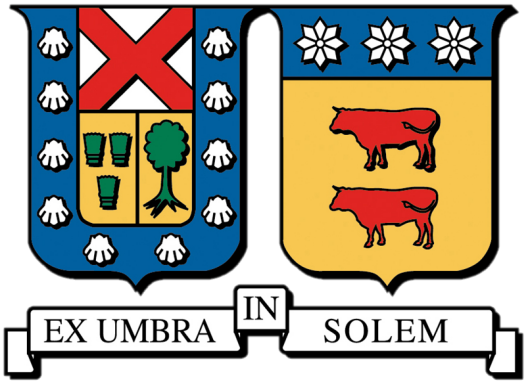
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



TÍTULO DEL TRABAJO

Modelo numérico de un OWC en Puerto Coloso

ISRAEL AGUIRRE VILLA

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

PROFESOR GUÍA: ALEX FLORES MARADIAGA

PROFESOR COREFERENTE: PATRICIO WINCKLER

Diciembre-2022

Resumen

En este documento se desarrollaron los conceptos generales de la obtención de energía marina, específicamente con un sistema de columna de agua oscilante OWC (oscillating water column), el cual extrae energía directamente de las olas. El objetivo principal es estimar la potencia aprovechable en una planta OWC ubicada en Puerto Coloso para la desalinización de agua de uso minero o su utilización para el bombeo de la misma.

Se analizó un modelo numérico 2D [1] con características propias de un OWC que posee validación física en un canal de olas. Los resultados del modelo con validación fueron utilizados a modo de calibración para el desarrollo de un modelo similar en Fluent, que posteriormente simuló condiciones reales de oleaje para una planta OWC en Puerto Coloso, a 80 km de Mejillones. El modelo de referencia entrega una idea del comportamiento de elevación de la columna de agua dentro de la cámara de OWC con condiciones a escala de altura H_0 de 0.088m, un periodo T de 2.15s y una longitud de onda λ de 5.2m. Dentro de este marco referencial, se desarrolló un modelo 2D bajo las mismas condiciones de geometría, oleaje y de condiciones de borde con el software comercial Ansys Fluent y se comparó la elevación de la columna de agua. De esta etapa se concluye que el modelo se comporta de manera similar en términos de la elevación de la columna de agua, el periodo en la cámara del OWC y su relación con los parámetros del oleaje.

Finalmente, se desarrolla un modelo para las condiciones de Puerto Coloso, usando el estado de mar típico en la zona de Mejillones con una amplitud H_0 de 1.5m, un periodo T de 9s, y una longitud de onda λ_s de 81.7m, la caracterización de la respectiva rompiente en la costa y una geometría acorde a estos parámetros. Se obtiene la estimación de la potencia de salida por metro lineal utilizando la velocidad de aire en la boquilla del OWC y el caudal de aire por metro lineal mediante los resultados de una turbina wells [2] con los coeficientes de caída de presión, flujo y eficiencia. La potencia de salida es relativamente baja de acuerdo a proyectos de magnitudes similares (centrales Mutriku y Limpet) y se estima una potencia aprovechable de hasta 1.48 kW/m.

Abstract

In this document the general concepts of obtaining marine energy are developed, specifically with an OWC oscillating water column system, which extracts energy directly from the waves. The main objective is to estimate the usable power in an OWC plant located in Puerto Coloso for the desalination of water for mining use or its use for pumping it.

A 2D [1] numerical model with characteristics of an OWC that has physical validation in a wave channel was analyzed. The results of the validated model were used as a calibration for the development of a similar model in Fluent, which later simulated real wave conditions for an OWC plant in Puerto Coloso, 80 km from Mejillones. The reference model provides an idea of the behavior of the elevation of the water column inside the OWC chamber with conditions at a height scale H_0 of 0.088m, a period T of 2.15s and a wavelength λ of 5.2m. Within this referential framework, a 2D model was developed under the same geometry, wave and edge conditions with the commercial software Ansys Fluent and the elevation of the water column was compared. From this stage it is concluded that the model behaves similarly in terms of the elevation of the water column, the period in the OWC chamber and its relationship with the wave parameters.

Finally, a model is developed for the conditions of Puerto Coloso, using the typical sea state in the Mejillones area with an amplitude H_0 of 1.5m, a period T of 9s, and a wavelength λ_s of 81.7m and the characterization of the respective surf on the coast and a geometry according to these parameters. The estimate of the power output per linear meter is obtained using the air velocity at the OWC nozzle and the air flow per linear meter using the results of a Wells [2] turbine with the pressure drop coefficients, flow and efficiency. The similar output power is relatively low according to magnitude projects (Mutriku and Limpet plants) and a usable power of up to 1.48 kW/m is estimated.

Agradecimientos

Mi principal agradecimiento va dirigido hacia mi familia; padres abuelos, tíos y polola, quienes me han dado un apoyo incondicional, propósito y motivación a lo largo de estos años para enfrentar el desafió de ser ingeniero. También me siento muy agradecido de mis compañeros y amistades que obtuve en este proceso, quienes de igual forma, me han dado un gran apoyo, muchas noches de estudio, y ayuda mutua.

Y a quienes hicieron posible este estudio, mis profesores Dr. Alex Flores y Dr. Patricio Wincler, que fueron mis guías durante el transcurso de la investigación y siempre me recibieron con los mejores ánimos en extensas reuniones para desarrollar este trabajo a lo largo del último año.

Finalmente puedo decir que siento un gran orgullo de haber estudiado en la UTFSM, la cual me ha dado las herramientas para enfrentarme a los próximos desafíos y que representare en con honor.

Tabla de Contenidos

1 Introducción y Definición del Problema **11**

1.1 Proyección de Energía y consumo de agua en la minería . . . 11

1.2 Desalinizadora EWS . . . 12

1.3 ¿Por qué en EWS? . . . 13

1.3.1 Potencia Instalada . . . 13

1.4 El Problema . . . 14

1.5 Objetivos . . . 14

1.6 Propuesta de innovación . . . 15

2 Estado del Arte **16**

2.1 Proyectos similares . . . 16

2.2 Patentes de uso industrial . . . 18

2.3 Estudios de centros de investigación . . . 19

3 Marco Teórico **20**

3.1 Normas Ambientales . . . 20

3.1.1 Componentes del EIA . . . 20

3.1.2 Concesión marítima . . . 21

3.2 Oleaje . . . 22

3.2.1 Características del oleaje . . . 22

3.2.2 Números dimensionales del oleaje . . . 22

3.2.3 Asomeramiento . . . 23

3.3 Energía Marina . . . 24

3.3.1 Sistema OWC . . . 24

3.3.2 Turbina en OWC . . . 25

3.3.3 Parámetros Característicos . . . 27

3.3.4 Potencia de salida diferencial . . . 28

3.4 Modelos Matemáticos . . . 28

3.4.1 Teoría lineal del oleaje . . . 29
3.4.2 Condiciones de Borde . . . 30
3.4.3 Teoría de Stokes . . . 31
3.4.4 Ecuaciones dentro del volumen de control . . . 32
3.5 Mecánica de fluidos computacional . . . 34
3.5.1 Algoritmo PISO . . . 34
3.5.2 Modelo VOF . . . 35

4 Materiales y Métodos 37
4.1 Metodología General . . . 37
4.2 Softwares utilizados . . . 39
4.3 Variables involucradas y definiciones . . . 39
4.3.1 Columna de agua, inhalación y exhalación . . . 39
4.4 Análisis dimensional . . . 42
4.4.1 Dinámica de la potencia de salida del OWC . . . 44
4.4.2 Energía y asomeramiento . . . 47

5 Desarrollo del modelo numérico 49
5.1 Modelo numérico con validación física en OPENFOAM . . . 49
5.2 Réplica del modelo en Fluent . . . 51
5.2.1 Geometría y mallado . . . 52
5.2.2 Configuración, condiciones de borde y modelos . . . 53
5.2.3 Análisis de resultados . . . 54

6 Modelo numérico de un OWC en Puerto Coloso 60
6.1 Oleaje y rompiente en Puerto Coloso . . . 60
6.1.1 Costa y rompiente . . . 63
6.2 Geometría y mallado . . . 64
6.3 Configuración, condiciones de borde y modelos . . . 66

7 Resultados 70
7.1 Oleaje y columna de agua . . . 70
7.2 Velocidad de la boquilla del OWC . . . 73
7.3 Aprovechamiento de energético con turbina Wells . . . 76

8 Discusión 80

9 Conclusiones y Recomendaciones 84

Lista de Tablas

1.1 Consumo de energía por la industria del cobre. Fuente: [3] 11
1.2 Proyección de tasa de promedio anual en la próxima década, valores en [m3/s]. Fuente:[4] 12

2.1 Cuadro comparativo de los proyectos más destacables 16

5.1 Condiciones de borde 53
5.2 Oleaje generado 54

6.1 Setup del modelo Multiphase 66
6.2 Condiciones de borde 67
6.3 Oleaje generado 69

7.1 Parámetros del rotor presentado en [2] 76

Lista de Figuras

1.1 Vista superior de la planta EWS 12

2.1 Central LIMPET 17
2.2 Central Mutriku 17
2.3 Central movil Buoy 18
2.4 Patente de un sistema moderno de OWC del año 2013 19

3.1 Ilustración del fenómeno de asomeramiento. Los tamaños no se encuentran en escala 24
3.2 Diagrama tipo de un OWC 25
3.3 Ilustración de una turbina Wells 26
3.4 Triángulo de velocidades turbina wells 26
3.5 Diagrama de las variables utilizadas en T.L.O. Fuente: [5] 29
3.6 Validez de teorías de oleaje. Fuente [6] 30
3.7 Ilustración de Teoría lineal y Stokes de segundo orden en aguas profundas 32
3.8 Diagrama del algoritmo PISO 34
3.9 Esquema de la fracción volumétrica VOF. Fuente: autor 36

4.1 Estado 0 del ciclo OWC. 40
4.2 Estado 1 del ciclo OWC. 40
4.3 Estado 2 del ciclo OWC. 41
4.4 Estado 3 del ciclo OWC 41
4.5 OWC con variables de interés del análisis dimensional, Fuente: autor. 42
4.6 Diagrama de OWC con los puntos t_1 y t_2 45
4.7 Diagrama de OWC con los punto t_1 y T_2 y la derivada de la función η 46
4.8 Asomeramiento desde aguas profundas a aguas someras/ de transición 48

5.1 Planos del modelo utilizado en la publicación. Fuente [1] 50
5.2 Malla del modelo de referencia en OPENFOAM. Fuente [1] 51

5.3 Altura de la columna de agua. Las líneas punteadas rojas representan las mediciones físicas medidas en el canal de olas. La línea continua azul representa el valor obtenido por la simulación numérica en la publicación. 51
5.4 Malla del modelo utilizado en Fluent 52
5.5 Etapa 1, diagrama de fase t/T=0 55
5.6 Etapa 2, diagrama de fase t/T=0.8 55
5.7 Etapa 3, diagrama de fase t/T=3.2 56
5.8 Etapa 4, diagrama de fase t/T=3.7 56
5.9 $A = A_0$, t/T=0 57
5.10 $A = A_0$, t/T=0.8 57
5.11 $A = A_{max}$, t/T=3.2 57
5.12 $A = A_{min}$, t/T=3.7 57
5.13 Ilustración del punto elegido, para obtener de forma indirecta la elevación de la columna de agua con la presión hidrostática. Fuente: autor 58
5.14 Elevación de la columna de agua 59

6.1 Rosa de H_{m0} de Mejillones 61
6.2 Histograma de T_{m0} de Mejillones 61
6.3 Histograma de H_{m0} de Mejillones 62
6.4 Tabla de frecuencia de T_{m0} y H_{m0} de Mejillones 62
6.5 Vista satelital de Puerto Coloso 63
6.6 Vista satelital de la zona de instalación de OWC 63
6.7 Plano de la geometría utilizada en el modelo. Las dimensiones no están a escala . . 64
6.8 Malla del modelo utilizado 65
6.9 Diagrama de validez de teorías de oleaje 68
6.10 Diagrama de condiciones de borde del dominio numérico 69

7.1 Estado 0, diagrama de fase, t/T=0 70
7.2 Estado 1, diagrama de fase, t/T=4,58 71
7.3 Estado 2, diagrama de fase t/T=6 71
7.4 Estado 3, diagrama de fase t/T=8,5 71
7.5 Ilustración del punto elegido, para obtener de forma indirecta la elevación de la columna de agua con la presión hidrostática. 72
7.6 Elevación η de la columna de agua 73
7.7 Velocidad del aire, t/T=4,0 74
7.8 Velocidad del aire, t/T=7,2 74
7.9 Velocidad del aire, t/T=7,6 74

7.10 Velocidad del aire, t/T=9,6 74
7.11 Ilustración del punto elegido, para obtener de forma directa la velocidad en la boquilla del OWC 75
7.12 Velocidad $v(t)$ de la boquilla del OWC 75
7.13 Curva de coeficientes de caída de presión y torque de la turbina Wells. Fuente [2] . 77
7.14 Curva de eficiencia de la turbina Wells. Fuente [2] 77
7.15 Velocidad en la boquilla del OWC y velocidad eficaz 78

8.1 Distribución de H_0 en Chile 80
8.2 Extrapolación de los resultados obtenidos en función de H_0 83

Nomenclatura

Símbolo	Significado, unidades
H	Amplitud del oleaje, m
λ	Longitud de onda, m
T	Periodo del oleaje, s
f	Frecuencia del oleaje, 1/s
C	Celeridad del oleaje, m/s
C_g	Celeridad de grupo, m/s
h	Profundidad del fondo, m
λ_0	Longitud de onda del oleaje en aguas profundas, m
λ_s	Longitud de onda del oleaje asomerado, m
H_0	Amplitud del oleaje en aguas profundas, m
H_s	Amplitud del oleaje asomerado, m
K_s	Factor de asomeramiento, -
η	Perfil de la interfaz agua y aire, m
p	Presión, Pa
P	Potencia, W
A_0	Altura de la columna de agua al nivel hidrostático, m
A_{max}	Longitud máxima de la columna de agua, m
A_{min}	Longitud mínima de la columna de agua, m
V_c	Volumen de aire en la cámara del OWC, m^3
V_{cd}	Volumen de aire desplazado de la cámara del OWC, m^3
x_{owc}	Punto espacial dentro de la cámara del OWC, m
v_e	Velocidad eficaz axial, m/s
α	Porcentaje de fase contenido en una celda, -
s	Área contenida bajo una ola, m^2
a_b	Área de la sección transversal de la boquilla del OWC, m^2
a_{owc}	Área de la sección transversal de la cámara del OWC, m^2
σ	Solidez del rotor, -
C_A	Coeficiente de caída de presión, -
C_T	Coeficiente de torque, -
φ	Coeficiente de flujo, -
Q	Caudal de aire, m^3

Capítulo 1

Introducción y Definición del Problema

La minería en Chile es una de las actividades protagonistas en términos económicos, representa cerca del 7% del P.I.B. y su proyección en la próxima década no espera bajas. Por esta razón se presentan las mayores inversiones en investigación y una fuerte innovación en soluciones eficientes que presenten no solo una mejora en los procesos, sino un impacto positivo y amigable en términos políticos, ambientales, económicos y sociales.

1.1 Proyección de Energía y consumo de agua en la minería

La demanda energética de la industria minera seguirá en crecimiento de acuerdo con su producción. La proyección de energía en los próximos años de la demanda energética total de la minería del cobre según Cochilco se presenta en la tabla 2.1

Fuente/año	2021	2022	2023	2024	2025
Renovable [TWh]	11.4	16.1	18.6	19.73	10.6
Total [TWh]	25.8	27.1	29.1	31.2	34.0
Ratio [%]	44.0	59.2	63.9	63.3	62.3

Tabla 1.1: Consumo de energía por la industria del cobre. Fuente: [3]

Si bien estos valores son los promedios proyectados, representan la tendencia general y su comportamiento a lo largo de los próximos años en industria, las inversiones y futuros proyectos que tendrán como protagonista las fuentes de energías renovables y un desarrollo sostenible con foco autosuficiente.

Bajo este enunciado y en la creciente actividad minera, en la próxima década el uso de aguas continentales no será capaz de suministrar el consumo de la industria. Ante estas proyecciones, la tendencia en la matriz de alimentación de aguas en la minería tendrá que diversificar y encontrar

Origen/año	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030
Continental	13,3	12,8	12,9	13,2	13,4	12,9	12,4	12,6	12,3	12,3	12,5
Marina	5,0	5,6	7,5	8,2	9,2	9,9	10,6	10,9	10,7	10,9	11,0

Tabla 1.2: Proyección de tasa de promedio anual en la próxima década, valores en [m3/s]. Fuente:[4]

otras fuentes viables para un desarrollo escalable en el tiempo. Dentro del espectro de soluciones, el mar se presenta como una solución viable y casi inagotable de agua. Por esta razón el consumo de agua desalinizada va en aumento de acuerdo con las estimaciones de la tabla 1.2.

1.2 Desalinizadora EWS

La estrategia hídrica 2018-2030 de Minera Escondida tiene como objetivos aumentar el consumo de agua desalinizada, incrementar la recuperación del recurso desde sus procesos y reducir gradualmente el uso de acuíferos como fuente de obtención de este insumo crítico.

Es por esto que BHP apuesta a su planta desalinizadora EWS (figura 1.1), ubicada en Puerto Coloso, Antofagasta. Tiene un rol clave para alcanzar la meta del uso de agua de mar, dadas sus características técnicas y capacidad de 2.500 [l/s], que la posiciona como la de mayor magnitud en Latinoamérica y 3° a nivel mundial.



Figura 1.1: Vista superior de la planta EWS

La implementación de la planta y el uso de agua de mar, significan desafíos para la industria. En primer lugar la planta se encuentra a 3200 [m] sobre el nivel de la planta, lo que implica una demanda energética de bombeo, y por otro lado, el proceso de desalinización de igual forma requiere cerca de **134** [**MW**] según MCH (minería chilena) [7].

El problema en EWS y oportunidad

Actualmente el abastecimiento de la desalinizadora es 100% de una termoeléctrica de ciclo combinado, lo que va en contra de la tendencia de la industria y el compromiso de la minera con su matriz energética.

1.3 ¿Por qué en EWS?

- **Ratio de energía renovable inferior a la industria**: Como se presentó en la tabla 2.1 actualmente el porcentaje de energía renovable de la industria es del 10% y se proyecta que llegara hasta un 50% en los próximos años.
- **Compromiso de BHP con su matriz energética**: BHP hizo un comunicado donde declaró que en la próxima década se abastecerá minera escondida y Spencer con 100% de energías renovables.
- **Planta en la costa**: EWS ya cuenta con instalaciones en la zona costera, siendo una puerta de entrada de esta tecnología a diferentes plantas.
- **Disponibilidad**: La minería requiere un suministro constante de agua en su proceso, por esta razón la disponibilidad anual de la desalinizadora EWS (como sistema aislado) es del 99%. De esta manera el suministro de los 134[MW] debe ser de una disponibilidad afín con la planta, lo que exige diversificar las fuentes de energías renovables, implementando un sistema OWC que trabaje en redundancia parcial, con fuentes eólicas o fotovoltaicas para garantizar una confiabilidad y disponibilidad total que necesita el proceso minero.
- **El consumo de agua marina**: Los datos presentados en la tabla 1.2 dejan en evidencia la tendencia de la industria, por lo que es inevitable que en los próximos años se construyan más desalinizadoras y existan más plantan en zonas costeras, aumentando el mercado de la instalación de sistemas que incluyan OWC.

1.3.1 Potencia Instalada

De acuerdo con las proyecciones de la diversificación de la matriz energética en la industria minera actual, se proyecta un 50% energías renovables en la industria minera en los próximos años, dentro de distintas energías renovables. Finalmente se busca abastecer un porcentaje del consumo en energía marina.
La generación de energía útil, podría ser aprovechada en el sistema de bombeo de agua a la mina, en el proceso de desalinización de la planta o como suministro de energía para la operación básica de la planta.

1.4 El Problema

Año tras año se le ha dado más importancia al uso de energías renovables y plantas desalinizadoras. Teniendo en cuenta el alto potencial energético renovable de fuentes marinas en el país, esta puede ser aprovechada para reducir la dependencia en los derivados del petróleo en la industria minera. El problema actual con la mayoría de las energías renovables es su baja disponibilidad respecto a energías fósiles y su alta dependencia de las condiciones climáticas. Una posible solución es un sistema de redundancia y diversificación energética, donde las fuentes solar, eólica y marina trabajen en conjunto.

Por otro lado, la necesidad de encontrar fuentes de agua no continental, desencadenará que la minería abra más centrales de desalinización, instalando plantas en la zona costera, facilitando la integración de sistemas de aprovechamiento de la energía marina.
Se planteará una solución ante el déficit de agua en la minería, al instalar un sistema de OWCs cercanas a plantas desaladoras.

Si bien la tecnología de OWC existe hace algunas décadas, no existe una metodología clara que permita determinar la potencia de salida en una zona en particular, lo que dificulta el paso hacia una matriz energética que incorpore esta tecnología.

1.5 Objetivos

Este documento tiene como objetivo estimar la potencia de salida de un sistema OWC en la ubicación de Puerto Coloso a través de un modelo numérico.
Para direccionar este estudio, se proponen los siguientes objetivos específicos:

- Caracterizar el potencial de energía marina teórico en la zona y estimar la batimetría de Puerto Coloso para la selección de la zona con mayor potencial energético del oleaje.
- Diseñar una geometría OWC para las condiciones de oleaje en la zona.
- Utilizar un modelo numérico capaz de reproducir la fenomenología del oleaje en la zona.
- Simular la interacción del oleaje-aire para caracterizar las propiedades de la cámara al interior del OWC y el flujo de aire que circula por la turbina.
- Calcular la potencia promedio de una turbina Wells dentro de un sistema OWC con los datos de la simulación.

- Establecer una configuración del conjunto de OWC para satisfacer un porcentaje de la demanda energética en la planta desaladora de Puerto Coloso.

1.6 Propuesta de innovación

Se propone un sistema de generadores OWC en la necesidad particular del requerimiento energético de la desaladora, ubicada en Puerto Coloso y el compromiso de parte de B.H.P. en el cambio de la matriz energética de la faena minera con fuentes de energía 100% renovables.

Actualmente la desaladora consume 134 [MW] de potencia. Se busca abastecer un porcentaje del consumo con energía marina proveniente de una configuración de OWCs.

Capítulo 2

Estado del Arte

2.1 Proyectos similares

La tecnología OWC es relativamente nueva, el primer proyecto funcional se hizo en 2001, por lo que aún le falta un tiempo de maduración para que sea competitiva respecto a otros tipos de ERNC. Los proyectos más importantes en cuanto a tecnología y desarrollo son 3, se presentarán a continuación en orden cronológico.

Proyecto	Ubicación	Año	Potencia	F.P.
Limpet	Escocia	2001	250 [KW]	0.20
Mutriku	España	2011	300 [KW]	0.11
OE 35	Irlanda/USA	2019	100 [MW]	[-]

Tabla 2.1: Cuadro comparativo de los proyectos más destacables

LIMPET

Inaugurada en 2001, ubicada en Isla de Islay, Escocia. Esta central OWC genera 500 kW con una sola turbina Wells de 2,6 metros de diámetro. La turbina está conectada a una cámara colectora formada por 3 tubos conectados de 6x6 metros. La central LIMPET se construyó en una costa de roca sólida de la isla de Islay. Esta planta fue construida por Queen's University Belfast en asociación con Wavegen Ireland Ltd. Actualmente su capacidad es de 250 KW. [8]

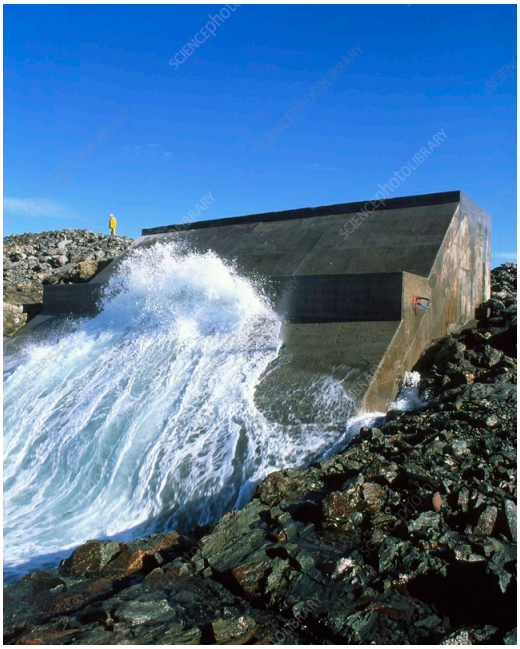


Figura 2.1: Central LIMPET

Mutriku

Inaugurada en 2011, esta central eléctrica de OWC puede generar aproximadamente 300 kW en condiciones adecuadas, con sus turbinas de 16 pozos (debido a un error de diseño solo funcionan 14). Las turbinas fueron provistas por Voith, una empresa que se especializa en tecnología y fabricación de energía hidroeléctrica. Las cámaras de recogida y las turbinas se encuentran en un rompeolas . Los rompeolas son muros artificiales (construidos en alta mar) que bloquean la línea costera de la actividad de las olas (a menudo se utilizan alrededor de los puertos). Cada turbina tiene su propia cámara colectora y las cámaras miden 4,5 m de ancho, 3,1 m de profundidad y 10 m de alto [9]. Ésta fue la primera instancia en la que se utilizaron varias turbinas en una planta.



Figura 2.2: Central Mutriku

La planta tiene una factor de carga de 0,11, la disponibilidad media de las turbinas es 9,94 [9].

OE 35

Inaugurada como prototipo en 2019, es una central tipo boya, fabricada en Irlanda con el apoyo de U.S.A. La central tiene un peso de 826 [ton], y una sola turbina Wells con una potencia de nominal de 100[MW], actualmente no es posible encontrar información técnica de su diseño ni detalles de su construcción. Está diseñada sobre el prototipo OE Buoy de 125 pies que tiene una capacidad nominal potencial de hasta 1.25 [MW]. En ambos casos el único elemento móvil es el rodete de la turbina Wells.



Figura 2.3: Central movil Buoy

2.2 Patentes de uso industrial

La primera patente realizada en este ámbito fue llevada a cabo en 1799 de un artilugio que consiste en el aprovechamiento de la energía del movimiento de las olas. Más de mil patentes fueron registradas para 1980 y ha ido en aumento con el paso de los años.
Actualmente la búsqueda de "oscillating water column" en https://patents.google.com arroja 135,387 resultados de patentes y artefactos relacionados al área. Es importante destacar que de estas patentes menos de 20 equipos han tenido prototipos funcionales.
El primer modelo común de los OWC actuales, fue patentado por Yoshio Masuda en 1999.

El modelo moderno más reciente del sistema OWC presentado, fue patentado el año 2013 por los alemanes Jörg Folchert y Axel Goelz y describe los componentes del sistema, sin hacer un análisis matemático del funcionamiento del mismo.

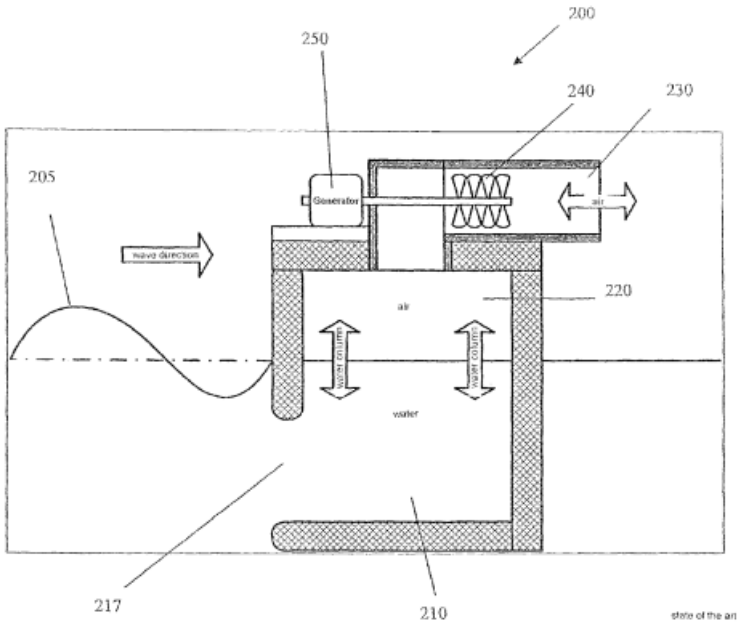


Figura 2.4: Patente de un sistema moderno de OWC del año 2013

Esta patente a su vez, contempla un sistema que no utiliza una turbina y propone un sistema de émbolo/pistón en la cámara de aire con una resistencia para la extracción de energía mecánica.

2.3 Estudios de centros de investigación

La energía marina es un campo de la investigación de energía sumamente fértil. Aún se encuentra en pañales respecto a otras ERNC, sin embargo, los centros de investigación que se dedican exclusivamente al estudio de sistemas OWC son muy pocos, los más importantes son:

- Aquanet power[1]
- Pacific ocean energy [2]
- Ocean Energy[3]

Sin dudas el más importante del sector es Ocean Energy, con el desarrollo de sus boyas O35 y O50, que superan con creces otros diseños de la industria. Puesto que la competencia sobre la investigación está liderada por empresas privadas, se desconoce su resultado.

[1]https://www.aquanetpower.com
[2]https://pacificoceanenergy.org
[3]https://oceanenergyusa.com

Capítulo 3

Marco Teórico

3.1 Normas Ambientales

La entidad reguladora en esta área es el ministerio de medio ambiente, donde en las regulaciones de los procesos el encargado es el servicio de evaluación ambiental (**SEA**).
La legislación vigente a destacar es:

- **Ley 19.300**
- **Decreto Supremo N° 30/97**
- **Decreto Supremo N° 95/02**
- **Decreto Supremo N° 40/2012**

En el apartado **c)** del artículo 10 de la ley 19.300, se menciona que no es suficiente realizar una declaración de impacto ambiental (jurada), sino que también se debe evaluar el impacto ambiental. Para esto se detallan los proyectos o actividades que se deben hacer para una evaluación correcta.

- *Centrales generadoras de energía mayores a 3 MW*[1]

Por lo tanto, el proyecto debe estar sujeto a una **EIA**

3.1.1 Componentes del EIA

1. El artículo 12 de la ley 19.300 indica los requerimientos de la composición del estudio, los elementos clave en forma compacta son:

   (a) Una descripción del proyecto o actividad

[1] https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667

(b) La descripción de la línea de base

(c) Una descripción pormenorizada de aquellos efectos, características o circunstancias del artículo 11 que dan origen a la necesidad del estudio

(d) Una predicción y evaluación del impacto ambiental del proyecto o actividad, incluidas las eventuales situaciones de riesgo

(e) Las medidas que se adoptarán para eliminar o minimizar los efectos adversos del proyecto o actividad y las acciones de reparación que se realizarán, cuando ello sea procedente

(f) Un plan de seguimiento de las variables ambientales relevantes que dan origen al estudio

(g) Un plan de cumplimiento de la legislación ambiental aplicable

Finalmente el comité técnico, coordinado por él SEA emite un ICE Informe consolidado de la evaluación) con recomendaciones y por último, la comisión de evaluación rechaza o aprueba el proyecto con un RCA (resolución de calificación ambiental).

3.1.2 Concesión marítima

Luego de la aprobación del EIA, es necesario solicitar una concesión en el ministerio de defensa nacional. El decreto N°9[2] establece las condiciones y requerimientos, el artículo N°6 del mismo, aclara el tipo de concesión y su duración:

1. Criterios de clasificación. Para efectos de su tramitación, las concesiones marítimas mayores y menores se clasificarán, considerando el plazo de duración, el cual no podrá exceder de 30 años, y la cuantía de los capitales a invertir, del modo siguiente:

   (a) Concesión marítima mayor: aquella cuyo plazo de otorgamiento exceda de 10 años o involucre una inversión superior a las 2.500 Unidades Tributarias Mensuales (UTM)

   (b) Concesión marítima menor: aquella que se otorga por un plazo superior a 1 año y hasta 10 años e involucra una inversión igual o inferior a las 2.500 Unidades Tributarias Mensuales (UTM)

Por lo tanto, según el inciso (a) el proyecto debe considerar una **concesión marítima mayor** puesto que la inversión supera las 2.500 [UTM]. La duración de la concesión será superior a 10 años y no mayor a 30 años, donde existe la posibilidad de renovación.

[2]https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667

3.2 Oleaje

El oleaje es una onda mecánica que se propaga entre el límite de la atmósfera y el mar. Tienen determinadas características como la amplitud, periodo y dirección.
Las olas se generan mediante la interacción de esfuerzos de corte entre el viento y la superficie del mar. La altura de las olas generadas depende principalmente de 3 parámetros del viento: su velocidad, la persistencia en el tiempo y la dirección entre la onda y el viento.
Las olas de aguas profundas, disipan su energía lentamente a medida que se aproximan a la costa, debido a la interacción de la capa límite sobre el fondo marino. En aguas someras, cuando la amplitud de la onda es del orden de magnitud de la **batimetría**, la ola quiebra y disipa gran parte de su energía, en energía cinética turbulenta.

3.2.1 Características del oleaje

Altura (H): Longitud máxima medida desde el nivel más bajo y la zona superior de la onda. Decrece en altamar. La energía de una ola es directamente proporcional al cuadrado de la altura.

Longitud de onda (λ): Distancia entre un ciclo completo de la onda. Fuera de la zona de generación del oleaje la ola aumenta su longitud de onda en aguas profundas. En aguas someras su longitud decrece nuevamente hasta la rompiente.

Frecuencia (f): Valor que indica la cantidad de ondas en una unidad de tiempo. Su inverso ($T=\frac{1}{f}$) indica el tiempo en que se desarrolla una onda.

Celeridad ($\frac{\lambda}{T}$): Velocidad media en la que se desplaza la onda. Una vez generada, la ola aumenta su rapidez conforme avanza. Este hecho es el opuesto al movimiento de los sólidos en un medio con fricción donde la rapidez decrece al avanzar el objeto.

3.2.2 Números dimensionales del oleaje

Las características propias de un frente de oleaje, se pueden parametrizar mediante números adimensionales que permiten clasificar la naturaleza y los modelos apropiados a considerar para su estudio con diferentes modelos.

No linealidad

Un régimen con $\epsilon \approx 0.1$ es un régimen "lineal" y se puede considerar que el fondo no tiene una incidencia significativa sobre la interfaz de la ola. En un régimen con $\epsilon \geq 0.3$, se considera que

la profundidad es lo suficientemente baja como para que el fondo tenga una interacción sobre el olaje.

$$\epsilon = \frac{H}{h} \tag{3.1}$$

Para valores de $\epsilon \approx 0.8$ el oleaje entre en zona de rompimiento.

Ursel Number

Indica la no linealidad de extensas ondas de superficie de gravedad.

$$U = \frac{H \cdot \lambda^2}{h^3} \tag{3.2}$$

Número de Froude

El número de Froude es una relación dimensional de un fluido que relaciona las fuerzas inerciales y la gravitacional. El número de Froude se define como:

$$Fr = \frac{c^2}{g \cdot \lambda} \tag{3.3}$$

Por otro lado, notamos que la velocidad (c) de un frente de olaje, depende de λ_0 (la longitud de onda en aguas profundas) y el periodo con la relación λ_0/T, de esta manera el número Fr en aguas profundas, depende únicamente de la longitud de onda y el periodo del frente de olaje.

3.2.3 Asomeramiento

La condición de no deslazamiento entre el fondo, crea una capa límite que en aguas profundas no afecta al frente. A medida que el frente de oleaje se aproxima a la costa, el fondo comienza a afectar la celeridad. Al disminuir su velocidad y mantener el periodo (T) constante, se ve deformada la longitud de onda (λ), y la altura de la onda (H) aumenta como se indica en la figura 3.1. Este fenómeno es llamado "asomeramiento" o "shoaling". La longitud de onda en aguas profundas depende únicamente del periodo del oleaje y esta dada por la expresión:

$$\lambda_0 = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \tag{3.4}$$

y la longitud de onda, a medida que se enfrenta al asomeramiento esta dado por:

$$\lambda_s = \frac{g \cdot T^2}{2 \cdot \pi} \cdot \tanh(\frac{2\pi h}{\lambda_s}) \tag{3.5}$$

con λ_s la longitud de onda enfrentada a un fondo h

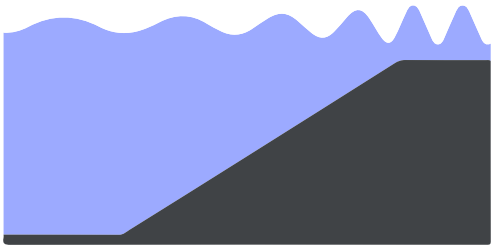


Figura 3.1: Ilustración del fenómeno de asomeramiento. Los tamaños no se encuentran en escala

De igual forma, para calcular el incremento de amplitud de la onda, a causa del asomeramiento, se tiene:

3.3 Energía Marina

Las olas del mar son un derivado terciario de la energía solar. El calentamiento de la superficie terrestre genera viento, y éste a su vez, genera las olas. Una de las características principales de las olas es su capacidad de desplazarse a grandes distancias con mínimas pérdidas de energía. Por ello la energía generada en cualquier parte del océano acaba en el borde continental.
Las distribuciones geográficas y temporales de los recursos energéticos de las olas están controladas por los sistemas de viento que las generan (tormentas, alisios, monzones). Las tecnologías de conversión de energía mecánica de las olas en energía eléctrica se fundamentan en que la ola incidente crea un movimiento relativo entre un absorbedor.

3.3.1 Sistema OWC

Un sistema diseñado para la costa, esta principalmente constituido de dos cámaras. Las olas se rompen en la primera cámara provocando una compresión y una depresión del aire presente en esta parte. Estos movimientos del aire accionan una turbina, que se sitúa en la segunda cámara y de esta manera se produce electricidad.

Este sistema posee una estructura metálica o de concreto (‘colector’) parcialmente sumergida en el océano, la cual esta abierta debajo de la superficie del agua oceánica conteniendo una columna de agua. El aire es atrapado sobre la superficie de la columna de agua. Como las olas entran y salen del colector (debido a su movimiento natural ocasionado por el viento), la columna de agua se mueve hacia arriba y hacia abajo de modo oscilatorio, actuando así como un pistón que mueve el aire adelante y atrás. El aire es acanalado hacia una turbina Wells que es forzada a girar, la cual esta acoplada a un generador para así generar energía eléctrica.

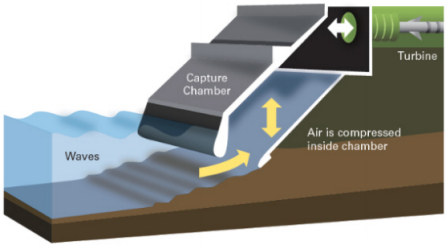


Figura 3.2: Diagrama tipo de un OWC

La estructura es resistente, ya que está hecha de hormigón armado. Además, genera una disminución en la polución visual. Estos dos elementos hacen que no este expuesta a las malas condiciones climáticas del sitio. Sin embargo, las tormentas pueden traer ramas, plásticos, cuerdas a las orillas, lo cual debe ser filtrado.

3.3.2 Turbina en OWC

La turbina es el corazón de la central OWC, y posiblemente el elemento más complejo desde el punto de vista de diseño porque desarrolla su trabajo bajo condiciones de operación desfavorables que condicionan su funcionamiento:

- Amplitud del rango de funcionamiento: las condiciones del oleaje son sumamente cambiantes y la turbina debe ser capaz de trabajar en una amplia gama de situaciones.
- No estacionariedad y bidireccionalidad del flujo. La bidireccionalidad del flujo es otro problema que condiciona el diseño de la turbina, porque debe tener la capacidad de funcionar correctamente en los dos sentidos del flujo debido a que como se ha mencionado el flujo de aire circula por ambas cara del alabe.
- Velocidad de rotación constante: la turbina debe girar a velocidad constante para el correcto funcionamiento del alternador. Esto, combinado con el estado transiente del flujo, condiciona totalmente el patrón de flujo en el interior de la turbina,

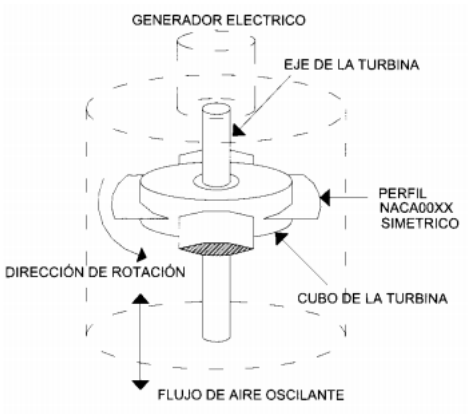


Figura 3.3: Ilustración de una turbina Wells

Para conservar el sentido de giro de la turbina, sin importar la incidencia del aire, el rotor se diseña con perfiles aerodinámicos simétricos.
La turbina Wells es una turbina de reacción, intercambia momento lineal, a través de la segunda ley de Newton, direccionando el flujo de aire.

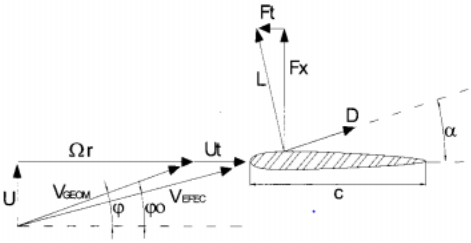


Figura 3.4: Triángulo de velocidades turbina wells

Puesto que la turbina debe funcionar en ambos sentidos, el perfil aerodinámico debe ser simétrico. Los perfiles NACA 00XX indican simetría con los primeros dos dígitos (00) y el valor XX determina el grosor del perfil y el ángulo de elevación del mismo.

Las aspas son similares a cualquier perfil aerodinámico excepto por que estas son simétricas con respecto al eje horizontal. Otros perfiles típicamente poseen formas elípticas y no son simétricas con respecto al eje-x. Por otro lado la turbina Wells utiliza la sustentación y el arrastre para obtener su propia rectificación en la rotación del generador (unidireccional). Cuando el aire se mueve positiva o negativamente, la dirección de giro de las aspas es siempre en el mismo sentido.

3.3.3 Parámetros Característicos

El comportamiento global de una turbina OWC suele evaluarse en función de tres coeficientes principales, coeficiente de flujo, coeficiente de par/torque (o de potencia obtenida) y el coeficiente de caída de presión. El coeficiente que determina el punto de funcionamiento de la turbina es el coeficiente de flujo φ. Este coeficiente tiene la siguiente expresión:

$$\varphi = \frac{v}{u} \tag{3.6}$$

- v: velocidad axial de entrada del flujo
- u: velocidad tangencial de giro de la turbina

El coeficiente de par mide la energía obtenida por la turbina. La potencia útil de una turbina es el par que transmite en su eje por la velocidad de giro. Para adimensionalizar este par se utiliza uno de referencia. El coeficiente de par se calcula de la siguiente forma:

$$C_t = \frac{T_{real}}{T_{referencia}} = \frac{T_0}{0.5 \cdot \rho(v^2 + u^2) \cdot A \cdot r} \tag{3.7}$$

- A: área de sección del rodete
- r: radio de giro en la sección de referencia

Para evaluar la potencia que consume la turbina se utiliza el coeficiente de caída de presión. Se adimensionaliza con una potencia de referencia. La expresión más general es:

$$C_A = \frac{P_{consumida}}{P_{referencia}} = \frac{\Delta p \cdot Q}{0.5 \cdot \rho(v^2 + u^2) \cdot A \cdot c} \tag{3.8}$$

- p: presión del aire
- Q: caudal de aire

Con los coeficientes C_A y C_T se calcula el rendimiento estacionario de la turbina:

$$\mu = \frac{T \cdot w}{\Delta p \cdot Q} = \frac{C_T}{C_A} \tag{3.9}$$

- w: velocidad angular de la turbina

Estas variables dependen implícitamente de φ.

Finalmente es posible obtener una aproximación de la potencia extraída diferencial en un instante de tiempo, mediante la relación entre presión y caudal del flujo de aire en la cámara donde se encuentra la turbina.

$$d\dot{w} = \frac{dp \cdot Q}{\mu_g \cdot \mu_t} \tag{3.10}$$

$$Q = v \cdot a_b \tag{3.11}$$

- w: trabajo
- μ_m: eficiencia del generador eléctrico
- μ_t: eficiencia mecánica de la turbina
- v: velocidad del aire que atraviesa a_b
- a_b: superficie de área constante que comunica la cámara con el exterior.

Es importante destacar que puesto que el flujo no es estacionario, las revoluciones de la turbina tampoco lo son. El generador exige un número de RPM relativamente constante, por lo que es necesario la instalación de un rectificador eléctrico en el sistema del generador.

3.3.4 Potencia de salida diferencial

Inicialmente se tendrá como supuesto que la velocidad del aire desplazado por la columna de agua es inferior a 30[m/s]. De esta forma es posible considerar este flujo como incompresible, por lo tanto, no existirán cambios de densidad significativos en la cámara del OWC, debido a los cambios de presión al interior del mismo.

$$\sum_{i=t_1}^{t_2} \Delta \dot{w}_i \tag{3.12}$$

- $t_2 - t_1$: horizonte temporal característico

3.4 Modelos Matemáticos

Para que la simulación a desarrollar tenga significado y sentido físico, las ecuaciones gobernantes, el ajuste de las condiciones de contorno, los supuestos y modelos, se deben elegir rigurosamente y tratarse con cuidado, para no caer en un modelo de set de ecuaciones que no sean capaces de reproducir la realidad. No obstante, es posible usar ciertas aproximaciones y premisas que permiten usar modelos físicos simplificados, con sus respectivas condiciones de trabajo, que permiten aligerar la carga matemática y computacional, a la vez que los resultados de estos terminan convergiendo y exhiben el comportamiento predominante global del fenómeno.

3.4.1 Teoría lineal del oleaje

La T.L.O. requiere la condición que en nuestro volumen de control el fondo sea aproximadamente regular y sin pendientes significativas. Por otro lado, también es necesario que la profundidad sea al menos un orden de magnitud mayor que la amplitud de onda en la superficie.

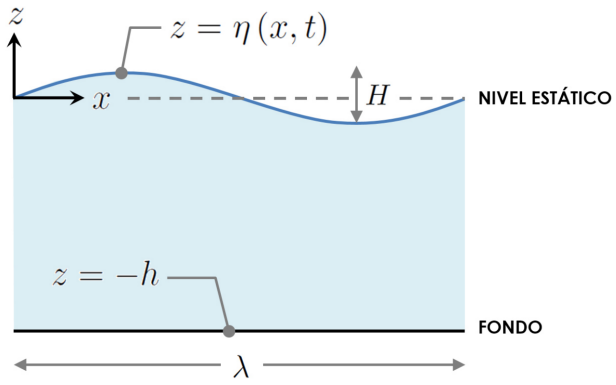


Figura 3.5: Diagrama de las variables utilizadas en T.L.O. Fuente: [5]

La teoría lineal o Airy, es válida para altas profundidades (h) respecto a la amplitud (H) como se ilustra en el diagrama de validez de las teorías de oleaje figura 3.6

$$\frac{H}{h} < 0.1 \tag{3.13}$$

Por otro lado, el flujo solo poseerá 2 grados de libertad de movimiento, traslación y cambios de volumen.
El flujo no posee cizalladura, por lo tanto los esfuerzos de corte y la viscosidad son despreciables. Al ser un flujo irrotacional, no se permiten vórtices y los efectos de la capa límite en el fondo son despreciables. De esta forma:

$$\overrightarrow{\nabla} \times \overrightarrow{V} = 0 \tag{3.14}$$

con $\overrightarrow{V}$ el vector velocidad.

Puesto que el campo de velocidades es irrotacional, $\overrightarrow{V}$ y conservativo, es posible demostrar que existe una función $\phi : R^2 \to R : \nabla \cdot \phi = \overrightarrow{V}$.

Al desarrollar la ecuación de continuidad para un flujo incompresible:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \overrightarrow{V}) &= 0 \\ \nabla \cdot \overrightarrow{V} &= 0 \end{aligned} \tag{3.15}$$

Finalmente, al combinar las ecuaciones (3.14) y 3.15, tenemos la ecuación de gobierno del tipo laplace:

$$\nabla^2 \cdot \phi = 0 \tag{3.16}$$

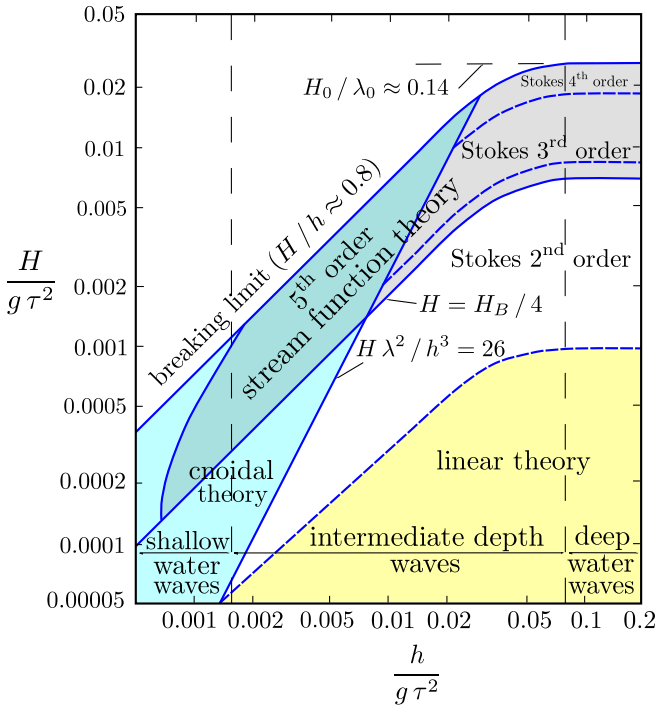


Figura 3.6: Validez de teorías de oleaje. Fuente [6]

3.4.2 Condiciones de Borde

Puesto que es una E.D.P. de segundo orden, es necesario restringir la solución con 4 condiciones de borde.

Interfaz del fondo

Dado que las variaciones del fondo son pequeñas dentro del espacio de una longitud de onda, como se supuso en (3.13), se tiene que:

$$w = \frac{dz}{dt} = 0 : z(-h) \tag{3.17}$$

Interfaz de la superficie

Para caracterizar la interfaz, se expande con una serie de taylor $\eta(x,t)$ en torno al punto 0 (nivel lineal de la onda):

$$\begin{aligned} f(\eta) &= f(0) + \tfrac{\partial f(0)}{\partial z} \cdot \eta + ... \\ f(\eta) &= f(0) + R_1(\eta) \end{aligned} \tag{3.18}$$

con $R_1(\eta)$ un error de primer orden respecto a η

Esto es válido dado el supuesto (3.13), ya que la variación de la interfaz superior es muy pequeña respecto al volumen de control, por lo que $\frac{R_1(\eta)}{h} << 1$.

finalmente:

$$z(\eta) = 0 \tag{3.19}$$

Ecuación de Euler en la interfaz

Al desarrollar los términos de Euler en la interfaz η, se llega a la ecuación de Bernoulli transiente:

$$\begin{aligned} B &= \eta + \frac{P}{\gamma} + \frac{1}{g} \cdot (\frac{||\overrightarrow{V}||}{2} + \frac{\partial \phi}{\partial t}) \\ B &= \frac{1}{g} \cdot \frac{\partial \phi}{\partial t} : z(\eta) = z(0) \end{aligned} \tag{3.20}$$

El término $||\overrightarrow{V}||$ es pequeño bajo el supuesto 3.13 por lo que es despreciable, al igual que el término η.

3.4.3 Teoría de Stokes

La teoría de Stokes, realiza una modelización más aproximada del perfil de la ola añadiendo un segundo término a la serie aunque también se desarrollan series de 3° y 4°. La teoría lineal del oleaje es un caso particular de la teoría de Stokes utilizando un solo término.

$$\eta = \varepsilon_1 \cdot \eta_1 + \varepsilon_2 \cdot \eta_2 ... + \varepsilon_n \cdot \eta_n \tag{3.21}$$

- η: interfaz del oleaje
- ε: factor de expansión de de la perturbación

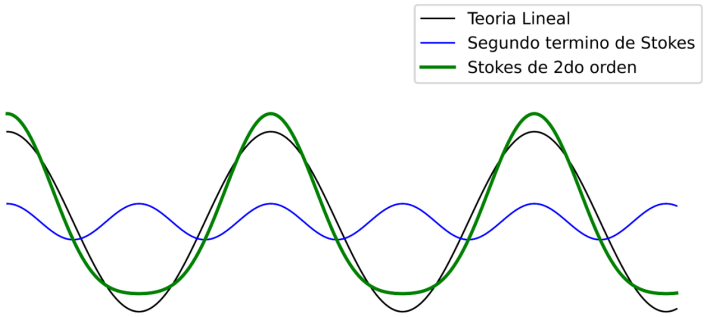


Figura 3.7: Ilustración de Teoría lineal y Stokes de segundo orden en aguas profundas

El perfil que define la teoría de Stokes de segundo orden es un perfil con crestas más altas y delgadas, valles más planos y anchos, aproximándose a la forma que tiene el perfil de olas cuando entra en aguas intermedias y poco profundas.

El perfil de la interfaz según Stokes con dos términos:

$$\eta = \frac{H}{2} \cdot cos(kx - wt)) + \frac{\pi H^2 cosh(kh) \cdot (2 + cosh(2kh))}{2L \cdot sinh^3(kh)} \tag{3.22}$$

Con

- k:$\frac{2\pi}{\lambda}$
- w:$\frac{2\pi}{T}$

3.4.4 Ecuaciones dentro del volumen de control

Ecuación de momentum

Esta ecuación surge al relacionar el momento lineal del flujo con la segunda ley de Newton ($F = m \cdot a$) y la derivada lagrangeana con la eulereana. Es un set de ecuaciones tridimensionales (x, y, z).

Es válida para fluidos tanto el agua como el aire:

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial[\rho u_i u_j]}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i \tag{3.23}$$

- u_i: velocidad del eje
- ρ: densidad del fluido
- p: presión

- τ: esfuerzo de corte presente en el fluido
- f: fuerzas de cuerpo sobre el flujo, como podría ser la gravedad

Es importante notar que la ecuación de momentum, es un caso general de la ecuación planteada en (3.16), sin los supuestos de flujo irrotacional y despreciando el tensor de esfuerzos cortantes.

Conservación de masa para un flujo incompresible y rotacional

Los términos de cambio de densidad en este caso son anulados, puesto que no hay variación en la densidad de un flujo al ser incompresible, lo que reduce la ecuación de conservación de masa a la siguiente expresión.

$$\nabla \cdot V = 0 \tag{3.24}$$

Modelo de turbulencia $\kappa - \omega$

Este modelo de turbulencia se compone de 2 ecuaciones y se utiliza para hacer un cierre en las ecuaciones de momentum. Se intenta reproducir la turbulencia con dos nuevas variables del flujo κ y ω

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j k}{\partial x_j} = \rho P - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial \left[\left(\mu + \sigma_k \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right]}{\partial x_j} \\ + \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\end{aligned} \tag{3.25}$$

$$\begin{aligned}\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j \omega}{\partial x_j} = \frac{\omega \gamma}{k} P - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial \left[\left(\mu + \sigma_\omega \frac{\rho k}{\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right]}{\partial x_j} \\ + \frac{\rho \sigma_d}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}\end{aligned} \tag{3.26}$$

- κ: Energía cinética promedio en turbulencia
- ω: Tasa de disipación de energía cinética en calor por las escalas más pequeñas del flujo.

Este modelo junto con $\kappa - \epsilon$ son los más utilizados y tienen un costo computacional bajo respecto a otros modelos similares, de acuerdo a la documentación de ANSYS.
El modelo $\kappa - \omega$ se conoce como un modelo de bajo número de Reynolds y es capaz de resolver el flujo en las paredes sin agregar funciones de pared. Si bien este modelo respecto a $\kappa - \epsilon$ suele ser más preciso, su convergencia usualmente requiere un extra de costo computacional.

3.5 Mecánica de fluidos computacional

3.5.1 Algoritmo PISO

En mecánica de fluidos computacional, el algoritmo PISO es ampliamente usado para resolver los campos de presión y velocidad a partir de las ecuaciones de Navier-Stokes. El algoritmo usa la relación entre las correcciones de velocidad y presión para lograr la conservación de masa y obtener el campo de presión iterativamente. La ecuación de momentum es resuelta con un campo de presión dado p.

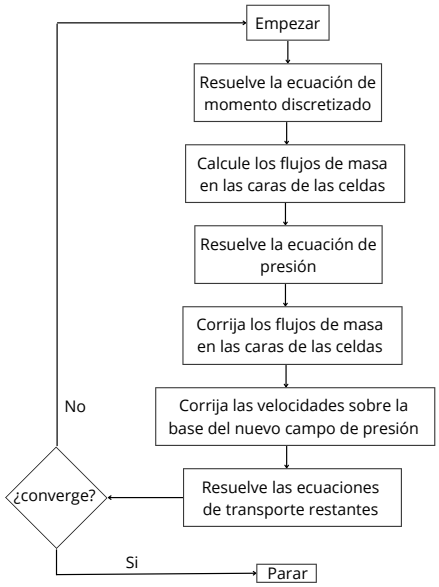


Figura 3.8: Diagrama del algoritmo PISO

Inicialmente se fija un campo de presión arbitrario p^* y se obtienen los componentes de velocidad u_i^* resolviendo la ecuación de momento (Navier-Stokes) de forma discreta. Puesto que la elección de p^* fue arbitraria, generalmente no cumple con las ecuaciones de continuidad. De esta manera se requiere el paso de corrección de presión y velocidades:

$$\begin{aligned} p' &= p^{**} - p^* \\ u_i' &= u_i^{**} - u_i^* \end{aligned} \tag{3.27}$$

con:

- p^{**}, u_i^{**} : campo de presión y velocidad corregido
- p', u_i' : corrección del campo de presión y velocidad

El campo de velocidades corregido se obtiene al utilizar el campo de presión p^{**} corregido en las ecuaciones de momento.
De acuerdo a la precisión buscada, este paso se puede repetir n veces hasta obtener el margen de error buscado.

3.5.2 Modelo VOF

Para el caso de estudio, existe una interacción e intercambio de energía entre dos fluidos: oleaje (agua) y aire. Para poder simular este interacción, se utilizará una interfaz en la superficie del oleaje con un parámetro α de forma que:

$$0 \leq \alpha \leq 1 \tag{3.28}$$

Esta variable representa la cantidad en porcentaje de aire dentro de la interfaz como se muestra en la figura 3.9, en gris un fluido x y en blanco un fluido y. El escalar α_x=0.0 corresponde a la ausencia total del fluido x y α_x=1.0 corresponde a una celda únicamente compuesta por el fluido x, de igual forma un $alpha_x$=0.4 representa una celda compuesta un 40% por el fluido x y un 60% por el fluido y.
El método VOF permite obtener la interfaz o superficie libre del agua a través de la ecuación 3.29. La fracción volumétrica de una fase cualquiera q es α_q, la ubicación de esta interfaz se encuentra encontrando el máximo entre dos nodos o celdas. Por ejemplo el nodo i pertenece a la interfaz si se cumple que el nodo vecino j cumple $max(\Delta\alpha_q) = |\alpha_q(i) - \alpha_q(j)|$

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + u_j \frac{\partial \alpha_q}{\partial x} = 0 \tag{3.29}$$

El método calcula las propiedades del fluido en función de la fracción volumétrica de cada fase, ponderando las ecuaciones de estado por α_q y permitiendo a los fluidos convivir en el misma malla y rastreando el nivel de la interfaz.

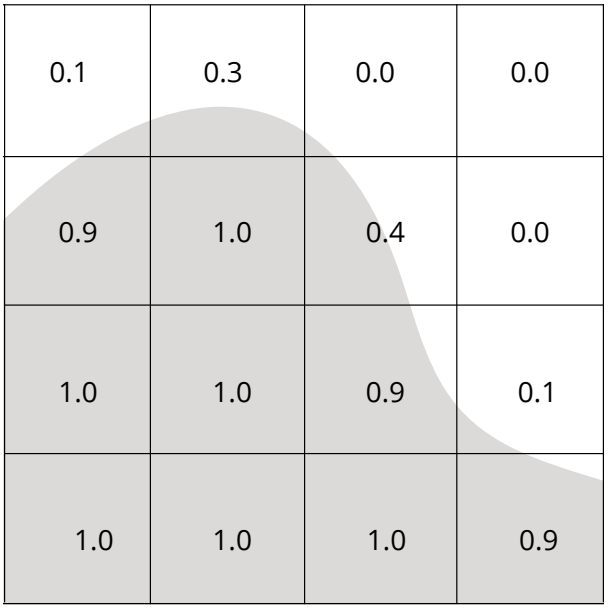


Figura 3.9: Esquema de la fracción volumétrica VOF. Fuente: autor

Capítulo 4

Materiales y Métodos

Mediante el estudio de la situación actual del desarrollo de la energía con sistemas de columnas de agua oscilante, se estudió la potencia de salida de un OWC sometido a un oleaje regular. Para cumplir este objetivo se definió la siguiente metodología de trabajo: estudio de teoría y modelación del problema: etapa inicial en la cual se realizó el estudio teórico que es aplicable al objetivo que se buscó realizar. Según el estado del arte analizado existen múltiples disposiciones frente a la disposición y cámara del OWC, por lo cual lo inicial fue comprender el comportamiento de las olas, sus parámetros más relevantes y como se transmitió la energía en ella. Por otro lado se caracterizó un modelo para describir el movimiento del oleaje dentro del sistema con las variables que intervienen al extraer potencia del sistema.

4.1 Metodología General

En el presente capitulo se describe de forma general la metodología de desarrollo para obtener una estimación de potencia del dispositivo OWC ubicado en Puerto Coloso. Inicialmente para desarrollar el modelo numérico en Ansys Fluent, se realizó una calibración de la simulación con una publicación realizada el 2016 [1] con validación física en un canal de olas. El objetivo general de esta etapa fue tener una referencia de un modelo capaz de representar la física del sistema de una manera casi exacta. Una vez calibrado el modelo con las condiciones del canal de olas físico, con los datos del atlas de oleaje [10] se caracterizaron las condiciones de Puerto Coloso con la amplitud de olaje en aguas profundas H_0 y el periodo T, por otro lado con las vistas satélites de Google Earth en Puerto Coloso, se realizó una estimaciçon de la zona de instalación del OWC, la costa y la rompiente, con la cual se hizo una aproximación de la profundidad h y el fondo donde se desarrolló el oleaje. Con las condiciones y parámetros característicos de Puerto Coloso se generó el modelo en Ansys Fluent con las mismas condiciones de borde y un mallado similar a la simulación desarrollada en el modelo de calibración. Los resultados de este modelo luego fueron exportados

en un archivo CSV y analizados en Python. Dentro de estos datos se usó el vector velocidad en la salida de la boquilla del OWC.
La estimación de la potencia de salida se estimó con los resultados de una turbina Wells [2].

Las principales etapas a lo largo del estudio son:

1. **Análisis de variables involucradas**: Inicialmente se realizó un análisis de las variables que intervienen en un sistema OWC para la obtención de energía, lo que incluyó formulación de ecuaciones de gobierno, planteamiento de relaciones entre variables del sistema y luego un análisis dimensional para realizar una correcta interpretación y elección de variables involucradas en el modelo.

2. **Establecer un marco referencial de modelos validados**: Se tomó un modelo con validación física de un OWC para tomar como un antecedente y punto de partida para la construcción de un modelo numérico y sus resultados.

3. **Calibración y benchmarking**: Se desarrolló un modelo bajo las condiciones del modelo de referencia, recreando esta situación con Ansys Fluent y teniendo algunas ideas previas de los resultados esperados, de acuerdo al marco referencial del modelo con validación física en un canal de olas. El objetivo de esta etapa fue un punto de partida para contrastar los resultados de nuestro modelo y analizar los datos de salida en caso que el modelo no represente el fenómeno de manera adecuada.

4. **Caracterización del oleaje y costa en Puerto Coloso**: Para realizar una modelación capaz de replicar un OWC se tomó un estado de mar típico y representativo de las condiciones en la zona. De igual manera con la batimetría y la caracterización de la rompiente.

5. **Simulación numérica en Puerto Coloso**: Con la correcta realización de las etapas anteriores, se recrearon las condiciones utilizando los condiciones de borde y ecuaciones en la etapa 3 de benchmarking y se reemplazan las condiciones de estado de mar, geometría y costa de Puerto Coloso para obtener la velocidad de salida del sistema y el caudal de aire del OWC.

6. **Establecer la potencia de salida con una turbina Wells**: Mediante resultados numéricos y experimentales, se estimó la potencia de salida por metro lineal utilizando los coeficientes de caída de presión, coeficiente de par, coeficiente de flujo y eficiencia de una turbina Wells.

4.2 Softwares utilizados

- Autodesk inventor: Modelado del sistema OWC con la cámara OWC y el volumen de control del sistema en una plano 2D.
- Ansys Workbench: Creación de la malla computacional del sistema para su correcta representación física.
- Ansys Fluent: Modelo numérico para la evolución del oleaje generado dentro del volumen de control, cálculo de la interacción de parámetros velocidad y presión del sistema bifásico agua-aire.
- CFD Post: Visualización de los resultados obtenidos, análisis de la interacción del sistema y exportación de datos CSV.
- Microsoft Excel: Análisis estadístico de los datos de salida de Ansys Fluent para la estimación de la potencia dentro del periodo de tiempo seleccionado, según la variación del oleaje.
- Python: Análisis y manejo de datos de las exportaciones de CFD post para una visualización en gráficos.
- Canva: Elaboración de diagramas y figuras.

4.3 Variables involucradas y definiciones

4.3.1 Columna de agua, inhalación y exhalación

Los sistemas OWC extraen energía del movimiento del oleaje, transformando el movimiento horizontal de la onda a un movimiento vertical de una columna de agua, y a su vez, el movimiento vertical de la columna de agua transforma su movimiento a energía neumática del aire en la cámara del OWC, que es desplazado hacia el exterior de la cámara (exhalación) donde se extrae la energía utilizando una turbina Wells. Luego al descender la columna de agua, crea una diferencia de presión que permite la re-admisión (inhalación) de aire y la extracción de energía de este flujo másico. En este sistema se pueden distinguir 4 grandes estados:

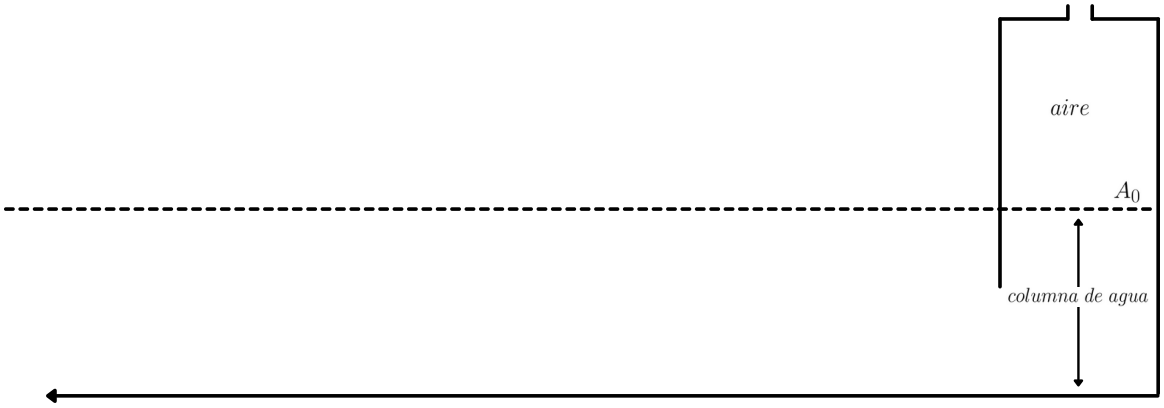


Figura 4.1: Estado 0 del ciclo OWC.

Estado 0: El oleaje aun no se ha aproximado al volumen de control (cámara del OWC), dentro de la cámara hay una columna de agua al nivel hidrostático de altura A_0 que no ha sido perturbada por las ondas. El aire en la cámara del OWC se encuentra estacionario y la turbina Wells no extrae energía del aire.

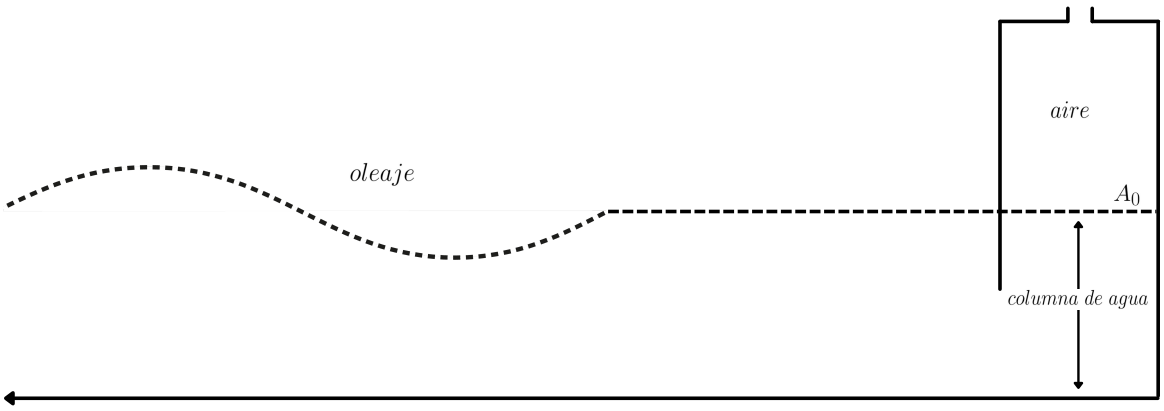


Figura 4.2: Estado 1 del ciclo OWC.

Estado 1: El oleaje se aproxima por la zona izquierda y se desarrolla a lo largo del canal de olas con una altura de ola H, un periodo T y una longitud de onda λ y una celeridad $C = \frac{gT}{2\pi} tanh(\frac{2\pi h}{\lambda})$, hasta enfrentarse con la pared del OWC. La columna aun permanece en A_0, el aire estacionario y la turbina sin extraer energía del aire.

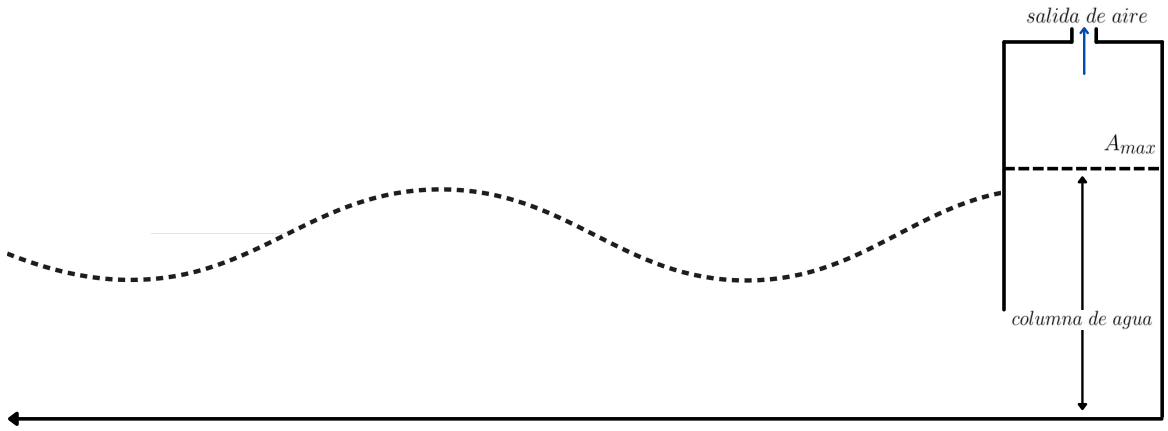


Figura 4.3: Estado 2 del ciclo OWC.

Estado 2: El oleaje alcanza el OWC, una parte de la energía del oleaje ha sido transferida hacia la columna de agua, aumentando su altura desde A_0 hasta A_{max}, desplazando una masa de aire por la boquilla. La columna de agua se comporta de manera similar a la interfaz del oleaje η, la cual sube de manera plana, con un desfase respecto a a la onda incidente.
Desde el cambio de A tal que $A \neq A_0$ la turbina empieza a extraer energía del flujo de aire durante el proceso de exhalación.

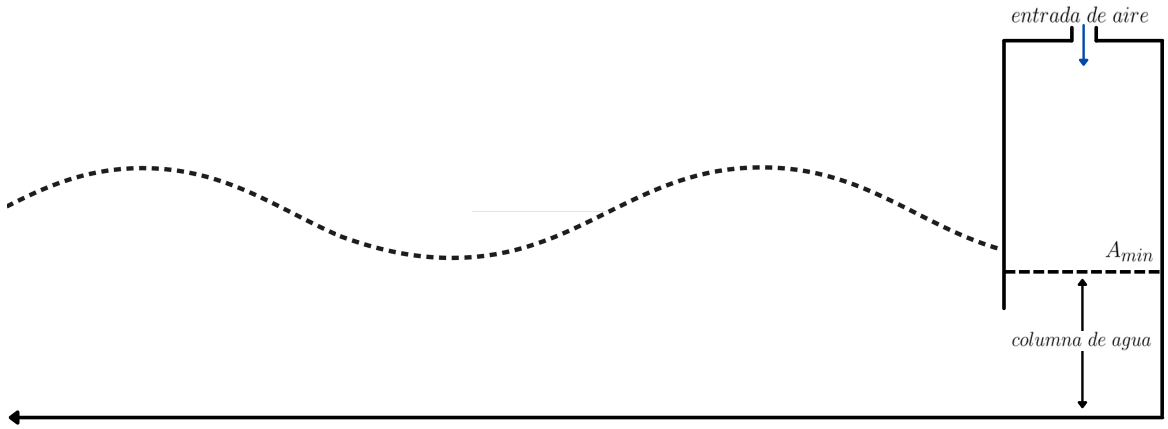


Figura 4.4: Estado 3 del ciclo OWC

Estado 3: Luego de que la columna de agua alcance su elevación máxima A_{max}, esta disminuirá, creando una baja presión en la cámara y permitiendo que vuelva a ingresar la masa de aire iniciando el proceso de inhalación, lo que permite de igual forma la extracción de energía del aire en la turbina. La columna de agua hace un recorrido de A_{max} hasta A_{min}, para luego repetir el ciclo.

4.4 Análisis dimensional

En el análisis dimensional de caso de estudio se consideraron algunos supuestos para determinar las principales variables que determinan el comportamiento general en la salida de potencia del OWC. Las principales consideraciones para determinar los números dimensionales son las siguientes:

- El aire contenido en la cámara del OWC no hace resistencia al avance de la columna de agua.
- La dirección del frente de oleaje es perpendicular a la estructura del OWC.
- La potencia entregada en cada ciclo y entra cada subida - bajada de la columna de agua, es la misma.
- No hay disipación de energía por interacción con el fondo.
- El aire será incompresible (debido a las bajas velocidades).
- El aplicable teoría lineal de oleaje.

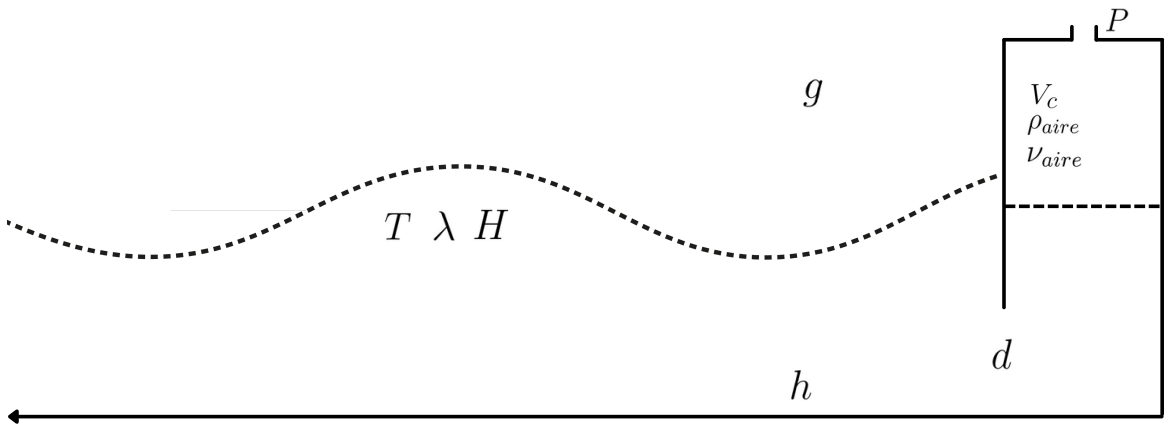


Figura 4.5: OWC con variables de interés del análisis dimensional, Fuente: autor.

Las variables principales para crear una relación funcional con la potencia generada de acuerdo a la suposiciones anteriores y la configuración descrita del sistema es:
Potencia (P): Para relacionar la variable de estudio con parametrizaciones del sistema OWC.

Periodo (T): Caracterización de cada ciclo de las olas y su energía.

Longitud de onda (λ): Parámetro característico del oleaje que determina la velocidad y dimensiones del oleaje.

Altura del ola (H): Determina la amplitud de la onda, su energía y la elevación de la columna de agua.

Volumen de la cámara de aire desplazado (V_c): Cuantifica el volumen de aire en la cámara del OWC, que luego es desplazado por la columna de agua hacia la turbina con el recorrido desde A_{min} a A_{max}.

Profundidad del fondo (h): Determina el régimen del oleaje.

Apertura del OWC (d): Determina el flujo másico de agua que es transferido a la cámara del OWC y la fracción de onda que es reflejada.

Densidad del aire (ρ_{aire}): Junto con el volumen de aire desplazado determina la masa de aire que interactúa con la turbina.

Viscosidad dinámica del aire (ν_{aire}): Esta propiedad, nos permite determinar la fuerza que es transferida por la masa de aire, hacia los alabes de la turbina, entregando una potencia.

Aceleración de gravedad (g): Fundamental para caracterizar las interacciones gravitatorias sobre la columna de agua oscilante.

Con estos parámetros planteamos la relación funcional con el teorema Pi de Buckingham:

$$P(T, H, \lambda, V_c, h, d, \rho_{aire}, \nu_{aire}, g) = 0 \tag{4.1}$$

Al tener 10 variables y 3 dimensiones físicas (masa, longitud y tiempo), encontramos 6 relaciones dimensionales o números Π que surgen al elegir las 3 variables h, T y ρ_{aire}:

$$\Pi_1 : \quad \frac{T^3 \cdot P}{h^5 \cdot \rho_{aire}} \tag{4.2}$$

$$\Pi_2 : \quad \frac{V_c}{h^3} \tag{4.3}$$

$$\Pi_3 : \quad \frac{T \cdot \nu_{aire}}{h^2 \cdot \rho_{aire}} \tag{4.4}$$

$$\Pi_4 : \quad \frac{T^2 \cdot g}{h} \tag{4.5}$$

$$\Pi_5 : \quad \frac{H}{h} \tag{4.6}$$

$$\Pi_6 : \quad \frac{\lambda}{h} \tag{4.7}$$

$$\Pi_7 : \quad \frac{d}{h} \tag{4.8}$$

$$\tag{4.9}$$

Dentro de estas relaciones, se obtienen los números adimensionales utilizados en teoría lineal de oleaje; la dispersión o profundidad relativa a la inversa $\Pi_6^{(} - 1)$, la cual determina el régimen del oleaje, y la nolinealidad o altura relativa Π_5 el cual determina en términos prácticos la zona de rompimiento y la interacción con el fondo.

Finalmente podemos establecer una relación de la potencia P en menos términos con los números Π_n:

$$P(\Pi_1, \Pi_2.\Pi_3, \Pi_4, \Pi_5, \Pi_6, \Pi_7) = 0 \tag{4.10}$$

4.4.1 Dinámica de la potencia de salida del OWC

Para entender las variables que inciden en la potencia entregada en el sistema, se realizó un análisis del OWC para relacionar la potencia con las demás variables. De esta manera planteamos una expresión de potencia de forma general:

$$Potencia = \mu \cdot \Delta h \cdot \rho_{aire} \cdot \left\| \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} v(t) \right\| \tag{4.11}$$

$$= \mu \cdot \Delta h \cdot \rho_{aire} \cdot \left\| \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} Vc \right\| \tag{4.12}$$

Con:

- μ: Eficiencia de la turbina.
- h: Entalpía específica del aire.
- Vc: Volumen de aire de la cámara del OWC.
- $v(t)$: Velocidad del aire en la boquilla del OWC.

De aquí notamos la relevancia de algunos términos dentro de las variables del OWC, las variables μ y h no dependen de las condiciones del oleaje, sino que de la turbina, por lo tanto Vc tiene una directa relación con la potencia. Se debe tomar el módulo de $v(t)$, puesto que para velocidades negativas el aire entrega potencia debido a la simetría de los alabes de la turbina y no la consume.

Dado que la potencia instantánea no representa la potencia entregada en un ciclo completo del oleaje se debe obtener la potencia instantánea media $\left\| \overline{\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} Vc} \right\|$ en un ciclo de oleaje, para esto se integra la potencia instantánea en al menos un ciclo entero en la columna de agua (que tome un ciclo de exhalación, desde A_{min} hasta el siguiente punto de A_{max} o un ciclo de inhalación, desde A_{min} hasta A_{max} y dividir este valor durante el lapso de tiempo). Establecemos la tasa de cambio

de volumen promedio de un oleaje con celeridad C, amplitud H y longitud de onda λ y x_{owc} un punto espacial de η dentro de la cámara del OWC, entre dos instantes t_1 y t_2 tales que t_1 inicie la etapa de la en A_0 y t_2 finalice en A_0 y que $t_2 = t_1 + \frac{\lambda}{2 \cdot C}$

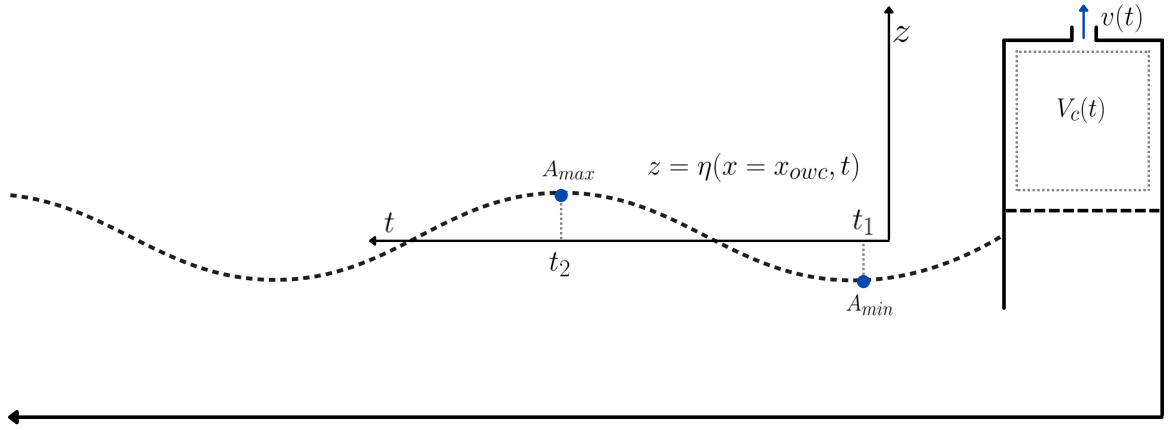


Figura 4.6: Diagrama de OWC con los puntos t_1 y t_2

Al utilizar el teorema de transporte de Reynolds y utilizar la cámara del OWC como el volumen de control, y considerar que la columna de agua cambia aproximadamente con la interfaz $\eta(x = x_{owc}, t)$

$$\frac{d}{dt} m_{aire} = \frac{d}{dt} \int_{OWC} \rho_{aire} dV + \int_{S_{OWC}} \rho_{aire} (\vec{v(t)} \cdot \vec{n}) dS = 0 \tag{4.13}$$

Al considerar que el aire es incompresible, considerando velocidades menores a 30 m/s, la densidad del aire ρ_{aire} no cambia durante el tiempo, por lo tanto:

$$\frac{d}{dt} m_{aire} = 0 + a_{owc} \cdot \frac{dz(t)}{dt} - v(t) \cdot a_b = 0 \tag{4.14}$$

Con a_{owc} el área de la sección transversal de la cámara del OWC, a_b el área de la boquilla del OWC. Por lo tanto:

$$\frac{d}{dt} Vc = -v(t) \cdot a_b = -a_{owc} \cdot \frac{d}{dt} \eta(x = x_{owc}, t) \tag{4.15}$$

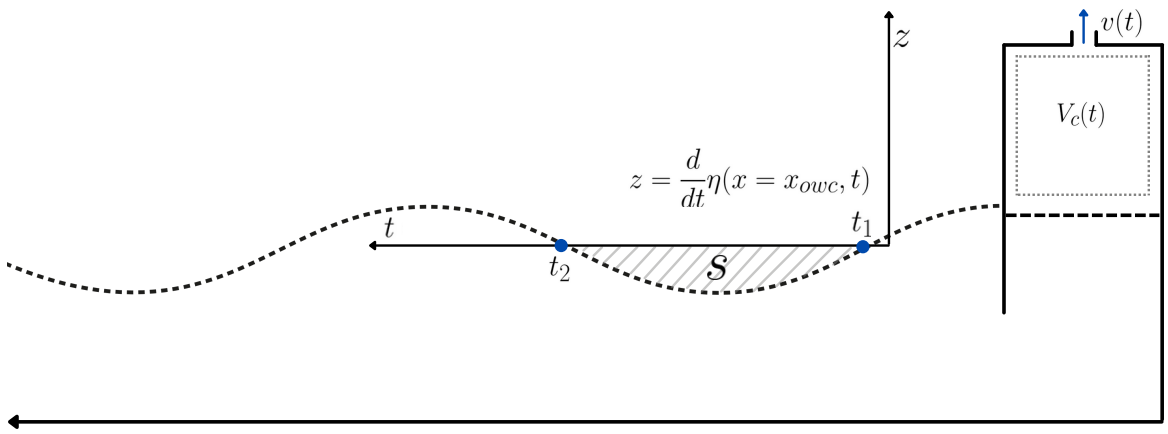


Figura 4.7: Diagrama de OWC con los punto t_1 y T_2 y la derivada de la función η

Por teorema del valor medio integral:

$$\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} f(t)dt = \overline{f(t)} \tag{4.16}$$

$$\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \frac{d}{dt}\eta(x = x_{owc}, t)dt = \overline{\frac{d}{dt}\eta(x = x_{owc}, t)} \tag{4.17}$$

Llegamos a la siguiente relación:

$$\left\| \overline{\frac{d}{dt} Vc} \right\| = a_{owc} \cdot \|s\| / (t_2 - t_1) \tag{4.18}$$

Con s el área bajo la curva de $\eta(x = x_{owc}, t)$ entre los puntos t_1 y t_2. Así el área s es:

$$\int_{t_1}^{t_1 + \frac{\lambda}{2 \cdot C}} \frac{d}{dt}\eta(x = x_{owc}, t)\ dt \tag{4.19}$$

Puesto que es aplicable T.L.O. podemos aproximar la interfaz del oleaje como: $\eta(x = x_{owc}, t) = \frac{H}{2} \cdot cos(t)$, entonces se obtiene el área s:

$$\|s\| = \left\| \int_{t_1}^{t_1 + \frac{\lambda}{2 \cdot C}} -\frac{H}{2} sin(t)\ dt \right\| = H \tag{4.20}$$

Finalmente tenemos una ecuación para el cambio en el volumen de la cámara de aire o la velocidad en la boquilla del OWC:

$$\left\| \overline{\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} Vc} \right\| = \left\| \overline{v(t)} \right\| \cdot a_b = \frac{aH}{\frac{\lambda}{2C}} = \frac{2aHC}{\lambda} \tag{4.21}$$

De aquí es posible concluir que la velocidad en la boquilla del sistema es proporcional a la

amplitud del oleaje H, a la celeridad C, e inversamente proporcional a la longitud de onda λ. Lo cual resulta razonable, puesto que a mayor H la columna de agua desplazara mayores masas de aire y de igual modo, a periodos más cortos, desplazara esta masa de aire en menos tiempo. Sin embargo, esto es bajo los supuestos considerados y sin hacer un análisis de la energía que transporta el oleaje, puesto que la potencia por metro lineal de una ola es proporcional del periodo T.

4.4.2 Energía y asomeramiento

A medida que una onda de aguas profundas se enfrenta con un cambio en el fondo, de forma que la profundidad disminuye, la ola se ve deformada debido a esta interacción. La altura de ola, la longitud de onda y su velocidad sufren cambios a lo largo de una transición de aguas profundas a aguas someras (e intermedias). Una onda al llegar a zonas costeras, aumenta su altura de ola, disminuye su longitud de onda, disminuye su velocidad mientras que el periodo se mantiene constante. Para entender cómo se comportan estas variables, se puede hacer un análisis de energía en un régimen de oleaje de aguas profundas con H_0 hacia un otro régimen en su forma general o aguas intermedias con H_s

La energía mecánica de una onda tiene una componente cinética y potencial.

$$E_{mec} = E_K + E_p = \frac{\rho u^2}{2} + \rho g z + p \tag{4.22}$$

con u la velocidad de la partícula y p la presión.

Al considerar una onda completa, es posible integrar la energía mecánica para obtener una expresión en términos del oleaje:

$$E_{mec} = \int_0^{\lambda} \int_{-h}^{\eta} (\frac{\rho u^2}{2} + p + \rho g z) dz \cdot dx \tag{4.23}$$

Al separar los términos de la presión y la energía potencial se obtiene:

$$= \int_0^{\lambda} \left\{ \int_{-h}^{0} (\frac{\rho u^2}{2} + (p_{dinamica} - \rho g z)) dz + \int_{-h}^{\eta} \rho g z \cdot dz \right\} \cdot dx \tag{4.24}$$

Podemos anular los términos de presión hidrostática con los de energía potencial, puesto que son iguales:

$$= \int_0^{\lambda} \left\{ \int_{-h}^{0} (\frac{\rho u^2}{2} + p_{dinamica}) dz + \int_{0}^{\eta} \rho g z \cdot dz \right\} \cdot dx \tag{4.25}$$

Al reemplazar los términos con las expresiones de teoría lineal de oleaje, se obtiene:

$$E_{mec} = \frac{\rho g H^2}{16} + 0 + \frac{\rho g H^2}{16} = \frac{\rho g H^2}{8} \tag{4.26}$$

.

Al considerar el asomeramiento como un fenómeno que no disipa energía, es posible hacer un balance de energía sobre dos puntos, en aguas profundas y en aguas intermedias, el cual considera que las olas son ortogonales durante el proceso:

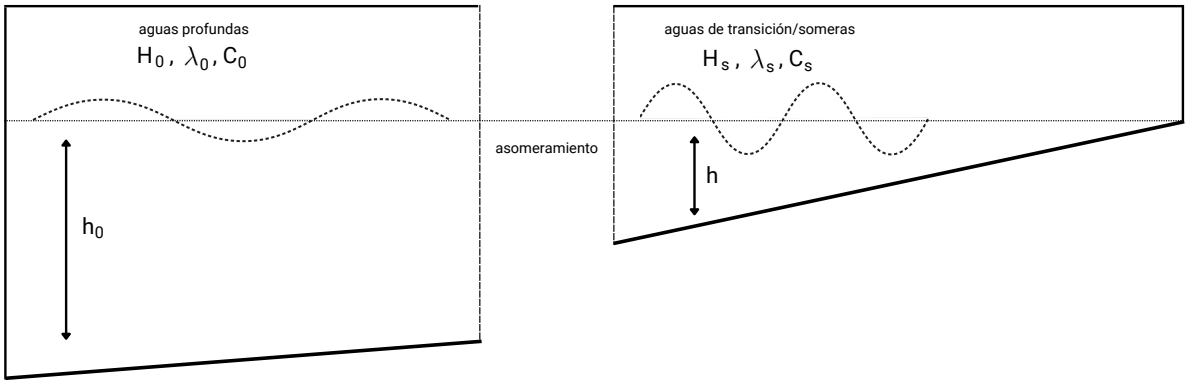


Figura 4.8: Asomeramiento desde aguas profundas a aguas someras/ de transición

$$F_1 = \quad F_2 \tag{4.27}$$

$$E_1 C_{g1} = \quad E_2 C_{g2} \tag{4.28}$$

Con E la energía mecánica y C_g la celeridad de grupo. De esta manera podemos relacionar la altura de ola desde aguas profundas a cualquier otro régimen:

$$\frac{\rho g H_0^2}{8} \cdot \frac{gT}{4\pi} = \frac{\rho g H_s^2}{8} \cdot \frac{gT}{2\pi} \cdot tanh(\frac{2\pi h}{\lambda}) \cdot \frac{1}{2}(1 + \frac{4\pi h/\lambda}{sinh(4\pi h/\lambda)}) \tag{4.29}$$

Despejando los términos, se obtiene la relación entre H_0 y H_s:

$$\frac{H_0}{H_s} = K_s = \sqrt{tanh(2\pi h/\lambda) \cdot \frac{1}{2}(1 + \frac{4\pi h/\lambda}{sinh(4\pi h/\lambda)})} \tag{4.30}$$

Capítulo 5

Desarrollo del modelo numérico

5.1 Modelo numérico con validación física en OPENFOAM

Para tener una calibración general de la modelación numérica, se recrea un modelo con validación física en un canal de olas publicado en 2016 [1]. Este caso de estudio se toma como un marco referencial del comportamiento del sistema OWC. A lo largo del capítulo, se consideran las condiciones presentadas para recrear el modelo numérico.

En la simulación de referencia, el dominio físico utiliza un canal de olas de 28m de largo el cual posee una cámara OWC a escala de las condiciones de oleaje. El canal físico cuenta con una paleta de generación de oleaje con un perfil adecuado para recrear las condiciones de oleaje con el perfil de velocidad y presión. Dentro de la cámara del OWC cuenta con un mecanismo para medir la elevación de la columna de agua oscilante entre otras variables.
El dominio físico tiene un largo de 9m, lo que significa 21m menos al canal de olas físico. Esta reducción de tamaño se considera en búsqueda de un ahorro computacional. La geometría del modelo numérico es idéntica a una vista lateral en 2D del canal de olas físico.

Las condiciones de entrada en el dominio físico y numérico, es un oleaje regular con teoría de Stokes (2do orden) de 0.088 [m] de amplitud, 5.2 [m] de longitud de onda, un periodo de 2.15 [s] y un fondo regular plano a 0.75 [m] de la superficie. Los planos del modelo OWC se aprecian en la figura 5.1.

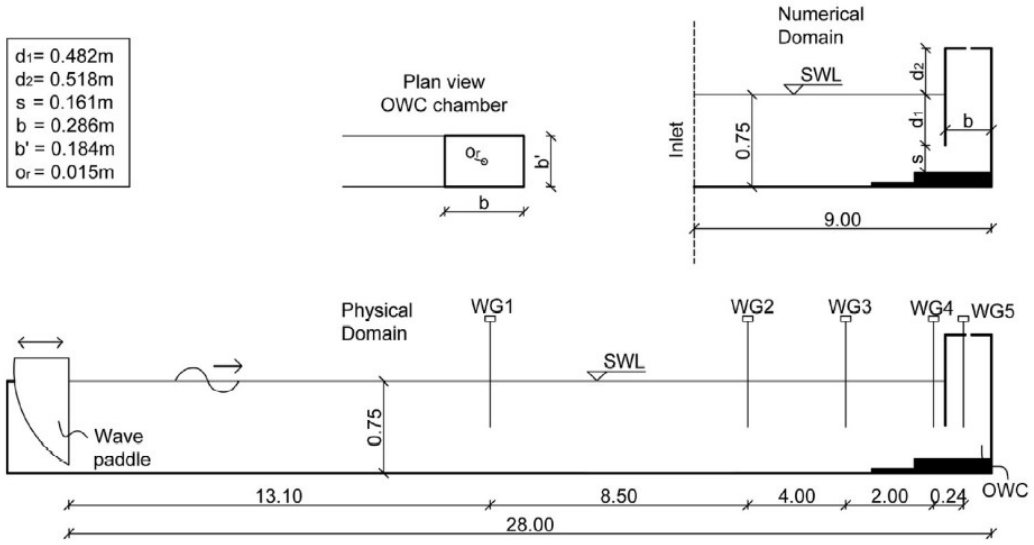


Figura 5.1: Planos del modelo utilizado en la publicación. Fuente [1]

La geometría del modelo tiene un mallado de 1.000.000 elementos con un refinamiento en las zonas donde ocurren los fenómenos más importantes del sistema. Hay un refinamiento en la interfaz bifásica agua-aire, puesto que en esta zona se propaga la onda. La zona superior del modelo y el fondo, tiene una malla menos refinada debido a su importancia relativa. En las proximidades del OWC, dentro de la cámara y el fondo, se realizó un mallado más fino, debido a que la mayor parte de la física ocurre en esta área. La boquilla del OWC posee un refinamiento extra fino, puesto que sus dimensiones son muy pequeñas y un mallado regular, no sería capaz de representar la fenomenología.

Esta modelación utiliza el software OPENFOAM, ecuaciones RANS, y se utiliza el modelo VOF para el flujo bifásico de la interacción agua-aire. Para las ecuaciones de turbulencia, se utiliza el modelo $k-\omega$. La simulación se desarrolla bajo el solver basado en acoplar la presión-velocidad con el algoritmo PISO. Los saltos temporales fueron ajustados y controlados por el número Courant (C_o) en la superficie bifásica con el parámetro "alphaCo" ajustado a 0.2, por lo que la malla temporal no está equiespaciada y depende de las condiciones e interacción del sistema.
Las condición de contorno de entrada del sistema (generación del oleaje), ingresa a 9m de la cámara del OWC y se desarrolla a lo largo del dominio numérico. El modelo incorpora una absorción activa del oleaje con el modelo IHFOAM de OPENFOAM, puesto que una parte de la onda es transferida a la columna de agua, otra es reflejada por la cámara del OWC y vuelve hasta la zona donde ingresa el oleaje.
Como condición inicial del sistema, se establece un estado de oleaje "flat" o sin olas, con una superficie libre a 0m y el fondo a -0.75m, debido a esta razón, las primeras ondas no tendrán

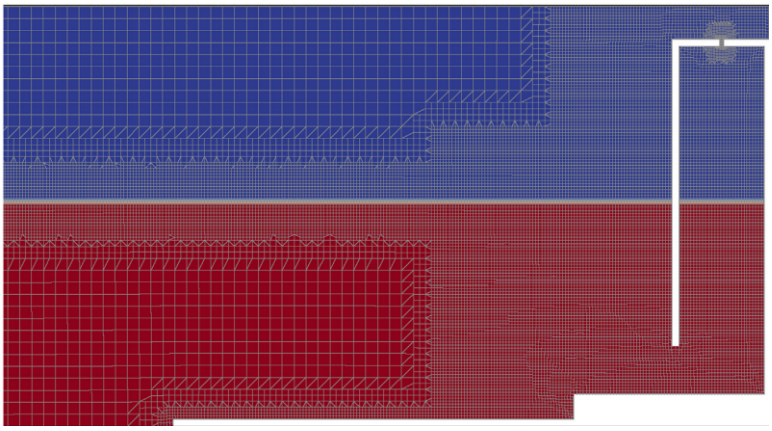


Figura 5.2: Malla del modelo de referencia en OPENFOAM. Fuente [1]

validez puesto que aún no se desarrolla el estado pseudo-estacionario de las olas.

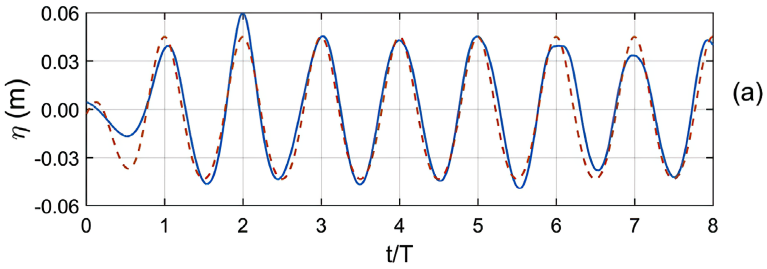


Figura 5.3: Altura de la columna de agua. Las líneas punteadas rojas representan las mediciones físicas medidas en el canal de olas. La línea continua azul representa el valor obtenido por la simulación numérica en la publicación.

La importancia del modelo, se encuentra en la validación física en un canal de olas. El dominio físico y numérico se muestran como "Physycal Domain" y "Numerical Domain" en la figura 5.1. La variable utilizada para validar el modelo fue la elevación de la columna de agua en la cámara del OWC a lo largo del tiempo con una duración de 8 periodos, 6 ondas desarrolladas completamente en un estado pseudo-estacionario y 17.2 [s]. Finalmente los resultados obtenidos se muestran en la figura 5.3. A modo de conclusión, los datos presentan un comportamiento casi idéntico. Los datos físicos tienen algunos máximos más grandes y mínimos más negativos como se ve en la onda 2 y 5.

5.2 Réplica del modelo en Fluent

De los resultados presentados anteriormente [1] se desarrolla un modelo con las mismas condiciones en el software comercial Ansys Fluent y se compara la elevación de la columna de agua en la cámara

del OWC como se muestra en la figura 5.3. Esta parámetro es utilizado para calibrar el modelo numérico y tener un marco de referencia con validación física.

5.2.1 Geometría y mallado

El modelo replica las condiciones geométricas de la publicación. La geometría del canal de olas tiene las medidas exactas utilizadas en dominio numérico del modelo en OPENFOAM, como se muestra en la figura 5.1. El modelo de igual manera se desarrolla en 2D.

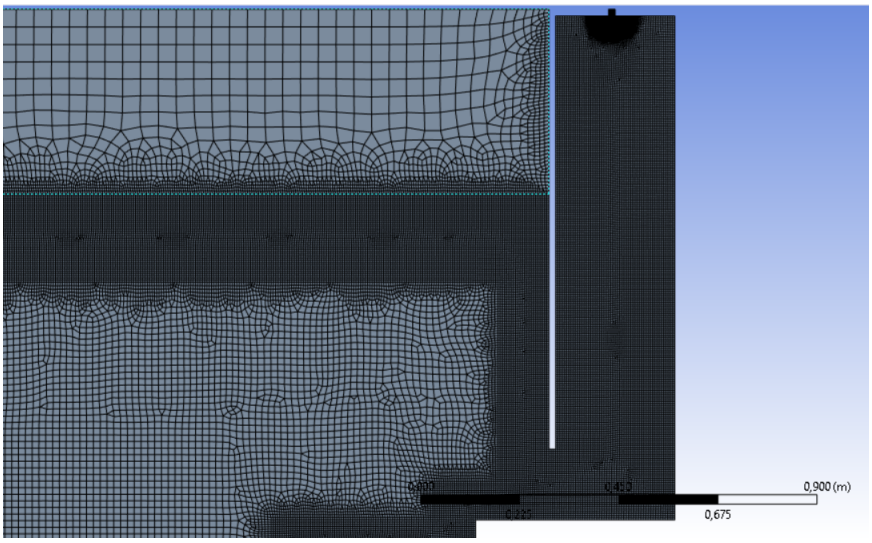


Figura 5.4: Malla del modelo utilizado en Fluent

El mallado se desarrolla dentro del módulo meshing de Ansys. Al igual que en el modelo de referencia, se recrea un refinamiento diferente en 4 diferentes zonas de acuerdo a su importancia relativa en la interacción del sistema:

- Superficie de la interfaz, dado que la onda se propaga por aquí y se encuentra la superficie de la interfaz agua-aire, por lo tanto, se le da un mayor peso a resolución. La altura del oleaje estará discretizada por la malla espacial de esta zona.
- Cámara del OWC, la columna de agua y la cámara del OWC tienen una relevancia significativa en el desarrollo del modelo, puesto que la física del sistema se encuentra aquí, al igual que la superficie de la interfaz estará refinada.
- Fondo y paredes, aquí ocurren intercambios importantes de energía en el sistema.
- Boquilla del OWC, agujero de pequeñas dimensiones y donde se permite la salida y entrada de aire para que exista intercambio de momento en la cámara del OWC.

5.2.2 Configuración, condiciones de borde y modelos

Inicialmente se determinan algunas condiciones generales del modelo dentro del apartado "setup" de Fluent:

- Gravedad en eje y = -9,81 [m/s^2]
- Sistema transiente
- Presión a nivel del mar
- Ecuaciones de multifase agua líquida y aire a condiciones ambientales

Las propiedades termofísicas del agua líquida y el aire, se importaron de la librería de materiales de ANSYS.

El modelo de multifase agua-aire se utilizó VOF, con la configuración condiciones de borde "open channel BC" con un fondo de -0.75 [m] y una superficie libre a 0 [m]. Las condiciones de borde más importantes para replicar el sistema son 2:

Entrada de oleaje, el oleaje se genera en la zona izquierda del modelo, en donde entra un frente de segundo orden de Stokes, el cual no es impuesto y se desarrolla a lo largo del canal.
Por otro lado, la condición de borde de la boquilla del OWC se configura como salida de presión a la atmósfera.

El resto de condiciones de borde, se configura como interior y paredes con condición de no deslizamiento.
Para las condiciones iniciales se configuró una superficie de oleaje plana tipo "flat" la que condiciona al tiempo 0 el sistema sin oleaje, a diferencia de la condición "wavy" que inicia con un oleaje a lo largo de todo el canal.

Borde	Condición de Borde
Entrada	Velocity-inlet
Salida	Pressure-oulet
Zona superior (top)	Pressure-oulet
Base	No-slip wall
Interior	Free-slip wall

Tabla 5.1: Condiciones de borde

El oleaje se define dentro de la condición de borde Velocity-inlet con el apartado de multifase y "openchannel BC" como se muestra en la tabla 6.3

Teoría	Stokes 2do orden
Condición	Intermediate/Shallow
Profundidad h (m)	0.75
H (m)	0.088
T (s)	2.15
λ (m)	5.2
profundidad relativa h/λ	0.14

Tabla 5.2: Oleaje generado

Como condición inicial, se configuró un estado de mar "flat" o sin oleaje, es decir, una estado en el que no existen olas a lo largo del canal, sin movimiento de agua o corrientes.

El oleaje generado corresponde a aguas en transición, debido que la relación $\frac{h}{\lambda}$ se encuentra entre $[\frac{1}{25}, \frac{1}{2}]$, esto significa que el desarrollo del oleaje no se encuentra ni en aguas profundas, ni someras.

El "solver" utilizado, fue el modelo acoplado PISO con una formulación implícita de primer orden, saltos temporales de 0,02 [s], 20 iteraciones por salto temporal de acuerdo a la sugerencia de Fluent [11] y 1000 pasos de tiempo, lo que da un tiempo de simulación de 20 segundos.

5.2.3 Análisis de resultados

Si bien el dato de interés que se requiere analizar es la elevación de la columna de agua en la cámara del OWC, primero se visualizaron los diagramas de fase y velocidad del sistema para comprender el fenómeno del sistema a modo general. Se puede visualizar 4 estados importantes en el desarrollo del canal de olas:

Estado 0: El oleaje entra por la zona izquierda y se desarrolla a lo largo del canal de olas con una celeridad $C = \frac{gT}{2\pi} tanh(\frac{2\pi h}{\lambda}) = 2.42$ [m/s] hasta enfrentarse con la pared del OWC. La columna de agua se encuentra en A_0.



Figura 5.5: Etapa 1, diagrama de fase t/T=0

Estado 1: Una vez la ola alcanza la cámara del OWC, un porcentaje de la onda se refleja al impactar con la pared de la cámara del OWC y el resto de momento circula entre el fondo y la pared del OWC y se transfiere de forma vertical a la columna de agua. La columna de agua subirá a un valor $A > A_0$.

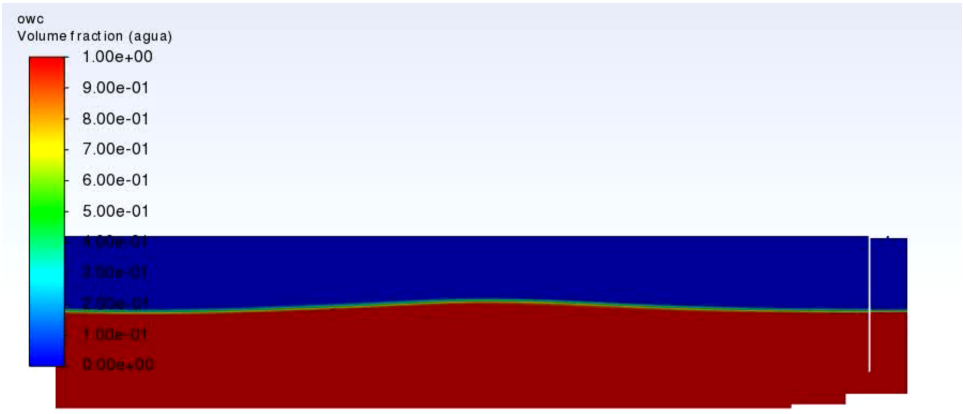


Figura 5.6: Etapa 2, diagrama de fase t/T=0.8

Estado 2: La columna de agua se eleva a una altura $\eta < H$ transmitiendo a su vez su energía a energía neumática del aire en la zona superior de la cámara, de esta forma el aire es "empujado" a salir por la boquilla del OWC. La columna de agua alcanza un máximo en su recorrido a una altura de A_{max}. De aquí notamos que la columna de agua no se encuentra en fase con la ola fuera

del OWC.



Figura 5.7: Etapa 3, diagrama de fase t/T=3.2

Estado 3: Luego de que la columna de agua alcanza un máximo de elevación, el nivel de agua baja durante un tiempo t/T=0.5, creando una zona de baja presión en la cámara lo que fuerza la admisión de aire. La columna alcanza su altura mínima A_{min}.

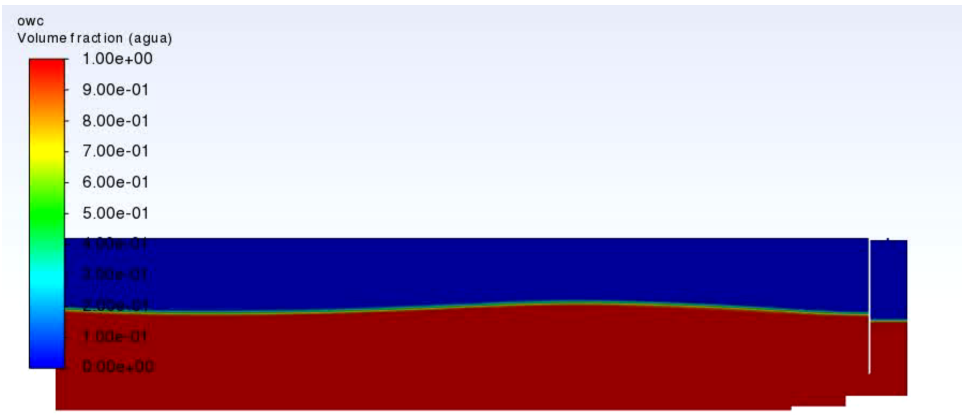


Figura 5.8: Etapa 4, diagrama de fase t/T=3.7

Finalmente este ciclo se vuelve a repetir de acuerdo a las propiedades del oleaje que se aproxima.

La elevación de la columna de agua en los instantes t/T=0 y 0.8 se encuentran a la altura hidrostática del nivel del mar (A_0) puesto que el oleaje aún no ha impactado el OWC como se

observa en las figuras 5.9 y 5.10.
Una vez el oleaje alcanza el OWC, la elevación de la columna de agua alcanza un máximo de altura A_{max} de la serie de tiempo en t/T= 3.2 (figura 7.9) y de igual manera, un mínimo A_{min} en t/T=3.7 (figura 7.10).

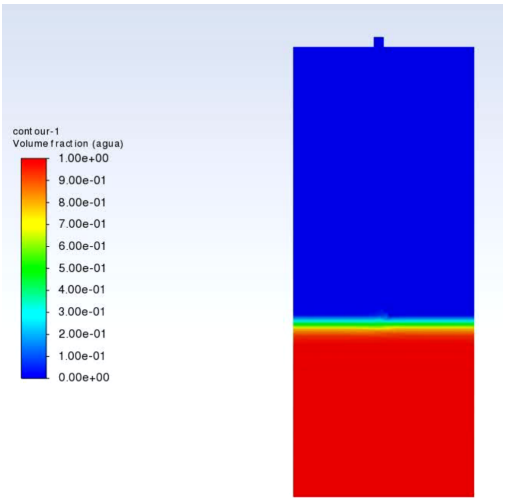


Figura 5.9: $A = A_0$, t/T=0

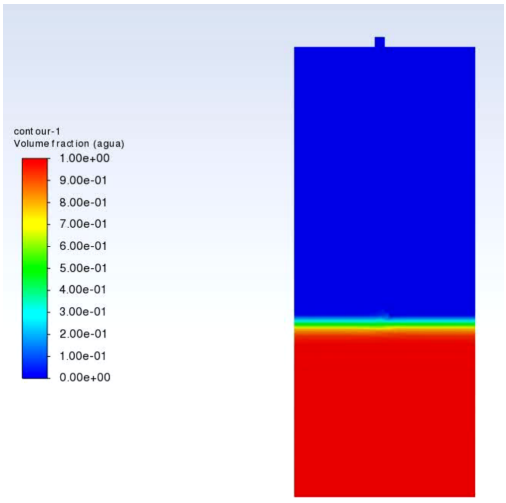


Figura 5.10: $A = A_0$, t/T=0.8

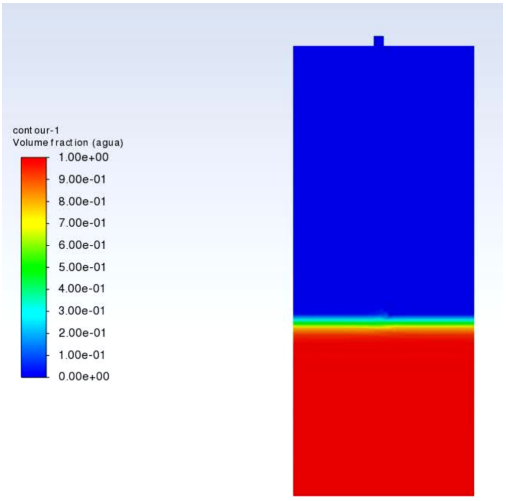


Figura 5.11: $A = A_{max}$, t/T=3.2

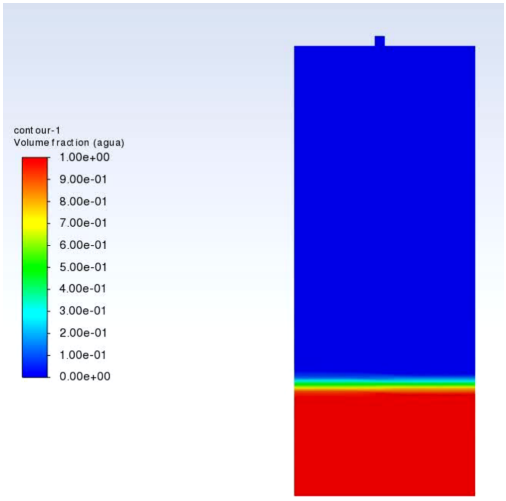


Figura 5.12: $A = A_{min}$, t/T=3.7

Previo a resolver el sistema, se configura un punto a -0,2 [m] de la superficie libre de la columna de agua en la cámara del OWC. Esto se realiza con la finalidad de medir la elevación de la interfaz agua-aire de forma indirecta. De esta manera al tener la presión sobre un punto fijo, es posible obtener la elevación $\eta(x = x_{owc}, t)$, con x_{owc} un punto dentro de la cámara del OWC, despejando la altura hidrostática que se obtiene de la siguiente relación:

$$\eta(x = x_{owc}, t) = \frac{p}{\rho_{agua} \cdot g} - 0.2 \tag{5.1}$$

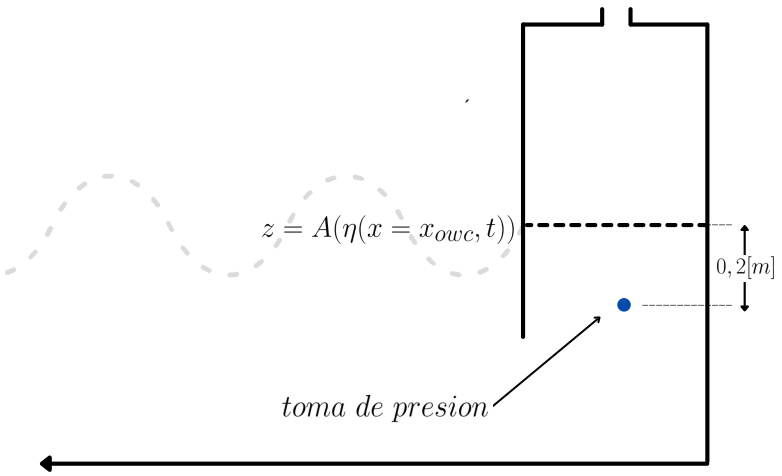


Figura 5.13: Ilustración del punto elegido, para obtener de forma indirecta la elevación de la columna de agua con la presión hidrostática. Fuente: autor

Finalmente, el gráfico de elevación (η) se presenta en la figura 5.14, los resultados son congruentes y similares a los resultados de referencia, si bien existen diferencias en los máximos, esto se puede explicar por el refinamiento de la malla respecto a la altura de oleaje. En azul se presenta la elevación R1 con 22.000 elementos de malla y en rojo R2 con 100.000 elementos de malla, en negro se ven las cotas inferior y superior de los resultados de referencia de la figura 5.3. El modelo de referencia utiliza un mallado con 1.000.000 elementos, mientras que el modelo desarrollado 22.000 elementos. La zona 2 de mallado tiene un tamaño medio de elemento de 0,015[m] mientras que la altura de oleaje es de 0.088 [m], por lo que la resolución de la malla se encuentra en el límite para rescatar la física de la propagación de esta resolución. En vista de lo anterior, se acepta el modelo desarrollado en Fluent para modelar procesos a escala real.

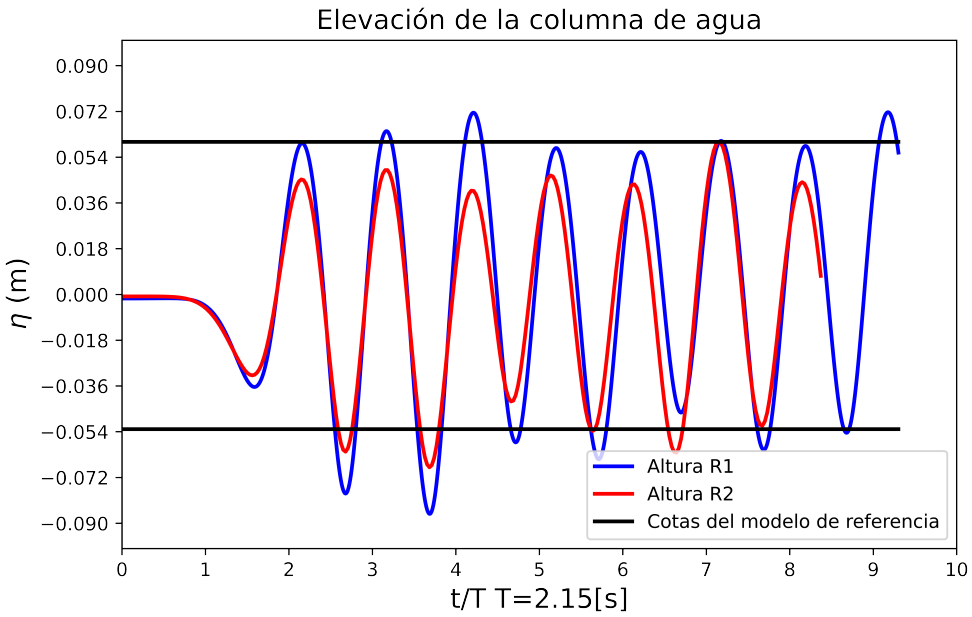


Figura 5.14: Elevación de la columna de agua

Capítulo 6

Modelo numérico de un OWC en Puerto Coloso

Este capítulo se centra en utilizar un modelo para estimar la potencia de salida de un dispositivo OWC. Se utilizó el modelo dentro de Fluent el cual se desarrolló y calibró con un modelo de referencia con validación física en la sección 5.2. El modelo se configuró para simular las condiciones de una instalación OWC en Puerto Coloso.

6.1 Oleaje y rompiente en Puerto Coloso

El Atlas de oleaje [10] contiene datos estadísticos del oleaje a lo largo de la costa de Chile con 22 "nodos" o zonas donde es posible conocer las métricas claves como el espectro de frecuencias, direcciones, histogramas de periodo, amplitud, etc. Para caracterizar el oleaje de Puerto Coloso se utilizó el nodo 3 del atlas de oleaje ubicado en Mejillones, el cual se encuentra a aproximadamente 80 [km] de Puerto Coloso, lo que a escalas y dimensiones de oleaje es muy preciso.

Para encontrar un oleaje que sea capaz de modelar la zona costera en Puerto Coloso se utilizó la rosa de direcciones con H_{m0} (figura 6.1), el histograma de H_{m0} (figura 6.3), el histograma de T_{m0} y la tabla de frecuencia de H_{m0} y T_{m0} (figura 6.4.

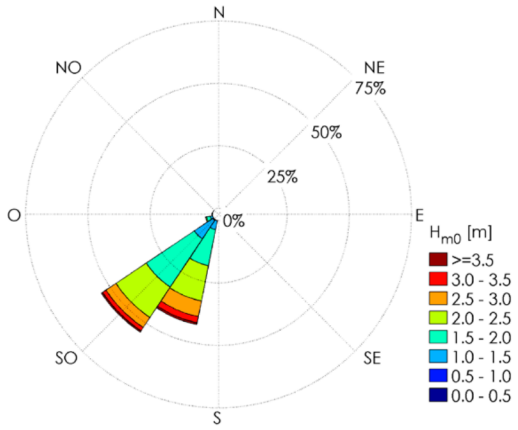


Figura 6.1: Rosa de H_{m0} de Mejillones

De la rosa es posible concluir que aproximadamente la mitad del oleaje tiene un dirección SO pura y la otra mitad una dirección SSO. Por lo tanto es una zona con una relativa constancia en la dirección del oleaje.
Por otro lado, la distribución de amplitud de la onda es bastante similar en ambas direcciones y una predominancia de olas entre 1.5 a 2.5 metros.

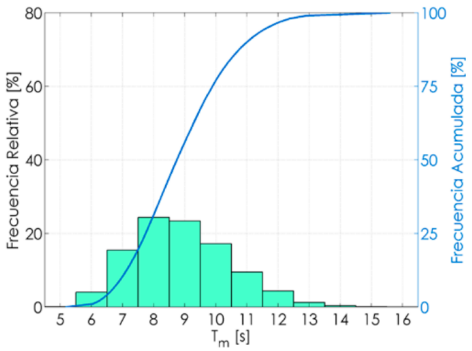


Figura 6.2: Histograma de T_{m0} de Mejillones

El histograma del periodo muestra que T_{m0} se mueve generalmente dentro de los valores 5 a 14 [s], donde la moda se encuentra a la izquierda de la media, por lo que el gráfico no es simétrico y existe una mayor probabilidad que t_{m0} este más inclinado hacia periodos cortos que largos.

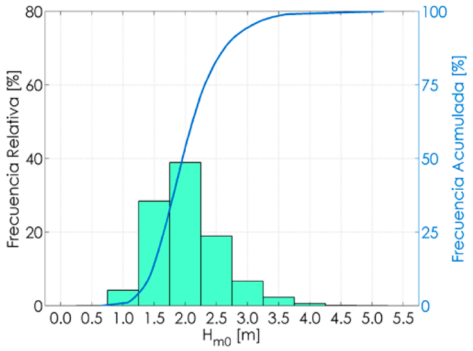


Figura 6.3: Histograma de H_{m0} de Mejillones

En datos del histograma de la amplitud se aprecia que H_{m0} se encuentra generalmente en el rango de 1.0 a 4.0 metros, con una moda de 2.0 y de igual manera que en el periodo, la moda se encuentra hacia la izquierda de la media, por lo que existe una mayor probabilidad que H_{m0} este más inclinado a amplitudes cortas que largas.

	T_m [s]								
H_{m0} [m]	]5-6[	[6-7[	[7-8[	[8-9[	[9-10[	[10-11[	[11-12[	[12-13[	TOTAL
]0-0.5[									0.0
[0.5-1[	<0.1	<0.1	0.1	0.1	<0.1	<0.1			0.4
[1-1.5[	0.3	1.9	3.4	3.8	2.8	1.0	0.2	<0.1	13.5
[1.5-2[	0.5	4.2	8.8	10.4	8.9	5.0	1.7	0.3	39.7
[2-2.5[	<0.1	2.5	5.7	6.6	6.2	4.6	2.6	1.3	29.5
[2.5-3[	<0.1	0.7	2.1	2.4	2.1	1.6	1.3	1.0	11.3
[3-3.5[		<0.1	0.7	1.0	0.7	0.6	0.5	0.5	4.1
[3.5-4[			0.1	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	1.5
TOTAL	0.9	9.4	20.9	24.7	21.0	13.1	6.6	3.4	100.0

Figura 6.4: Tabla de frecuencia de T_{m0} y H_{m0} de Mejillones

Junto con los datos anteriores, la tabla de frecuencias valida nuestros análisis. El rango de T_{m0} más frecuente es de [8-9[que concentra un 24.7% datos mientras que los rangos de [7-8[y [9-10[tienen un 20.9% y 24.7% respectivamente. El rango de H_{m0} de [1,5-2[es el más frecuente con un 39.7% de los datos, mientras que los rangos de [1-1,5[y [2-2,5[concentran el 13.5% y 29.5%.

Finalmente para la caracterización del oleaje en Puerto Coloso, en vista de los datos presentados, se tomó una amplitud H_0 de 1.5 [m] y un periodo de 9 [s], para representar la interacción de un OWC en la zona. Es importante destacar que 1.5 [m] es la cota inferior del rango más frecuente en la zona, por lo que se estima una situación "pesimista" para la altura de ola.

6.1.1 Costa y rompiente

La costa de Puerto Coloso es ”rocosa” y su fondo es de principalmente rocas y en menor medida arena de grano grueso. Se encuentra en una zona montañosa y su exposición al frente de oleaje es relativamente alta respecto a la zona norte donde se ubica el ”Mirador Coloso”.



Figura 6.5: Vista satelital de Puerto Coloso

La instalación de un dispositivo OWC se debe realizar en la zona ”expuesta” (figura 6.6) para un mejor aprovechamiento energético. Para caracterizar el fondo marino se realizaron aproximaciones del fondo marino, sus piedras y la batimetría con las vistas satelitales de Google Earth.
Se estima que el fondo a 50 metros desde la zona de la costa, con profundidad h de 10 [m], tiene una pendiente de 50:4 hasta alcanzar una profundidad h de 6 metros donde se instalara el dispositivo como se muestra en la figura 6.7. También se caracterizó el fondo rocoso con una longitud características de las rocas de 1.5 [m]



Figura 6.6: Vista satelital de la zona de instalación de OWC

6.2 Geometría y mallado

El canal de olas debe tener una longitud apropiada de al menos una onda completa. El estudio numérico realizado en [1] considera un canal de olas de 9.0 m para unas olas de longitud de onda λ de 5.2 m. Para dimensionar la geometría debemos calcular la longitud de onda en las condiciones presentadas para Puerto Coloso.

$$\lambda = \frac{g \cdot T^2}{2\pi} tanh(\frac{2\pi \cdot h}{\lambda}) = 81.7m \tag{6.1}$$

De esta manera se diseñó un canal de olas de 160 [m], en el cual se desarrollan aproximadamente 2 ondas a lo largo del modelo.

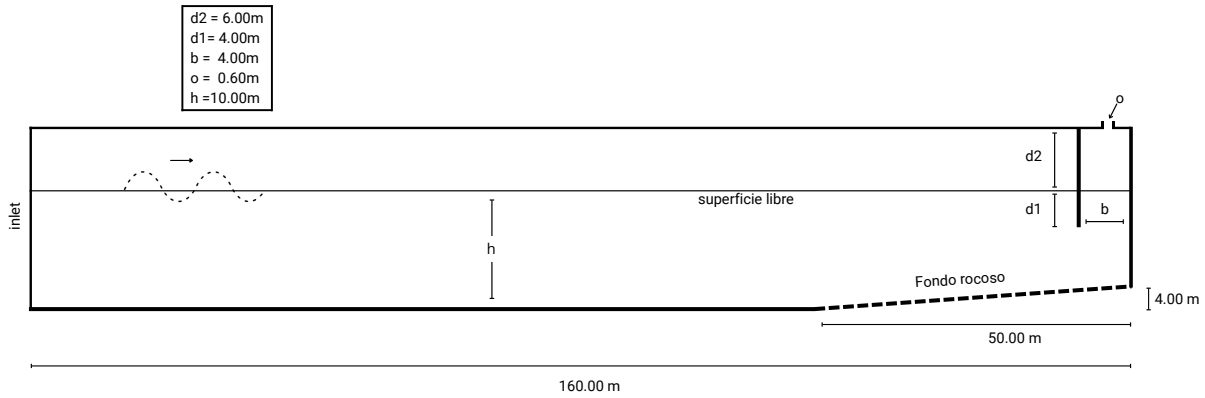


Figura 6.7: Plano de la geometría utilizada en el modelo. Las dimensiones no están a escala

Para dimensionar la cámara del OWC se debe considerar las condiciones máximas de la elevación de la columna de agua, puesto que si la columna de agua entra por la boquilla del OWC con frecuencia podrían existir problemas con la turbina Wells. Por esta razón se diseña para una cámara que se enfrenta a oleaje de 4 [m] (lo máximo registrado en el la tabla de frecuencias) que además se encuentra en condiciones de pleamar o marea alta en luna llena, de esta manera la altura de la cámara debe ser 6 [m]. El orificio de la boquilla debe almacenar una turbina Wells que tiene un diámetro de 0.6 [m]. La profundidad de la cámara debe ser capaz de mantenerse sumergida en condiciones de mínima marea por lo tanto tendrá un profundidad de 4 [m]. Estos valores se observan en la figura 6.7.

Como se mencionó, el fondo rocoso fue representado con un tamaño característico de 1.5 [m], esta medida es el diámetro de arcos de circunferencia, como se observa en la figura 6.8.

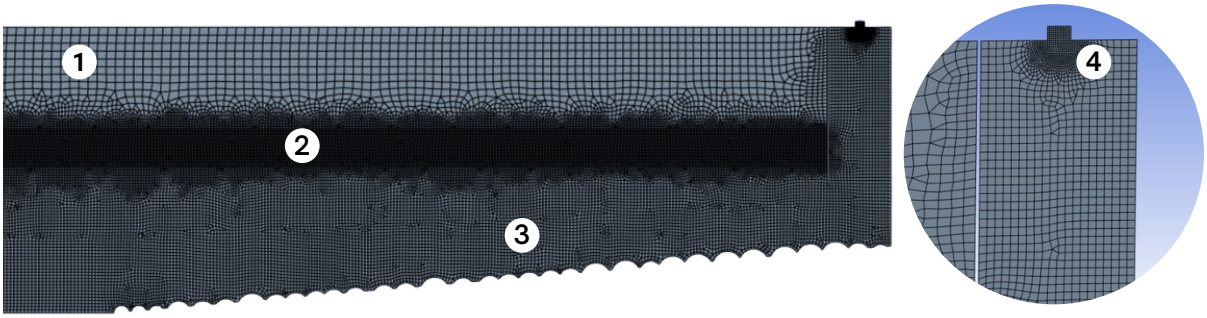


Figura 6.8: Malla del modelo utilizado

La malla cuenta con 4 zonas de diferentes tamaños de elemento de acuerdo a la precisión que se busca.

- **Zona 1**: estas celdas están compuestas únicamente por aire que no interacciona de forma relevante con el oleaje ni con la cámara del OWC, por esta razón el tamaño promedio es de 0.5 [m].
- **Zona 2**: superficie de la interfaz, dado que la onda se propaga por aquí y se encuentra la superficie de la interfaz agua-aire, por lo tanto, se le da un mayor peso a resolución. La altura del oleaje estará discretizada por la malla espacial de esta zona. El tamaño promedio de celdas es de 0.1[m].
- **Zona 3**: cámara del OWC y fondo, la columna de agua y la cámara del OWC tienen una relevancia significativa en los resultados, puesto que la columna de agua desplaza aire por la boquilla. De igual manera, el fondo es relevante para el desarrollo de la onda. El tamaño promedio es de 0.2[m].
- **Zona 4**: boquilla del OWC, agujero de pequeñas dimensiones y donde se permite la salida y entrada de aire para que exista intercambio de momento en la cámara del OWC. El tamaño promedio es de 0.05[m].

La malla con las 4 zonas mencionadas entrega un total de 91.241 elementos y 91.635 nodos, lo cual es un valor cercano al utilizado en la sección 5.2.1 que es de 106.000 elementos y entrega un resultado aceptable.

6.3 Configuración, condiciones de borde y modelos

Una vez la geometría y la malla están configuradas correctamente, se inició el setup de Fluent. Inicialmente se determinaron algunas condiciones generales del modelo:

- Solver basado en presión.
- Modelo en espacio 2D plano.
- Gravedad en eje y = -9,81 [m/s^2].
- Sistema transiente.
- Presión a nivel del mar.

Los modelos utilizados en el setup de fluent son 2 además de las ecuaciones de momento y conservación:

1. **Multiphase**: se configura el modelo homegéneo VOF (volume of fluid) con dos fases eulerianas (agua y aire) con una formulación implícita. Luego se encienden los sub-modelos VOF: *Open Channel Flow* y *Open Channel Wave BC*

Configuración	Selección
Model	Volume of Fluid
Number of Eulerian Phases	2
VOF Sub-Model	Open Channel Wave BC
VOF Sub-Model	Open Channel Flow
Formulation	Implicit

Tabla 6.1: Setup del modelo Multiphase

2. **Viscous**: Aquí se configura el modelo de turbulencia, de acuerdo a la selección se eligen las ecuaciones $k - omega$ con el modelo SST.

Las propiedades termofísicas del agua líquida y el aire, se importaron de la librería de materiales de ANSYS. En las condiciones de operación se establece una presión atmosférica de 101.325 [Pa].

Borde	Condición de Borde
Entrada	Velocity-inlet
Salida (boquilla)	Pressure-opening
Zona superior (top)	Pressure-opening
Base	No-slip wall
Interior	Free-slip wall

Tabla 6.2: Condiciones de borde

Para las condiciones de borde se puso especial atención en la generación de oleaje. Se establece el nivel de la superficie libre η a 0 [m] y el fondo h a -10[m]. Para calcular la amplitud del oleaje H para un fondo de -10 [m] se utilizó la ecuación de conversión de altura en asomeramiento derivada en la sección 4.4.1:

$$\frac{H_0}{H_s} = K_s = \sqrt{tanh(2\pi h/\lambda) \cdot \frac{1}{2}(1 + \frac{4\pi h/\lambda}{sinh(4\pi h/\lambda)})} \tag{6.2}$$

Para calcular λ_0 se utilizó la formulación de aguas profundas para la longitud de onda. Por lo tanto

$$\lambda_0 = \frac{g \cdot T^2}{2\pi} = 126,4m \tag{6.3}$$

. De esta manera se obtuvo la amplitud del oleaje con las condiciones planteadas

$$H_s = H_0 \cdot 1,35 = 1,5m \cdot 1,35 = 2m \tag{6.4}$$

El oleaje se generó en la zona izquierda del modelo, en donde entra un frente de segundo orden de Stokes de acuerdo a la figura 6.9 (las condiciones se encuentran en el punto (0,013;0,0025), con una amplitud H de 2.0 [m] y un periodo de 9[s] el cual no es impuesto y se desarrolla a lo largo del canal.

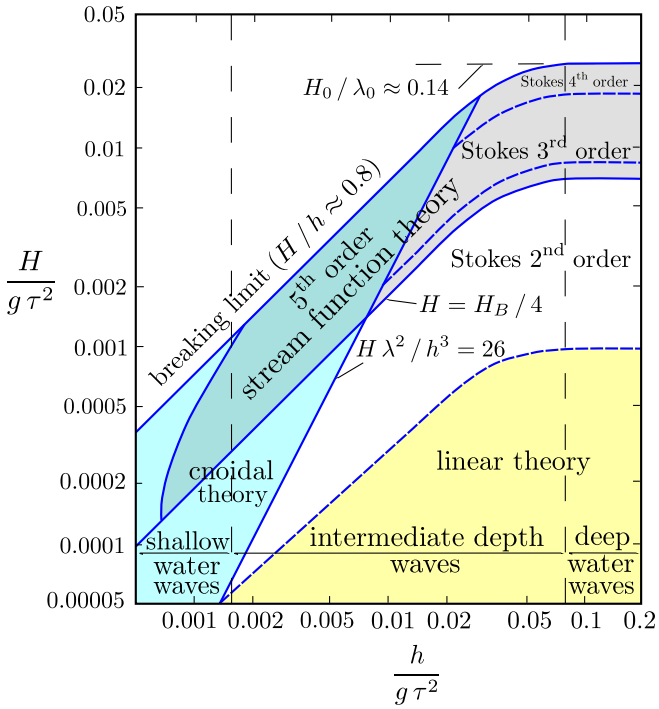


Figura 6.9: Diagrama de validez de teorías de oleaje

Por otro lado, la condición de borde de la boquilla del OWC se configuró como salida de presión a la atmósfera, lo que en términos prácticos, crea un sub-dominio numérico en la zona superior a la boquilla, el cual tiene una presión igual a la atmosférica y es capaz de actuar como como fuente y sumidero de aire.

La zona interior del dominio numérico 2D (canal de olas) se establece como una condición de borde ”interior” o free slip wall, lo que significa que el fluido tiene deslizamiento con el corte transversal del canal de olas numérico. Las paredes de modelo se establecen con la condición de borde ”wall” es decir, una zona impermeable (el fluido no puede pasar a través de ellas) y con la condición de no deslizamiento.

Para las condiciones iniciales se configuró una superficie de oleaje plana tipo ”flat” la que condiciona al tiempo 0 el sistema sin oleaje, a diferencia de la condición ”wavy” que inicia con un oleaje a lo largo de todo el canal.

El oleaje se define dentro de la condición de borde Velocity-inlet con el apartado de multifase y ”openchannel BC” como se muestra en la tabla 6.3

Teoría	Stokes 2do orden
Condición	Intermediate/Shallow
Profundidad h (m)	10.00
H (m)	2.00
T (s)	9.00
λ (m)	81.70
profundidad relativa h/λ (-)	0.122

Tabla 6.3: Oleaje generado

De acuerdo a la profundidad relativa, el oleaje no se encuentra ni en aguas someras ni en aguas profundas, por esta razón se utiliza la formulación completa de un oleaje en transición desde aguas profundas a someras.

Las condiciones de borde y el oleaje dentro de dominio numérico se ilustran en la figura 6.10. Cabe destacar que la condición "Atmospheric oulet" y "Pressure outlet" en términos prácticos es la misma.

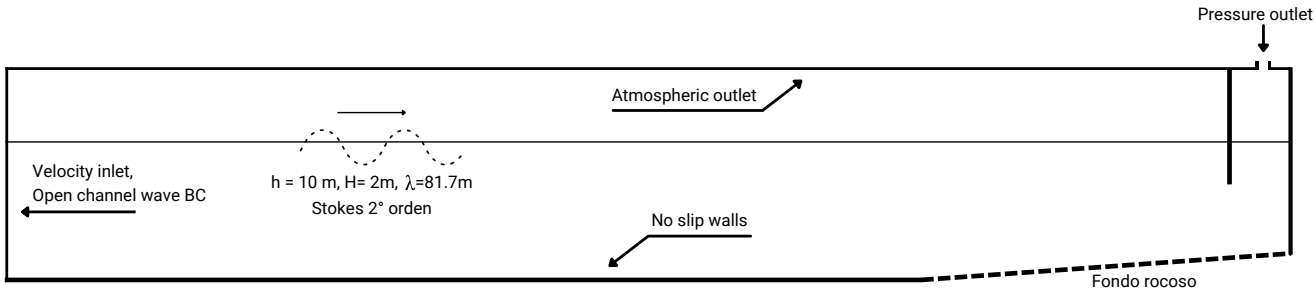


Figura 6.10: Diagrama de condiciones de borde del dominio numérico

El "solver" utilizado, fue el modelo acoplado PISO con una formulación implícita de primer orden, saltos temporales de 0,15 [s], 40 iteraciones por salto temporal y 700 pasos de tiempo.

Capítulo 7

Resultados

7.1 Oleaje y columna de agua

El resultado es un modelo numérico de 105 segundos de duración con aproximadamente 9 ondas completamente desarrolladas (sin considerar la primera y la última). Dado que la profundidad relativa $\frac{h}{\lambda}$ se encuentra dentro del rango $[\frac{1}{25}, \frac{1}{2}]$ el canal numérico no opera en aguas profundas ni en aguas someras, por lo tanto se debe trabajar el estado con la formulación completa de aguas en transición.
Por otro lado, aún nos encontramos con un fondo tal que la onda es capaz de "soportar" sin rompimiento puesto que $\frac{H}{h} = 0.2$, para que exista una zona de ruptura, la relación debe ser $\frac{h}{H} \approx 0.8$ por lo que el fondo debe ser de 2,5 [m] o el oleaje de 6 [m] (para la zona menos profunda), por lo que no se espera ruptura en la simulación. El modelo cumple con los estados esperado de acuerdo a la sección 5.1 y resultados de los diagramas de fase en el canal de olas y en la cámara del OWC son idénticos en su comportamiento. A continuación se presentan los estados descritos en la sección 4.3:

Estado 0: El oleaje entra por la zona izquierda y se desarrolla a lo largo del canal de olas con una celeridad $C = \frac{gT}{2\pi} tanh(\frac{2\pi h}{\lambda}) = 9{,}1$ [m/s] hasta enfrentarse con la pared del OWC. La columna de agua se encuentra en A_0, por lo que no hay flujo de aire por la boquilla.

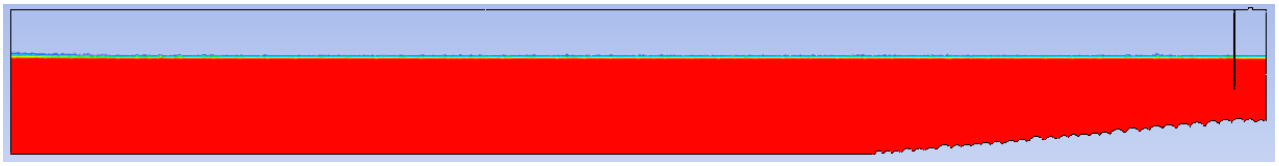


Figura 7.1: Estado 0, diagrama de fase, t/T=0

Estado 1: Una vez la ola alcanza la cámara del OWC, un porcentaje de la onda se refleja

al impactar con la pared de la cámara del OWC y el resto de momento circula entre el fondo y la pared del OWC, transfiriéndose de forma vertical a la columna de agua. La columna de agua cambiara su altura desde A_0 cuando la ola alcance el OWC. No hay flujo másico de aire circulando por la boquilla.

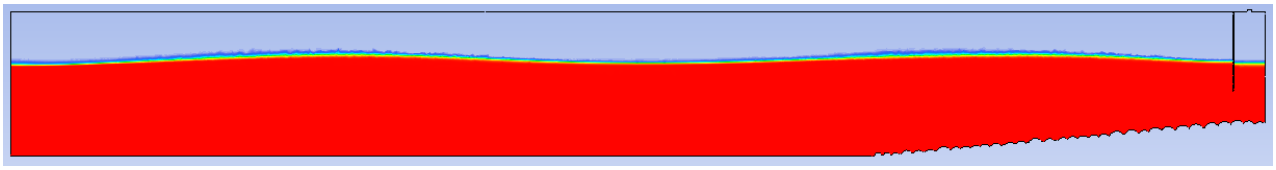


Figura 7.2: Estado 1, diagrama de fase, t/T=4,58

Estado 2: La columna de agua se eleva a una altura $\eta < H$ transmitiendo a su vez su energía a energía neumática del aire en la zona superior de la cámara, de esta forma el aire es ”empujado” a salir por la boquilla del OWC. La columna de agua alcanza un máximo en su recorrido a una altura de A_{max} lo que significa que habrá un flujo másico de aire con velocidad positiva en la boquilla, en este punto termina la fase de exhalación, donde la turbina puede extraer energía del aire.

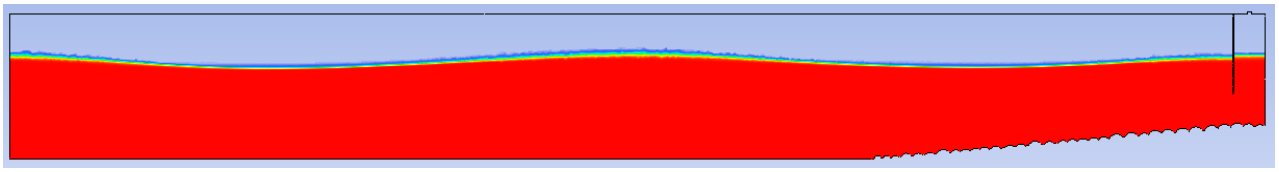


Figura 7.3: Estado 2, diagrama de fase t/T=6

Estado 3: Luego de que la columna de agua alcance un máximo de elevación, el nivel del agua bajará durante un tiempo t/T=0.5, creando una zona de baja presión en la cámara lo que fuerza a la admisión de aire iniciando la fase de inhalación. La columna alcanza su altura mínima A_{min}, donde existe un flujo másico de aire circulando por la boquilla con velocidad negativa. La turbina extrae energía del aire.

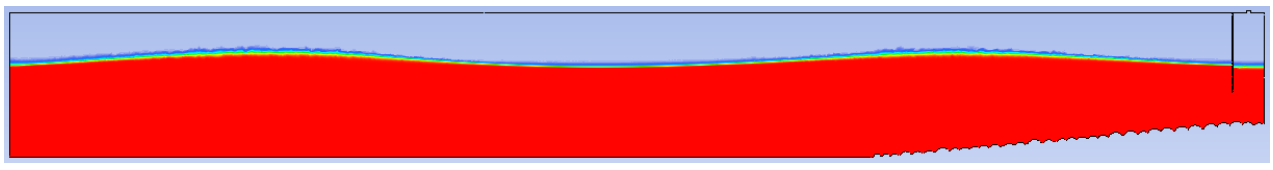


Figura 7.4: Estado 3, diagrama de fase t/T=8,5

Finalmente este ciclo se vuelve a repetir de acuerdo a las propiedades del oleaje que se aproxima.

La elevación de la columna de agua en los instantes t/T=0 y 4,58 se encuentran a la altura hidrostática del nivel del mar (A_0) puesto que el oleaje aún no ha impactado el OWC, el perfil de elevación $\eta(x =_{owc}, 0) = 0$ por lo que la columna de agua no ha sufrido perturbaciones.
Una vez el oleaje alcanza el OWC, la elevación de la columna de agua oscila entre los valores A_{min} y A_{max}. La elevación alcanza uno de sus máximos de altura A_{max} de la serie de tiempo en t/T= 6, y de igual manera, uno de sus mínimos A_{min} en t/T=8,5.
Se guardó la presión en a -3 [m] respecto a A_0 a lo largo de tiempo. Esto se realiza con la finalidad de medir la elevación de la interfaz de agua-aire de forma indirecta dentro del OWC. De esta manera al tener la presión sobre un punto fijo, es posible obtener la elevación $\eta(x = x_{owc}, t)$, con x_{owc} un punto dentro de la cámara del OWC, despejando la altura hidrostática que se obtiene de la siguiente relación:

$$\eta(x = x_{owc}, t) = \frac{p}{\rho_{agua} \cdot g} - 3 \tag{7.1}$$

Es posible ocupar esta relación, puesto que la columna de agua al subir dentro del OWC, lo hace de forma aproximadamente plana, por lo tanto, la profundidad relativa $\frac{h}{\lambda}$ tiende a 0, mientras que λ tienda a ser grande, de esta manera podemos utilizar las ecuaciones de aguas someras, donde el termino de presión, corresponde a la presión hidrostática.

Figura 7.5: Ilustración del punto elegido, para obtener de forma indirecta la elevación de la columna de agua con la presión hidrostática.

El gráfico de elevación (η) se presenta en la figura 7.6, los resultados son congruentes con el análisis del oleaje. La diferencia entre cada máximo local (A_{max} a A_{max}) es de t/T=1 y la diferencia entre los máximos y mínimos locales (A_{max} a A_{min}) es de t/T=0,5. Los máximos de elevación son aproximadamente de $\eta \approx 1m$ y los mínimos de $\eta \approx -1m$ es decir $max(\Delta\eta) \approx 2m$ lo que resulta razonable puesto que definimos la altura del oleaje $H = 2m$.

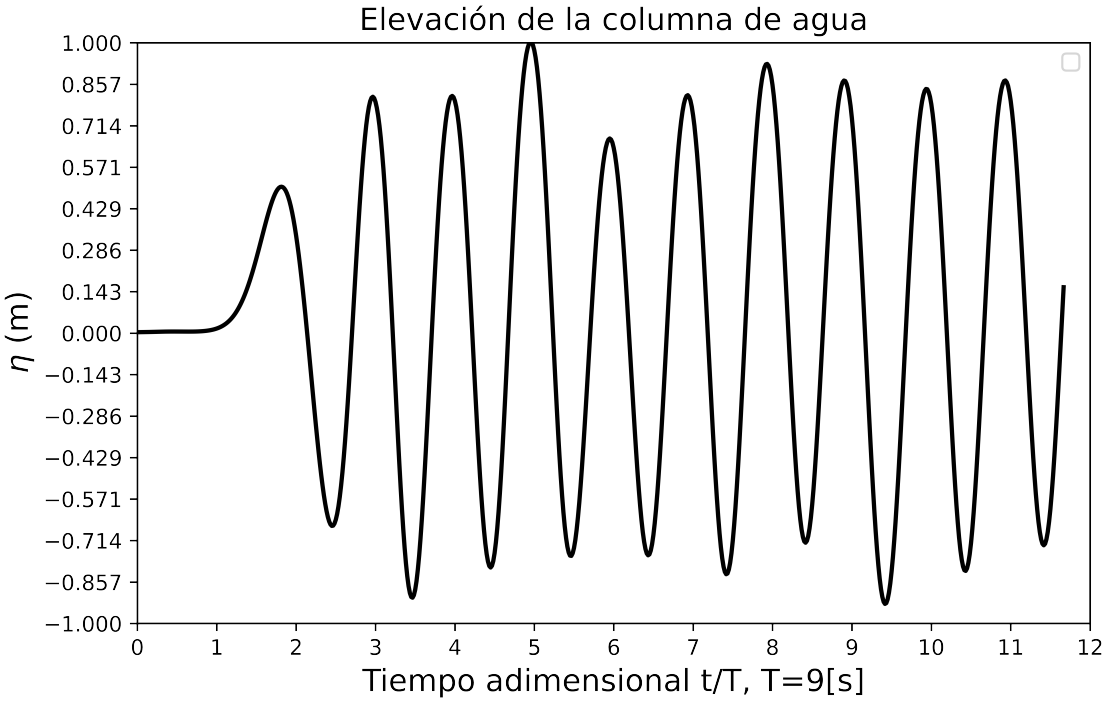


Figura 7.6: Elevación η de la columna de agua

7.2 Velocidad de la boquilla del OWC

La velocidad de la boquilla al igual que la elevación, toma valores positivos y negativos de forma periódica y con un módulo similar. La velocidad de la boquilla es generada por el desplazamiento de volumen de aire de la cámara debido al movimiento vertical de la columna de agua, y a su vez, la columna de agua depende de la interfaz del oleaje η.

De acuerdo a la relación planteada en la sección 4.3 utilizando el teorema de transporte de reynolds se tiene que:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}Vc = -a_{owc} \cdot \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\eta(x = x_{owc}, t)$$

Con a_{owc} el área de la sección transversal de la cámara del OWC y Vc el volumen de aire la cámara.

Puesto que $\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}Vc = v(t) \cdot a_b$ con $v(t)$ la velocidad en la boquilla y a_b el área de la sección transversal de la boquilla , es posible reescribir la ecuación anterior como:

$$v(t) \cdot a_b \cdot = -a_{owc} \cdot \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\eta(x = x_{owc}, t) \tag{7.2}$$

$$v(t) = -\frac{a_{owc}}{a_b} \cdot \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\eta(x = x_{owc}, t) \tag{7.3}$$

De aquí es posible concluir que el módulo de velocidad de la boquilla depende de la derivada de la elevación de la interfaz.

De esta manera sabemos a priori que el módulo de velocidad en la boquilla es 0 cuando la altura es A_{max} y A_{min} y es máxima cuando $A = A_0$

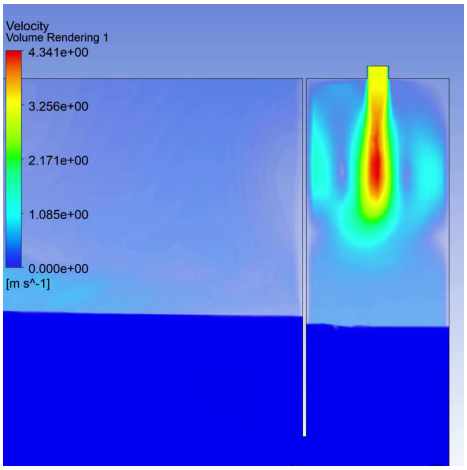


Figura 7.7: Velocidad del aire, t/T=4,0

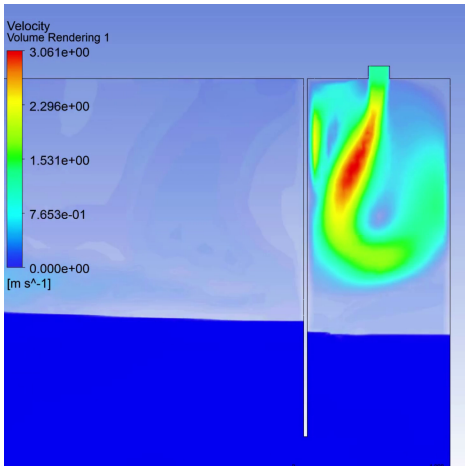


Figura 7.8: Velocidad del aire, t/T=7,2

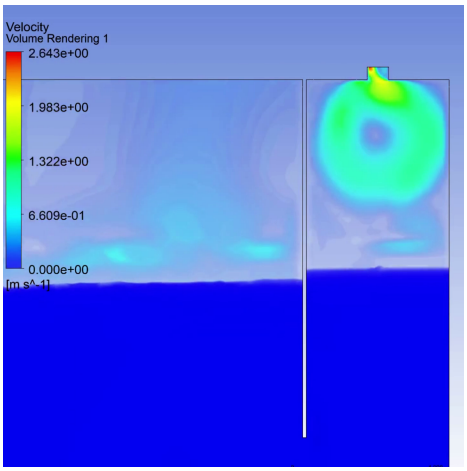


Figura 7.9: Velocidad del aire, t/T=7,6

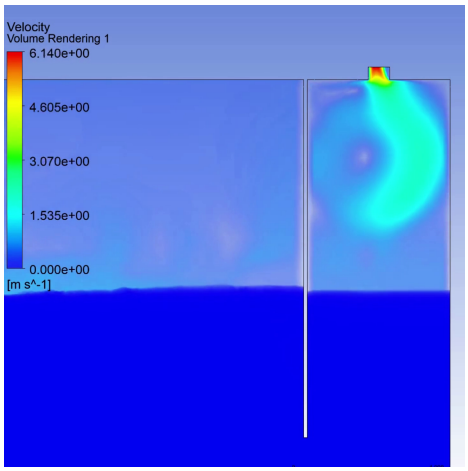


Figura 7.10: Velocidad del aire, t/T=9,6

El diagrama de velocidad muestra la dinámica del aire dentro de la cámara del OWC y su interacción con la columna de agua (en azul sólido). Se puede observar que en los ciclos de inhalación o cuando la columna de agua se encuentra subiendo (t/T= 4,0, t/T=7,2) existe un perfil de velocidad de mayor variación que en los ciclos de exhalación o cuando la columna de agua se encuentra bajando (t/T=7,6, t/T=9,6).

Para obtener el valor de velocidad en el modelo numérico, se fija un punto central en la boquilla del OWC, donde se toma el valor de la velocidad a lo largo del tiempo como se muestra en la figura 7.11. Finalmente los valores de velocidad se encuentran en la figura 7.12.

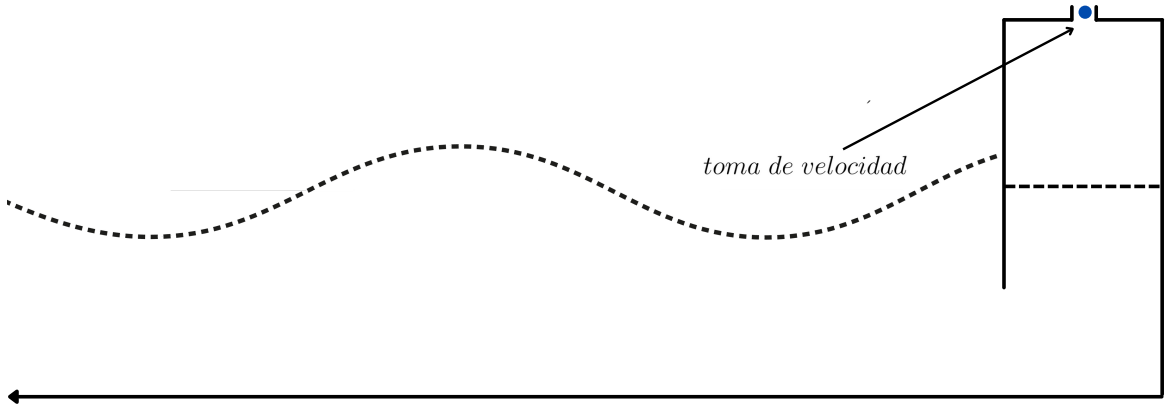


Figura 7.11: Ilustración del punto elegido, para obtener de forma directa la velocidad en la boquilla del OWC

.

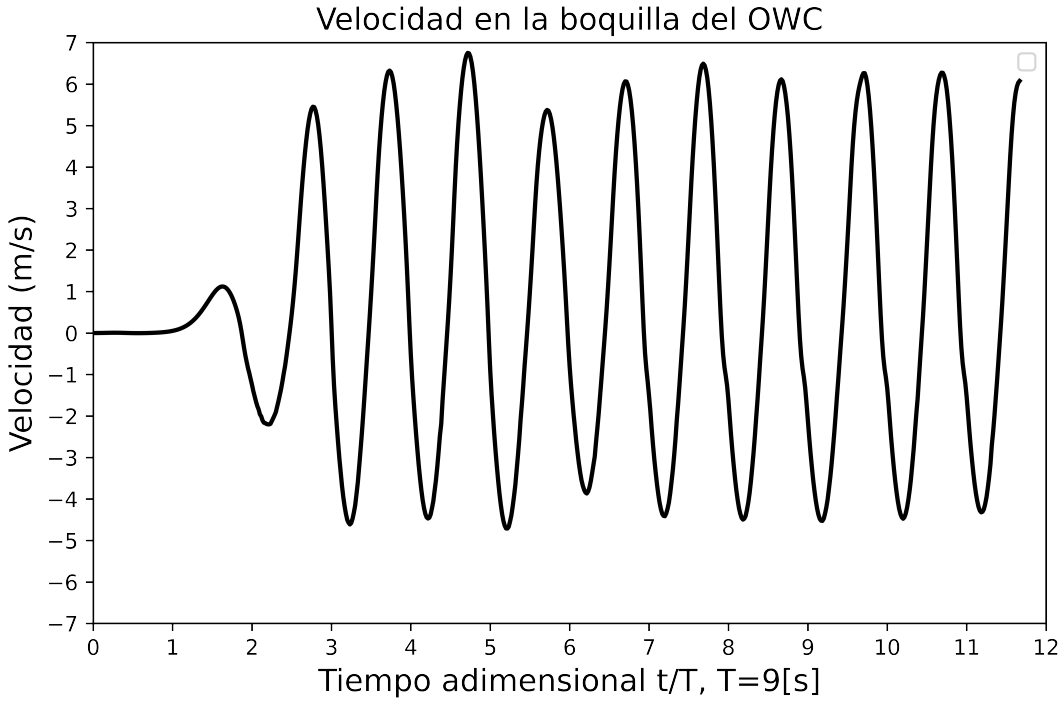


Figura 7.12: Velocidad $v(t)$ de la boquilla del OWC

.

Los valores máximos de velocidad se acercan a 6 [m/s] y los mínimos a -4 [m/s]. Esta diferencia se debe entre otros factores a reflexión de la onda al encontrarse con el OWC, a la interacción con el fondo y disipación de energía y diferente frecuencia de oscilación entre el ancho del OWC y el periodo del oleaje. Mientras la frecuencia de oscilación del OWC se acerca a la frecuencia del oleaje, los valores de velocidad se optimizan, de esta forma la columna alcanzar su mínimo A_{min}, será el momento exacto en que el oleaje permita la subida de la columna de agua.
Por otro lado, el gráfico cumple con el comportamiento planteado en la sección 4.3, encontramos máximos del módulo de velocidad cuando $\eta \approx 0$ y velocidades 0 cuando $\eta = \{\eta_{max}, \eta_{min}\}$, un punto donde es fácil observar este comportamiento, es el último punto de los gráficos, cuando t/T=11,7, el valor de la velocidad es máximo mientras que $\eta \approx 0$.

7.3 Aprovechamiento de energético con turbina Wells

De acuerdo a los resultados obtenidos de velocidad en la boquilla, se hará una caracterización de la potencia que entrega el sistema por metro lineal construido de OWC, en función de los parámetros de una turbina Wells. Como referencia se utilizaron los valores publicados en [2], donde se obtuvo el rendimiento de una turbina Wells mediante CFD, con un rotor optimizado para un buen comportamiento con flujo bidireccional, según las condiciones de operación de un OWC. El rotor tiene un diámetro de 0.3 [m], 8 alabes y una solidez σ=0.64 y 2000 RPM. Por otro lado, se utilizó un flujo axial estacionario para el análisis de C_A y C_T. Uno de los perfiles presentados es el NACA 0015 con pequeñas modificaciones en el perfil (nombrado como G1), para mejorar el rendimiento. En la publicación se presentan las curvas de eficiencia y coeficiente de caída de presión en función del coeficiente de flujo φ
.

Parámetro	Valor
Perfil	NACA 0015* (G1)
Solidez	0.64
N° alabes	8
Flujo	bidireccional

Tabla 7.1: Parámetros del rotor presentado en [2]

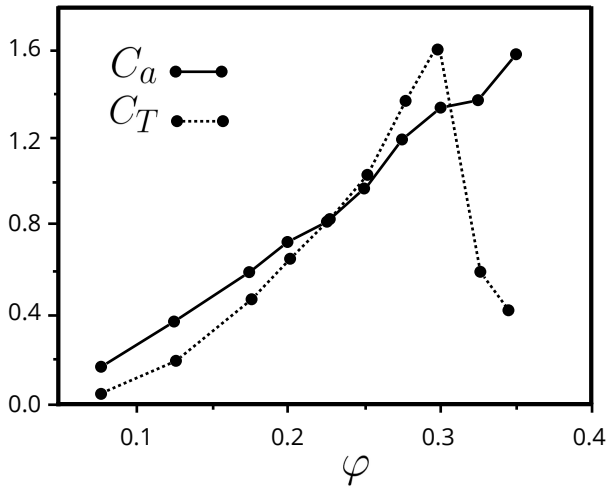


Figura 7.13: Curva de coeficientes de caída de presión y torque de la turbina Wells. Fuente [2]

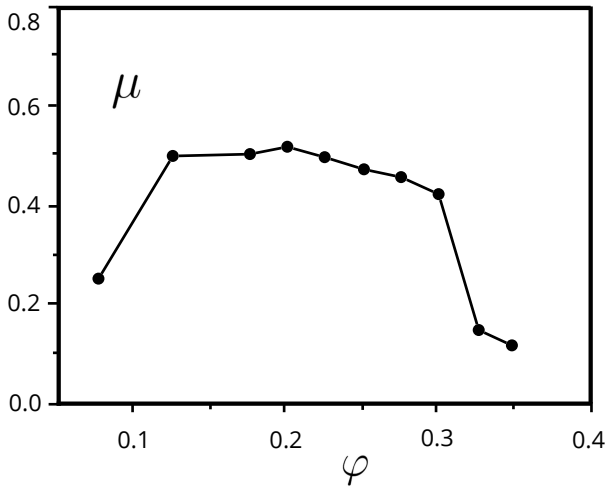


Figura 7.14: Curva de eficiencia de la turbina Wells. Fuente [2]

Si bien existen datos para diferentes coeficientes de flujo, estos fueron obtenidos en condiciones estacionarias de RPM y con velocidad axial, por lo que no responden a la naturaleza transiente del sistema OWC. Por esta razón, se transformó el flujo oscilante a un estado pseudo-estacionario, para así representar los valores de velocidad en las condiciones presentadas en [2]. Para representar un único valor de velocidad en la boquilla del OWC se tomaron algunos supuestos:

- La exhalación e inhalación producen los mismos efectos los alabes y su recorrido genera la misma potencia.
- El oleaje no tiene grandes variaciones de periodo T ni amplitud H, es decir no existirán grandes variaciones de las condiciones de operación.
- El rotor se mantiene a una velocidad angular constante a lo largo de los ciclos de oleaje.

De esta manera es posible obtener un valor de velocidad constante que produce los mismos efectos en un periodo determinado que un valor de velocidad variable, al cual nombraremos valor de *velocidad eficaz* v_e. Para encontrar el valor numérico (v_e), se debe considerar únicamente los valores positivos de velocidad ponderados en el tiempo de forma que:

$$v_e = \sqrt{\frac{1}{T}\int_0^T v^2(t)dt} \tag{7.4}$$

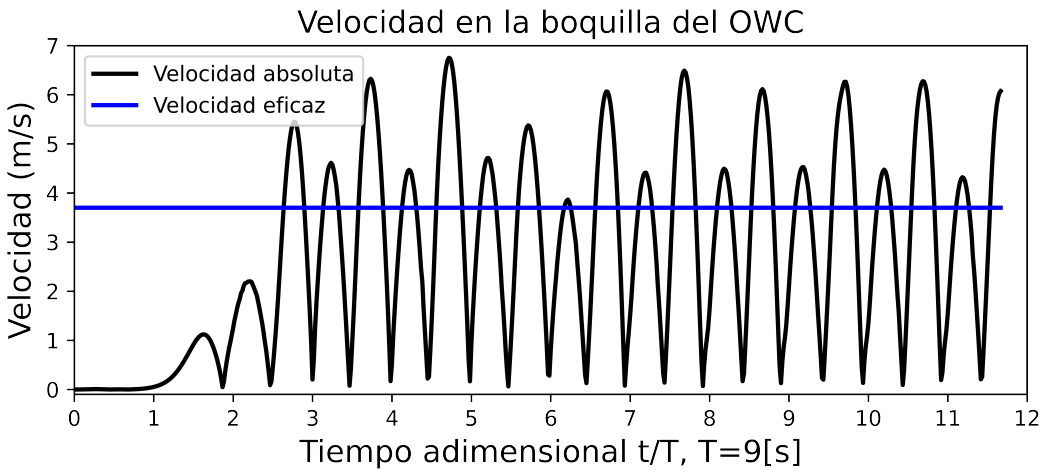


Figura 7.15: Velocidad en la boquilla del OWC y velocidad eficaz

.

Así se encuentra el valor v_e=3.8[m/s], por lo tanto, para los cálculos y análisis posteriores, se utilizó este valor para obtener la potencia por metro lineal de OWC.

Se define el coeficiente de caída de presión y coeficiente de flujo como:

$$C_a = \frac{\Delta p}{\rho \omega_t^2 r_t^2} \tag{7.5}$$

$$\varphi = \frac{v}{\omega_t r_t} \tag{7.6}$$

Con Δp la caída de presión en el rotor, ω_t la velocidad angular del rotor, r_t el radio del rotor y v la velocidad en la boquilla del OWC.

Para encontrar la potencia por metro lineal de OWC, se debe encontrar la caída de presión Δp y el coeficiente de flujo óptimo valor de φ tal que C_a y la eficiencia sean máximos. De acuerdo a la figura 7.13 y la figura 7.14 el valor óptimo de φ se encuentra con un valor de 0.25 con un $C_a \approx 1$ y $\mu \approx 50\%$. Reescribimos las ecuaciones con estos valores:

$$C_a = \frac{\Delta p}{\rho(\frac{3.8}{\varphi})^2} = \frac{\Delta p}{\rho(231)} = 1 \tag{7.7}$$

$$\Delta p = 277[Pa] \tag{7.8}$$

Por otro lado, el caudal de aire Q que circula por la boquilla del OWC es:

$$Q = v_e \cdot rea = 3.8[m/s] \cdot 0.6[\frac{m^2}{m}] = 2.3[\frac{m^3/s}{m}] \tag{7.9}$$

Con rea el área de apertura de la boquilla por metro lineal (figura 6.7). Finalmente obtenemos la potencia por metro lineal del sistema como:

$$P = \mu \cdot \Delta p \cdot Q = 0.5 \cdot 277 \cdot 2.3 = 319[W/m] \tag{7.10}$$

Por lo tanto para un central OWC de 100 metros lineales (al igual que la central Mutriku) es capaz de entregar 31.9 [kW] para las condiciones planteadas.

Capítulo 8

Discusión

Los resultados obtenidos de potencia para las condiciones planteadas, con la amplitud H_s de 2.0[m] (con H_0 de 1.5 [m]) un periodo T de 9[s] y el ancho de la cámara del OWC b de 4 [m] y una extensión de 100 [m], se obtiene una potencia aproximada de 31.9 [kW], lo que es bajo respecto a centrales de tamaños similares como Mutriku, la cual tiene un ancho de 4.5 m y 100 metros de extensión y una potencia de 296 [kW].

La potencia de salida es especialmente sensible a la velocidad axial en la turbina, lo que a su vez depende del caudal de aire que circula por la boquilla del OWC. El potencial energético del oleaje en Puerto Coloso es relativamente bajo de acuerdo con la figura 8.1, esto explica en gran medida la baja potencia obtenida con proyectos de extensión similar.

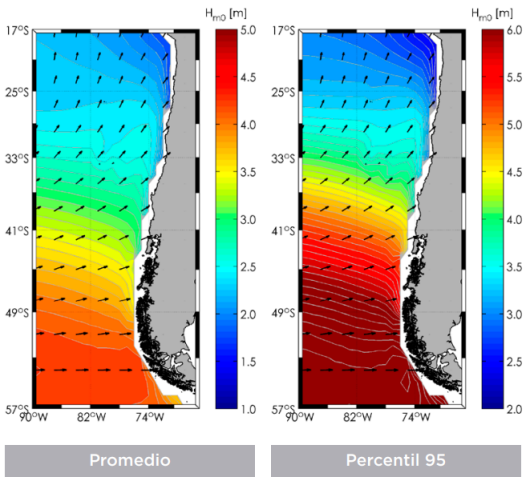


Figura 8.1: Distribución de H_0 en Chile

El potencial energético del oleaje crece en la zona sur del país, mientras que en el extremo norte la amplitud media del oleaje en aguas profundas es de alrededor de 1 m, en la zona sur la

amplitud media en aguas profundas es mayor a 4 m.

En vista de los resultados, es necesario aumentar el caudal de aire y así la potencia de salida. Una de las principales medidas para optimizar la potencia es aumentar el diseño del OWC, como por ejemplo, aumentar el ancho de la cámara de 4m a 6m, lo que significa un 50% extra del volumen de aire en la cámara del OWC, aumentando la velocidad eficaz en la boquilla v_e. De igual forma, se puede estudiar el diseño de frecuencia de oscilación en la cámara con el periodo del oleaje, esto es visible en en el gráfico de velocidad en la boquilla (figura 7.12) donde en el ciclo de exhalación (velocidad positiva) en modulo es menor al ciclo de inhalación. Esto en gran medida está determinado de acuerdo a la oscilación de la cámara que no se encuentra en fase con el periodo del oleaje, puesto que cuando la columna de agua alcanza una altura máxima, no se encuentra en armonía con la onda fuera de la cámara.

Para estimar la potencia de salida con una ampliación del ancho de la cámara se consideró que la altura de la columna de agua no se ve afectada en gran medida por el incremento de la cámara y que los efectos dinámicos son proporcionales al volumen de aire de la cámara del OWC.
El gráfico de velocidad en la boquilla marca aproximadamente un máximo de 6 [m/s], de esta manera se estima el nuevo máximo:

$$\frac{vc_1}{vc_2} = \frac{6m/s}{x\ m/2} = \frac{4m}{6m} \tag{8.1}$$

De esta relación se estima que el nuevo pico de velocidad es 9 [m/s]. De igual forma, al optimizar el diseño de la cámara del OWC, nos podemos acercar a tener velocidades de exhalación e inhalación iguales en modulo, de esta manera al tener un gráfico de velocidad simétrico es posible obtener el valor de velocidad eficaz v_e como $\frac{9\ m/s}{\sqrt{2}} = 6,36\ m/s$. Con este nuevo valor de velocidad eficaz, obtenemos el nuevo caudal $Q = 3,8\frac{m^3/s}{m}$ y caída de presión $\Delta p = 776[Pa]$ de forma que la nueva potencia por metro lineal es de 1,48 [KW/m] lo que para una longitud de 100 metros, se obtiene una potencia de 148 [kw].

Para entender este cambio significativo de potencia de 31.3 [kW] a 148 [kW] con un cambio de la velocidad eficaz de 3.8 [m/s] a 6.36 [m/s], es notable que existe un gran cambio en la caída de presión en el rotor, es decir, en este rango de velocidades, a medida que aumentamos la velocidad eficaz, la turbina es capaz es extraer mayor energía de la masa de aire. Esto se debe principalmente a la velocidad axial eficaz de salida v_{ef}, puesto que necesariamente este valor es distinto de 0, por ejemplo, si suponemos una salida del flujo para el caso de una velocidad axial eficaz de entrada de 3.8 [m/s] de 1[m/s] la cantidad de energía que es capaz de extraer el sistema es muy inferior a si la velocidad eficaz axial de entrada es de 6,36 [m/s] y una velocidad de salida de 2[m/s], sumado

a que al existir una velocidad mayor, aumenta el flujo másico de aire y por lo tanto, el potencial energético aprovechable.

Finalmente, para entender la relación de la velocidad axial eficaz v_e la amplitud de onda H_0 y la potencia P del OWC por metro lineal, podemos extrapolar los datos de velocidad obtenidos con el modelo desarrollado en Fluent para tener una idea general del orden de magnitud de una instalación similar ante diferentes condiciones de H_0.
El modelo nos entregó una velocidad eficaz de 3.8 [m/s] para una amplitud de oleaje H_0 de 1.6 [m]. Bajo el supuesto de que la velocidad v_e es proporcional en el rango de H_0 de 1.0 [m] a 4[m], esta suposición no es muy alejada de la realidad bajo la ecuación:

$$\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}Vc = -a \cdot \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\eta(x = x_{owc}, t) \tag{8.2}$$

Y además al considerar un periodo T constante de 9 [s], podemos tener una expresión de la velocidad V_e en función de H_0. De forma que:

$$v_e(t) \approx \frac{3.8}{1.6}H_0 = 2.38H_0 \tag{8.3}$$

Con esta aproximación y manteniendo un coeficiente de flujo φ=0.25 y un coeficiente de caída de presión C_a ≈1 y una eficiencia $\mu = 50\%$, podemos obtener la caída de presión Δp:

$$\Delta p = \rho(\frac{2.38H_0}{0.25})^2 = 108.3\rho H_0^2 \tag{8.4}$$

Y el caudal volumétrico de aire por metro lineal:

$$Q = 0.6[\frac{m^2}{m}] \cdot 2.38H_0[m] \tag{8.5}$$

Por lo tanto, la potencia por metro lineal dentro del rango de H_0 1 a 4 [m] se comporta aproximadamente bajo la siguiente relación:

$$P(H_0) = \mu \cdot \Delta p \cdot Q \approx 77.7H_0^3 \tag{8.6}$$

.

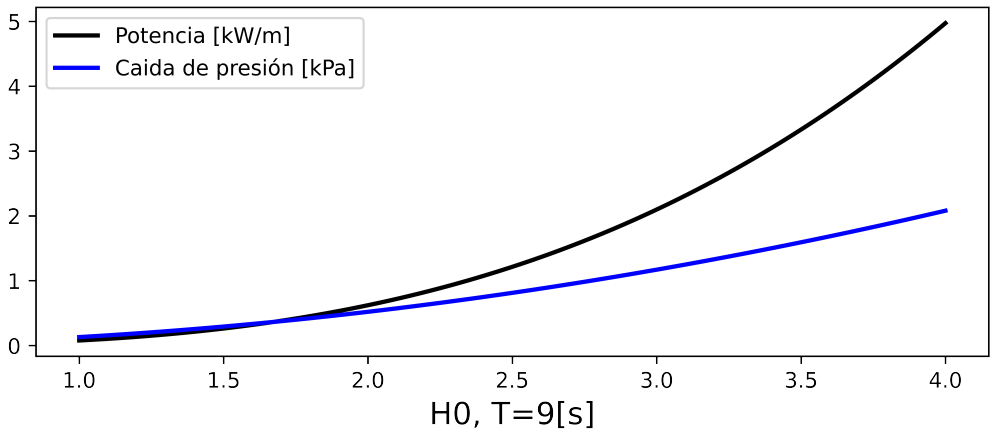


Figura 8.2: Extrapolación de los resultados obtenidos en función de H_0

Cabe destacar que si bien la relación de potencia del sistema OWC por metro lineal considera bastantes aproximaciones, su comportamiento tiene una semejanza la potencia por metro lineal de una ola, la cual se expresa como:

$$P_{ola} = \frac{g^2 \rho H_0^2 T}{32\pi} \tag{8.7}$$

La figura 8.2 también se podría interpretar, como la potencia aprovechable a lo largo del país y el aumento de la altura de ola hacia el sur.

Capítulo 9

Conclusiones y Recomendaciones

Los sistemas OWC son centrales de aprovechamiento de la energía marina con muy poca maduración respecto a otras tecnologías de energías renovables no convencionales, por esta razón aún existe poca atención en su utilización para la obtención de energía en grandes escalas. Para el caso de Puerto Coloso, el potencial energético por metro lineal, de acuerdo a los resultados de la simulación con condiciones de oleaje características de la zona, es relativamente bajo, incluso con instalaciones de dimensiones similares; este bajo rendimiento relativo, se debe principalmente a un bajo potencial energético del oleaje en la zona debido a un H_0 de 1.5 m y un diseño que no se encuentra en fase entre la oscilación de la frecuencia del oleaje a un periodo T de 9s y la columna de agua, puesto que los ciclos de exhalación e inhalación generan una velocidad eficaz v_e con diferente modulo. Para aumentar la potencia por metro lineal de acuerdo a las condiciones de Puerto Coloso, se puede rediseñar la cámara del OWC para optimizar la velocidad de salida y que esta se encuentre en resonancia con el oleaje, esto sumando a un aumento del ancho en 2m de la cámara del OWC, aumenta el volumen de aire desplazo y su velocidad eficaz, incrementando su potencia por metro lineal. Estos 2 cambios entregan una potencia de salida significativamente mayor a las condiciones simuladas y se considera como una opción aceptable de acuerdo a proyectos similares.

Los sistemas OWC tienen un bajo rendimiento general debido a la turbina Wells. Esta turbina cuenta con un perfil de alabe simétrico del tipo NACA 00XX, puesto que operan bajo condiciones de flujo bidireccional y el rotor debe permanecer en un giro del mismo sentido, lo que resulta en eficiencias μ del orden del 50% al 60%.
El potencial energético de Chile crece en gran medida hacia el sur del país, desde una amplitud significativa de 1m a 4.5m en el extremo sur, por esta razón una central de tipo OWC tendría un mejor desempeño desde la zona central a sur del país.

Para análisis posteriores y continuación del caso de estudio a modo de recomendación, se propone el análisis los siguientes temas:

- Análisis de sensibilidad del periodo del oleaje y su relación con la potencia
- Diseñar una cámara de OWC con una frecuencia de oscilación de la columna de agua cercana al periodo del oleaje utilizado
- Análisis de la potencia de salida ante un oleaje irregular con diferentes oleajes secundarios

Referencias

[1] Thomas Vyzikas, Samy Deshoulières, Olivier Giroux, Matthew Barton, and Deborah Greaves. Numerical study of fixed oscillating water column with rans-type two-phase cfd model. *Renewable Energy*, 102:294–305, 2017.

[2] Tapas K. Das, Emeel Kerikous, Nithya Venkatesan, Gabor Janiga, Dominique Thévenin, and Abdus Samad. Performance improvement of a wells turbine through an automated optimization technique. *Energy Conversion and Management: X*, 16:100285, 2022.

[3] Rosana Brantes Abarca and Jorge Cantallopts Araya. Proyección del consumo de energía eléctrica en la minería del cobre 2021-2032. *Cochilco - Dirección de Estudios y Políticas Públicas*, 1(1):32, 2022.

[4] Vania Ramírez Jiménez and Jorge Cantallopts Araya. Proyección de consumo de agua en la minería del cobre 2020-2031. *Cochilco - Dirección de Estudios y Políticas Públicas*, 1(1):52, 2020.

[5] Patricio Winckler Grez. Introducción al modelado de procesos costeros. *Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso*, 5:205, 2020.

[6] D. A. Huntley. Le mÉhautÉ, b. 1976. an introduction to hydrodynamics and water waves. springer-verlag, new york, viii + 323 p. $24.80. *Limnology and Oceanography*, 22(5):974–975, 1977.

[7] https://www.mch.cl/reportajes/agua-energia-los-proyectos-criticos-bhp-billiton/.

[8] Cuan Boake, Trevor Whittaker, Matt Folley, and Hamish Ellen. Overview and initial operational experience of the limpet wave energy plant. *Proceedings of the International Offshore and Polar Engineering Conference*, 12, 01 2002.

[9] Gabriel Ibarra-Berastegi, Jon Sáenz, Alain Ulazia, Paula Serras, Ganix Esnaola, and Carlos Garcia-Soto. Electricity production, capacity factor, and plant efficiency index at the mutriku wave farm (2014–2016). *Ocean Engineering*, 147:20–29, 2018.

[10] Gallardo A. Hidalgo H. Aguirre C. Valdivia J. Parra C. Méndez L. Contreras F. Winckler P. Molina Beyá J., Álvarez M. Atlas de oleaje de chile. *Valparaíso, Chile, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica - Universidad de Valparaíso*, Primera Edición(1):169, 2016.

[11] Ansys fluent user's guide. *Ansys inc.*, 15.0, 2013.