, 370(1959), 235–245. <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0164>
- Henriques, J.; Falcão, A.; Gato, L.; Lemos, J.; Portillo, J. (2017). Latching and Peak-Power Control of an Oscillating Water Column Based on a Discontinuous Galerkin Method. Paper presented at 12th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC 2017), Cork, Ireland.
- Mayon, R., Ning, D., Zhang, C., Chen, L., & Wang, R. (2021). *Wave energy capture by an omnidirectional point sink oscillating water column system*. Applied Energy, 304(117795), 117795. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117795>
- Mia, M. R., Zhao, M., Wu, H., & Munir, A. (2022). *Numerical investigation of offshore oscillating water column devices*. Renewable Energy, 191, 380–393. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.069>

Mora, S. C. (2022). *Analysis of wells turbine with leading-edge tubercles for oscillating water column wave energy converter*. (Master's Thesis). California State University System.
<http://hdl.handle.net/20.500.12741/rep:2819>

Pecher, A., & Kofoed, J. P. (Eds.). (2017). *Handbook of Ocean Wave Energy*. Ocean Engineering & Oceanography. doi:10.1007/978-3-319-39889-1

Rosati, M., Henriques, J. C. C., & Ringwood, J. V. (2022). *Oscillating-water-column wave energy converters: A critical review of numerical modelling and control*. Energy Conversion and Management, X, 16(100322), 100322.
<https://doi.org/10.1016/j.ecmx.2022.100322>

Saad, M. A. S. (2022). *Numerical model on the flow patterns in a radial impulse turbine for an OWC plant*. (Doctoral Dissertation). Universidad de Oviedo.
<http://hdl.handle.net/10651/62000>

Sarmiento, J., Iturrioz, A., Ayllón, V., Guanche, R., & Losada, I. J. (2019). *Experimental modelling of a multi-use floating platform for wave and wind energy harvesting*. Ocean Engineering, 173, 761–773. doi:10.1016/j.oceaneng.2018.12.046

Soto, M. (2024). Caracterización hidrodinámica de una Columna de Agua Oscilante con Boya SPAR mediante Simulación Numérica para la Conversión de la Energía Oceánica. (Tesis de Maestría). Universidad Nacional de Ingeniería.

Van Den Kerkhoff, R. (. (2019). *Performance assessment of the Ocean Falls Wave Energy Converter: A solution for electrical power production in the future*. (Master's Thesis). Delft University of Technology. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:11f5eb60-5ebc-4a85-bd10-226e3e8de947>

Zhang, D., Chen, Z., Liu, X., Sun, J., Yu, H., Zeng, W., Ying, Y., Sun, Y., Cui, L., Yang, S., Qian, P., & Si, Y. (2022). *A coupled numerical framework for hybrid floating offshore wind turbine and oscillating water column wave energy converters*. Energy Conversion and Management, 267(115933), 115933.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2022.115933>

Zhao, X., Zhang, L., Li, M., & Johanning, L. (2021). *Experimental investigation on the hydrodynamic performance of a multi-chamber OWC-breakwater*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 150, 111512. doi:10.1016/j.rser.2021.111512

Zhou, Y., Ning, D., Liang, D., & Cai, S. (2021). *Nonlinear hydrodynamic analysis of an offshore oscillating water column wave energy converter*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 145, 111086. doi:10.1016/j.rser.2021.111086

ANEXO A

MATRIZ DE CONSISTENCIA

En este anexo se presenta la matriz de consistencia en forma de Tabla.

Tabla A.1*Matriz de consistencia*

PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍA
¿Es posible que la caracterización hidrodinámica de una Columna de Agua Oscilante (OWC) fija, utilizando simulaciones numéricas, optimice la conversión de energía oceánica en energía eléctrica?	Realizar la caracterización hidrodinámica de una Columna de Agua Oscilante fija mediante simulación numérica para mejorar la conversión de energía oceánica en energía eléctrica.	La caracterización hidrodinámica de una Columna de Agua Oscilante (OWC) fija, a través de simulaciones numéricas, permite optimizar la conversión de energía oceánica en energía eléctrica, mejorando significativamente la eficiencia del sistema.	V. Dep: Conversión de energía oceánica en energía eléctrica	Potencia eléctrica generada Velocidad de aire	<ul style="list-style-type: none"> Cantidad de energía producida Velocidad de aire 	Tipo y nivel de Investigación: Tipo Aplicada o técnica Unidad de análisis: Columna de Agua Oscilante (OWC) fija
Específicos:	Específicos:	Específicos:	V. Ind 1: Caracterización hidrodinámica de una Columna de Agua Oscilante mediante simulación numérica	Dimensiones geométricas de OWC fija Comportamiento de la ola Interacción de fases de simulación	<ul style="list-style-type: none"> Altura, largo y diámetro de cámara OWC Diámetro de orificio de salida de aire de cámara OWC Altura y longitud de ola Frecuencia de ola Tipo de enmallado Condiciones de contorno Dominio computacional Perfil de velocidades del aire 	Procesamiento de datos: Simulación numérica CFD – Ansys Fluent
1. ¿Cuáles son las variaciones geométricas óptimas de una Columna de Agua Oscilante (OWC) fija para adaptarse a diferentes escenarios de comportamiento de la ola incidente y maximizar la captura de energía? 2. ¿Cómo se establecen las dimensiones precisas y las condiciones de frontera para realizar simulaciones CFD en una superficie 2D que represente el comportamiento del flujo en una Columna de Agua Oscilante (OWC) fija? 3. ¿Cómo se cuantifican la velocidad del aire generada por la oscilación del nivel del agua en diferentes escenarios de comportamiento de una Columna de Agua Oscilante (OWC) fija y cómo esta velocidad se relaciona con la conversión efectiva de energía oceánica?						