

TECNOLÓGICO DE ESTUDIOS SUPERIORES DE ECATEPEC



División de Ingeniería Mecánica, Mecatrónica e Industrial

Maestría en Eficiencia Energética y Energías Renovables

**INCREMENTO DE LA POTENCIA EN UNA COLUMNA DE AGUA
OSCILANTE POR UN COLECTOR CON FONDO COSENOIDAL**

Tesis que para obtener el grado de

Maestro en Eficiencia Energética y Energías Renovables

Presenta:

Ing. Sergio Alexis Gutiérrez Eudave

Directores de Tesis:

Dra. Maria Balem Arce Vazquez

Dr. Agustín Mora Ortega

Ecatepec de Morelos, Estado de México, agosto de 2018.



GOBIERNO DEL
ESTADO DE MÉXICO

DICTAMEN DE LIBERACIÓN DE PROYECTO
DE TESIS

FO-TESE-DA-90

TIT05-ANEXO PM



DIRECCIÓN ACADÉMICA
DIVISIÓN DE INGENIERÍA MECÁNICA, MECATRÓNICA E INDUSTRIAL
MAESTRÍA EN EFICIENCIA ENERGÉTICA Y ENERGÍAS RENOVABLES

Fecha: 7 DE AGOSTO DE 2018

Datos generales

Nombre del alumno:

GUTIÉRREZ

EUDAVE

SERGIO ALEXIS

Apellido paterno

Apellido materno

Nombres (s)

Matricula: 201621076

PROYECTO: INCREMENTO DE LA POTENCIA EN UNA COLUMNA DE AGUA OSCILANTE POR UN COLECTOR CON FONDO COSENOIDAL

DIRECTORES: DRA. MARIA BELEM ARCE VAZQUEZ
DR. AGUSTÍN MORA ORTEGA

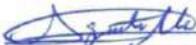
Dictamen:

Con base en el registro No. POSG-MPEER/DIMMI/2018/02 correspondiente al periodo escolar 2018-1, asignado al proyecto de tesis INCREMENTO DE LA POTENCIA EN UNA COLUMNA DE AGUA OSCILANTE POR UN COLECTOR CON FONDO COSENOIDAL y presentado por el alumno referido; y después de haber sido desarrolladas las actividades requeridas, el Comité Tutorial, conformado por los integrantes que firman al calce, ha determinado que SI (X) NO () han sido cubiertos en su totalidad los requisitos que permitan a esta División Académica liberar al alumno de los trámites académicos para tal efecto e iniciar el trámite de obtención de grado de maestría en la Unidad de Registro y Certificación de este Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec.

Observaciones:

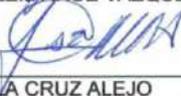
NINGUNA

Comité tutorial


DR. AGUSTÍN MORA ORTEGA


DRA. MARIA BELEM ARCE VAZQUEZ


DR. MARTÍN SALAZAR PEREYRA


DR. JESÚS DE LA CRUZ ALEJO

Elaboró:	Revisó y Visto Bueno:	Enterado:
 DR. AGUSTÍN MORA ORTEGA Coordinador de Posgrado	 M. EN C. HÉCTOR RODRÍGUEZ CARMONA Jefe de División	 M. EN C. ARMANDO ALCALDE MARTÍNEZ Director Académico

DATOS DEL ALUMNO

NOMBRE: SERGIO ALEXIS GUTIÉRREZ EUDAVE

MATRÍCULA: 201621076

DATOS DE LA TESIS

TÍTULO: INCREMENTO DE LA POTENCIA EN UNA COLUMNA DE AGUA
OSCILANTE POR UN COLECTOR CON FONDO COSENOIDAL

DIRECTOR: DRA. MARIA BELEM ARCE VAZQUEZ

DR. AGUSTÍN MORA ORTEGA

COMITÉ TUTORIAL

DRA. MARIA BELEM ARCE VAZQUEZ

DR. AGUSTÍN MORA ORTEGA

DR. MARTÍN SALAZAR PEREYRA

DR. JESÚS DE LA CRUZ ALEJO

DEDICATORIAS

Este trabajo está dedicado

A **mi esposa Maribel** por tu incondicional amor y por darme fuerzas para lograr esta meta, te amo.

A **mi mamá Carmen Eudave** que sin tu ayuda no habría sido posible llegar hasta aquí, por todo tu amor, cariño, sacrificio y comprensión estaré agradecido toda mi vida.

A **mi familia Eudave Loera**, gracias por su amor y apoyo incondicional.

A **mi familia Solano Salguero**, gracias por todo su apoyo y cariño.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer al **Tecnológico de Estudios Superiores de Ecatepec** por permitirme realizar los estudios de posgrado y a la **Maestría en Eficiencia Energética y Ernergías Renovables**.

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología **CONACyT** por la beca otorgada para culminar los estudios de maestría.

Gracias a mi asesor, el **Dr. Agustín Mora Ortega**, por todos los conocimientos compartidos, por su experiencia, pero sobre todo por su paciencia, dedicación y disposición. Aprecio sinceramente sus consejos tanto profesionales como personales que fueron fundamentales para lograr esta meta.

Gracias a la **Dra. Maria Belem Arce Vazquez** por los conocimientos compartidos, su disposición y apoyo profesional. Gracias al **Dr. Martín Salazar Pereyra**, al **M. en C. Wenceslao Bonilla Blancas** y al **M. en C. Carlos Aguilar Anastacio** por su apoyo, consejos y asesorías.

Gracias a **Jorge Alberto Rangel Carboney** por todo el apoyo y su gran amistad desde hace varios años, y gracias a mis amigos del cubículo *J201*, **Andrés Texco**, **José Luis Loyda**, **Luis Felipe Mora**, **Salvador Lule**, **Enrique Servín**, **Ernesto Martínez** y **Carlos Limón** su amistad fue de gran ayuda.

ÍNDICE GENERAL

1. MOTIVACIÓN	10
2. OBJETIVOS	11
2.1. OBJETIVO GENERAL	11
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	11
3. INTRODUCCIÓN	12
3.1. DISPOSITIVOS TRANSFORMADORES DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ	13
3.2. COLUMNA DE AGUA OSCILANTE (OWC)	14
3.3. DISPOSITIVOS OWC INSTALADOS ACTUALMENTE	14
3.4. ANTECEDENTES	17
4. HIDRODINÁMICA DEL COLECTOR DE ONDAS CON TOPOGRAFÍA ONDULAR ACOPLADO A UNA OWC	19
4.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
4.2. FORMULACIÓN DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS EN EL COLECTOR CON FONDO COSENOIDAL	20
4.2.1. ANÁLISIS ADIMENSIONAL DE LA PROPAGACIÓN DEL OLEAJE	21
4.3. ANÁLISIS NUMÉRICO DEL SISTEMA ACOPLADO COLECTOR DE ONDAS - OWC	23
4.3.1. CONDICIONES DE FRONTERA	23
5. RESULTADOS	24
5.1. PROPAGACIÓN DE ONDAS EN EL COLECTOR	24
5.2. HIDRODINÁMICA DEL SISTEMA ACOPLADO OWC - COLECTOR DE ONDAS .	27
6. CONCLUSIONES	36
7. REFERENCIAS	37

ÍNDICE DE FIGURAS

1.	Dispositivos Transformadores de Energía Undimotriz [7].	13
2.	Diagrama esquemático de una Columna de Agua Oscilante (OWC) [13].	14
3.	Dispositivos OWC instalados a nivel mundial [14-17].	16
4.	Diagrama esquemático del sistema propuesto OWC-Colector de ondas.	19
5.	Modelo físico del colector ondas.	20
6.	Elevación de la superficie libre adimensional δ como una función del eje adimensional χ , para un colector de ondas con fondo cosenoidal, con valores constantes de $\kappa = 0.001$ y $N = 16$, con variaciones del parámetro geométrico Γ	24
7.	Elevación de la superficie libre adimensional δ como una función del eje adimensional χ , para el colector de ondas con fondo cosenoidal, manteniendo constantes $\Gamma = 0.1$ y $N = 16$, para cinco valores del parámetro κ ($= 0.001, 0.005, 0.01, 0.02$ y 0.03).	25
8.	Elevación de la superficie libre adimensional δ como una función del eje adimensional χ , para un colector de ondas con fondo cosenoidal, con valores constantes de los parámetros $\Gamma = 0.1$ y $\kappa = 0.001$, y cuatro valores de N ($= 4, 8$ y 16 respectivamente).	26
9.	Mallado en CFD de la Columna de Agua Oscilante.	27
10.	Campos vectoriales de velocidades y presiones en la OWC cuando $\Gamma = 0$, para los tiempos representativos $t = 20, 40, 60$ y 80 segundos.	29
11.	Campos vectoriales de velocidades y presiones en la OWC cuando $\Gamma = 0.05$, para los tiempos representativos $t = 20, 40, 60$ y 80 segundos.	30
12.	Campos vectoriales de velocidades y presiones en la OWC cuando $\Gamma = 0.1$, para los tiempos representativos $t = 20, 40, 60$ y 80 segundos.	31
13.	Velocidad de descarga del aire en la Columna de Agua Oscilante en un intervalo de tiempo de 0 a 100 segundos para valores de $\Gamma = 0, 0.05$ y 0.1 , respectivamente.	33
14.	Presión de descarga del aire en la Columna de Agua Oscilante en un intervalo de tiempo de 0 a 100 segundos para valores de $\Gamma = 0, 0.05$ y 0.1 , respectivamente.	34
15.	Potencia de la Columna de Agua Oscilante en un intervalo de tiempo de 0 a 100 segundos para valores de $\Gamma = 0, 0.05$ y 0.1 , respectivamente.	35

NOMENCLATURA

Letras latinas	
2b	ancho de la columna
2l	ancho de la abertura de la cámara de aire
A_I	amplitud incidente
CFD	Dinámica de Fluidos Computacional
F	matriz de coeficientes de funciones
g	aceleración de la gravedad
h	altura
$\overline{h(x)}$	variación de la topografía del colector de ondas
$\overline{h(x)}$	variación de la topografía del colector de ondas adimensional
h_c	altura de la estructura de la columna de agua oscilante
h_0	altura del nivel medio del mar
L	longitud del colector de ondas
N	número de oscilaciones en la topografía del colector de ondas
OWC	Columna de Agua Oscilante
OWCs	Estructura de Columna de Agua Oscilante
P(x)	coeficiente analítico
Q(x)	coeficiente analítico
R(x)	coeficiente analítico
Re	parte real de
s	espesor de la columna
t	tiempo
u	velocidad
U	velocidad adimensional
W	matriz de coeficientes y derivadas
x	coordenada longitudinal
y	coordenada transversal
z	coordenada vertical

Letras griegas	
θ	parámetro adimensional, $\theta = H/L$
Δ	variable adimensional, $\Delta = \eta/A_I$
Γ	parámetro geométrico adimensional, $\Gamma = h/h_0$
Δ	variable adimensional, $\Delta = \eta/A_I$
δ	elevación de la superficie libre adimensional
ϵ	parámetro adimensional, $\epsilon = A_I/h_0$
μ	parámetro adimensional, $\mu = W/h_0$
$\eta(x, t)$	variación de la superficie libre del oleaje
$\eta_c(t)$	variación de la superficie libre de la OWC
λ	longitud de onda
κ	parámetro dinámico adimensional, $\kappa = \lambda/2\pi L$
τ	tiempo adimensional, $\tau = \omega t$
\bar{x}	coordenada longitudinal adimensional, $\bar{x} = x/L$

ABSTRACT

In this work we performed an analysis of an Oscillating Water Column (OWC) coupled to a channel with undulating topography, using computational fluid dynamics techniques. The long waves theory was applied to the continuity and momentum equations in its dimensionless form to obtain the mathematical model that describes the propagation of the waves under the influence of a topography with oscillator variation, to solve the model was used a Taylor polynomial method, applied to a second order differential equation with variable coefficients. In addition we modeled the movement of the OWC using the COMSOL Multiphysics software. We verified that an Oscillating Water Column connected to a wave collector with undulated topography develops larger power values than those of an OWC with a uniform background wave collector.

RESUMEN

En este trabajo se realizó un análisis de una Columna de Agua Oscilante (OWC) acoplada a un canal con topografía ondulada, empleando técnicas de dinámica de fluidos computacional. Se aplicó la teoría de ondas largas a las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento en su forma adimensional para obtener el modelo matemático que describe la propagación del oleaje bajo la influencia de una topografía con variación oscilatoria, para resolverlo se empleó el método de polinomios de Taylor aplicado a una ecuación diferencial de segundo orden con coeficientes variables. Además se modeló el movimiento de la OWC empleando el software COMSOL Multiphysics. Se verificó que una Columna de Agua Oscilante conectada a un colector de ondas con topografía ondulada desarrolla valores de potencia más grandes que las de una OWC con un colector de ondas fondo uniforme.

CAPÍTULO 1

1. MOTIVACIÓN

Debido a la demanda de energía y a la situación ambiental que se presenta actualmente a nivel mundial, es necesario pensar en alternativas para evitar o reducir el consumo de combustibles fósiles. En los últimos años se han analizado diferentes opciones energéticas provenientes de fuentes limpias, como la energía solar, eólica, geotérmica, oceánica, entre otras. La energía oceánica se refiere a la energía renovable transportada por las olas del mar, las mareas, corrientes marinas, los vientos oceánicos, las diferencias de temperatura y de salinidad del océano. El movimiento del agua en los océanos del mundo crea un vasto almacén de energía que puede ser aprovechada para obtener electricidad.

Este trabajo se enfoca al aprovechamiento de la energía undimotriz, que es la energía obtenida a partir del movimiento natural de las olas. El oleaje es un fenómeno que se presenta en cualquier región costera del planeta, aunque tiene amplitudes y periodos de oscilación diferentes para cada zona, sin embargo, si se identifican y manipulan las condiciones naturales del oleaje, es posible aumentar su amplitud y frecuencia para aprovechar al máximo este recurso energético.

CAPÍTULO 2

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Analizar la interacción de la hidrodinámica de una Columna de Agua Oscilante con el oleaje incidente para incrementar la potencia útil en el dispositivo convertidor de energía renovable.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener las ecuaciones de gobierno de la propagación del oleaje para una topografía ondulada.
- Analizar el efecto de los parámetros dinámicos y geométricos en la transformación del oleaje.
- Modelar el movimiento de la Columna de Agua Oscilante empleando técnicas numéricas de Dinámica de Fluidos Computacional.
- Analizar el efecto de la amplitud incidente del oleaje en la hidrodinámica de la OWC.
- Determinar el incremento de potencia en la OWC acoplada a un canal con topografía variable.

CAPÍTULO 3

3. INTRODUCCIÓN

En el océano las olas son originadas por diversas causas. Entre estas causas se pueden señalar el viento, las fuerzas de atracción gravitacional que ejercen la luna y el sol sobre las masas oceánicas, los maremotos, las tormentas, etc, sin embargo, de todas ellas, el viento constituye el agente que genera las olas más comunes y de mayor densidad energética [1]. El oleaje actúa como un acumulador de energía ya que es capaz de recibir energía, transportarla y almacenarla. Como la densidad del aire es mucho menor que la del agua, en la superficie libre las partículas tienen mayor libertad para la traslación; a causa de esto, las olas se propagan a lo largo de miles de kilómetros por la superficie del mar, además poseen la libertad de desplazarse durante grandes distancias con pérdidas de energía mínimas, por esta razón la energía generada en cualquier parte del océano termina en el borde continental, de modo que la energía de las olas se concentra en las costas [2].

Las olas son movimientos ondulatorios periódicos de la superficie del mar, para estudiarlas éstas se dividen en dos grupos: olas de agua profunda, las cuales no están influenciadas por el fondo y se mueven independientemente de él; y las olas costeras, las cuales debido a la disminución de la profundidad del agua, están afectadas por el fondo marino [3]. Las olas se caracterizan por su longitud de onda (λ), periodo (T), altura (H), amplitud (A) y celeridad (c), variables físicas y geométricas que se definen a continuación: longitud de onda, es la distancia horizontal entre dos crestas o dos depresiones sucesivas; periodo, es el tiempo entre el paso de dos crestas sucesivas por un mismo punto; altura, es la distancia entre la cresta y valle de la ola; amplitud, es la deformación de la superficie libre del líquido; celeridad, es la velocidad de propagación de la ola [4].

Las regiones con mayor actividad de oleaje a nivel mundial son las que se encuentran entre 30° y 60° de latitud, en ambos hemisferios, las zonas con mayor potencial energético por metro de costa se encuentran en Australia, Portugal, Japón, España, Noruega, y Escocia [2]. Se ha calculado que las olas suponen una capacidad energética anual de 17520 TWh, lo que puede suministrar 2000 TWh/año de electricidad, que sería suficiente para satisfacer aproximadamente una cuarta parte del consumo eléctrico mundial [5].

Existen varias ventajas de obtener energía a partir del aprovechamiento del recurso del oleaje, entre ellas podemos resaltar que la forma de generación y transmisión de las olas es mucho más estable en el tiempo que el viento, además se trata de un recurso predecible si se conocen, entre otros factores, el viento en alta mar y las corrientes atmosféricas de la zona en donde se pretende captar la energía [3]. El recurso es ilimitado y de alta disponibilidad, el desarrollo de esta energía puede suministrar el consumo energético de regiones costeras remotas o en islas en las que no se cuenta con energía eléctrica. También es necesario realizar un análisis de las desventajas de esta energía, entre las principales está el daño a los dispositivos o estructuras debido a condiciones meteorológicas adversas como tormentas, huracanes, ciclones o tsunamis. Otra desventaja puede ser la alteración o destrucción de un ecosistema marino al realizar la instalación de estructuras para los dispositivos transformadores de energía [5].

A nivel mundial se cuenta con 1,478,106 km de costa del total de los 242 países y territorios [6], el oleaje es un recurso energético que si se aprovecha de manera adecuada puede contribuir significativamente al suministro de energía eléctrica, sobre todo en las regiones con costas. En los últimos años se han estudiado, probado e implementado diferentes tecnologías para la extracción de energía de las olas, en la sección siguiente se describen algunos de los más utilizados.

3.1. DISPOSITIVOS TRANSFORMADORES DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ

Dentro de los numerosos dispositivos transformadores de energía undimotriz destacan ocho tipos, los cuales se ilustran en la *Figura 1* y se describen a continuación: El atenuador es un dispositivo que captura la energía del movimiento de las olas por medio de dos brazos flotantes unidos por un pistón (*ver Fig.1a*) [8]. Las estructuras flotantes de tipo punto absorbente aprovechan la energía de las olas a través de su movimiento sobre de la superficie del agua, en la *Fig. 1b* se muestra como se transmite la energía de la boya flotante a la base por medio de un dispositivo de tipo pistón [9]. Otro dispositivo transformador de energía undimotriz es el convertidor oscilante de oleaje (*Fig.1c*), en este se extrae energía por la parte inferior de las olas, el movimiento debido a la masa de agua genera energía aprovechable [8,10]. En la *Fig.1d* se muestra un dispositivo de tipo diferencial de presión sumergida, consta de una estructura que normalmente se ubica cerca de la costa y se une al lecho marino, el movimiento de las olas hace que el dispositivo suba y baje continuamente provocando un diferencial de presión que bombea un fluido a través de un generador eléctrico [10].

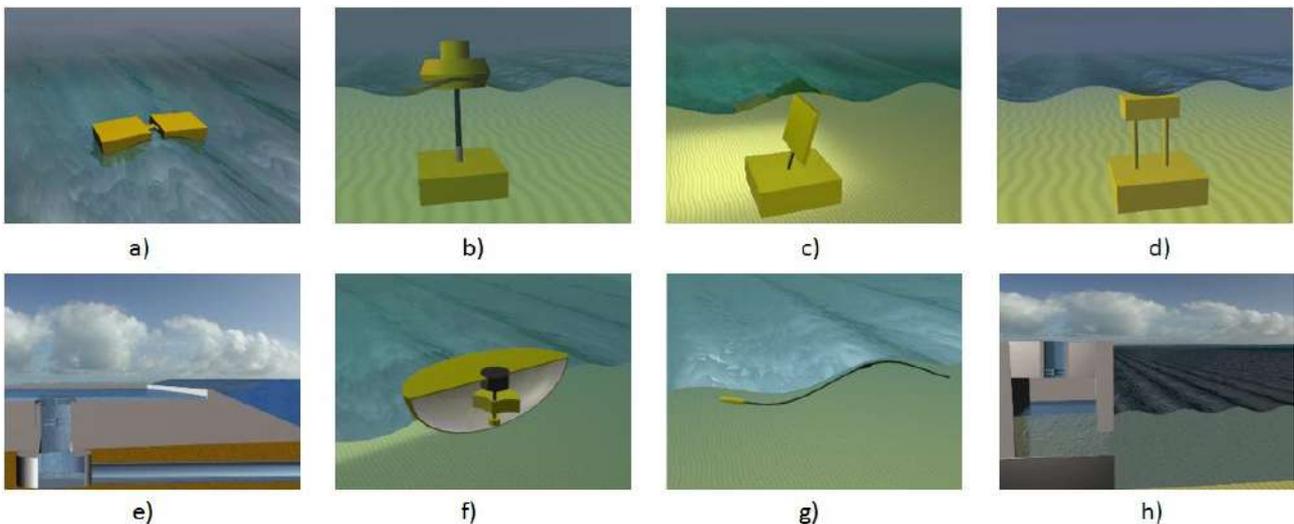


Figura 1: Dispositivos Transformadores de Energía Undimotriz [7].

Entre los dispositivos más utilizados en la actualidad destacan los de tipo sobrecarga (*ver Fig.1e*); son dispositivos de gran tamaño que almacenan agua en un depósito, el agua fluye por la parte inferior de la estructura pasando a través de una turbina que aprovecha la energía [10]. En la *Fig. 1f* se muestra un dispositivo de tipo masa giratoria, en estos dispositivos se presentan dos tipos de movimiento para capturar energía, rotativo y oscilante, la combinación de estos movimientos impulsa un peso excéntrico conectado a un generador eléctrico [11]. El dispositivo Bulge Wave, mostrado en la *Fig.1g* consiste en un tubo de goma lleno de agua que se encuentra anclado al lecho marino, el agua entra por la popa y la ola que pasa provoca variaciones de presión a lo largo del tubo creando un abultamiento, a medida que el bulto viaja a través del tubo se acumula energía que puede usarse para impulsar una turbina ubicada en la proa [12]. Por último, la Columna de Agua Oscilante (*Fig.1h*) es una de las estructuras más utilizadas en el aprovechamiento de este tipo de energía renovable [9,10], en el apartado siguiente se explicarán detalladamente sus características y funcionamiento.

3.2. COLUMNA DE AGUA OSCILANTE (OWC)

Entre los diferentes dispositivos que existen para la captación de la energía del oleaje destacan las Columnas de Agua Oscilante (mejor conocidas como OWC por sus siglas en inglés) debido a su sencillez geométrica, su mantenimiento económico y la facilidad de instalación en zonas costeras. Los convertidores OWC transforman la energía del oleaje en energía útil; tienen que ser capaces de funcionar eficientemente para las amplias gamas de frecuencia y amplitud de las olas. Las OWC consisten en una estructura hueca, parcialmente sumergida, que está abierta al mar por su parte inferior, encerrando una columna de aire sobre una columna de agua [9,10], ver Figura 2.

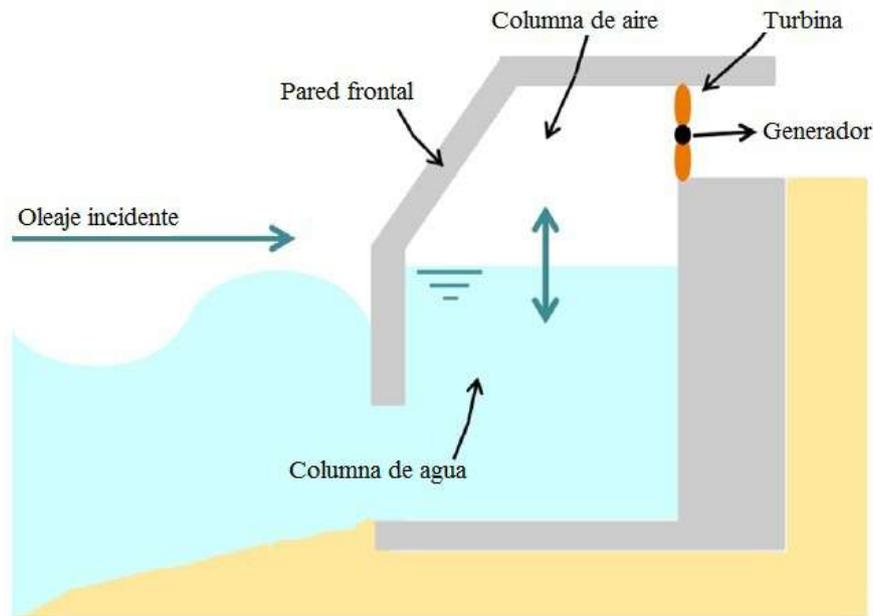


Figura 2: Diagrama esquemático de una Columna de Agua Oscilante (OWC) [13].

Las OWC se pueden clasificar según su posición relativa a la costa (en la costa, en aguas poco profundas o en aguas profundas), por su capacidad de producción energética (pueden ser grandes, medianos o pequeños aprovechamientos), por su posición relativa a la dirección del oleaje (totalizadores o terminadores, atenuadores o absorbedores) y por su posición relativa al agua (fijos, flotantes, semisumergidos o sumergidos) [3,10].

El funcionamiento de la Columna de Agua Oscilante consta de dos etapas. En la primera etapa el oleaje incidente provoca que la columna de agua suba, lo que a su vez comprime la columna de aire, este aire atrapado se expulsa por una tobera hacia una turbina en la que se genera la potencia. La segunda etapa ocurre cuando la ola sale de la columna, provocando que el nivel del agua disminuya y con esto la columna de aire se expanda, haciendo fluir nuevamente el aire hacia la turbina. Las turbinas empleadas en estos dispositivos son de tipo Wells, las cuales tienen la capacidad de girar independientemente de la dirección del flujo de aire [9,10].

3.3. DISPOSITIVOS OWC INSTALADOS ACTUALMENTE

Desde la década de los ochentas se han construido diversas plantas que utilizan tecnologías de OWC, de las cuales algunas han sido dañadas o destruidas en su totalidad debido a las condiciones extremas del oleaje y algunas otras siguen funcionando hasta la actualidad, con una potencia instalada superior a 1 MW [14]. A continuación se describen brevemente los dispositivos OWC más importantes a nivel mundial.

Kvaerner (1985): Es una central que produce 500 kW, construida en la isla de Toftestallen, en Noruega (*ver Fig.3a*). El sistema de conversión está constituido por una turbina Wells vertical situada en la parte superior, permitía una sobrecarga de 1000 kW y una velocidad de giro de 1500 rpm. Esta planta estuvo en funcionamiento hasta que en 1988 un fuerte temporal acabó con ella [14].

Mighty Whale (1988): Fue construida en Japón, la principal característica y diferencia con otras estructuras OWC es que es una estructura flotante de 30x40 metros, la cual genera una potencia de 110 kW (*ver Fig.3b*). Esta estructura presenta un rendimiento de hasta el 60 % [15].

Sakata (1990): También desarrollada en Japón (*ver Fig.3c*), fue construida sobre un rompeolas de un puerto, genera una potencia de 60 kW con una turbina tipo Wells [16].

Vizhinjam (1990): Situada en la India, en el estado de Kerala (*ver Fig.3d*). Se integró a un rompeolas en el que se generaba una potencia de 150 kW [14]. La cámara consistía en un cajón de hormigón anclado en la parte posterior del rompeolas. Podía soportar el impacto de olas de hasta 7 metros de altura, actualmente no se encuentra en funcionamiento [16].

OSPNEY (1992): Situado en Escocia (*ver Fig.3e*), producía una potencia máxima de 2 MW, que hasta esa fecha era el dispositivo de mayor potencia a nivel mundial [9,14]. Estaba situado a aproximadamente 18 m de la costa y se encontraba fijo al fondo marino mediante sedimentos. Tenía una forma semiesférica de 20 m de altura, que en su interior albergaba dos cámaras de aire con dos turbinas Wells y varios generadores. Su funcionamiento terminó en 1996 cuando fue destruida por las olas [16].

Pico en Azores (1999): Es un dispositivo de 400 kW ubicado en una isla de Portugal (*ver Fig.3f*), se ha calculado que la máxima eficiencia de esta planta es de 69.9% y que produce una potencia anual promedio de 0.7 GWh [16]. Esta planta se utilizó para suministrar casi la totalidad de energía eléctrica que se consumía en la isla. Actualmente continúa en operación y se estima un funcionamiento óptimo para los próximos 6 años [17].

LIMPET (2000): Ubicado en la isla de Islay, Escocia (*ver Fig.3g*), es una de las instalaciones más importantes y conocidas internacionalmente. Cuenta con una potencia nominal de 500 kW, obtenida a partir de una turbina Wells y dos generadores de 250 kW, fue desarrollada por la empresa Wavegen Ltd. En el año 2004 esta planta se mejoró, incrementando su potencia a 2 MW obtenidas por cuatro turbinas Wells [15,17].

Port Kembla (2002): Ubicada en Australia, con una instalación de 500 kW (*ver Fig.3h*). Cuenta con una turbina de paso variable (que presume un rendimiento mayor que las de tipo Wells) y un reflector parabólico situado en la parte trasera del dispositivo [16].

Backward Bend Duct Buoy (2002): BBDB es un dispositivo instalado en Galway Bay, Irlanda (*ver Fig.3l*). El concepto del funcionamiento de este dispositivo no es nuevo, la idea de la boya doblada hacia atrás del conducto fue desarrollada en Japón en la década de los ochenta y se han desarrollado muchos estudios teóricos y experimentales, hasta que finalmente en el 2002 se instaló el dispositivo [17].

Mutriku (2005): Está ubicada en Guipúzcoa, es la primera planta que cuenta con un sistema de dieciséis turbinas de 18.5 kW alojadas en un rompeolas y conectadas a la red (*ver Fig.3j*). La potencia nominal de la planta es de 296 kW y se calcula que la energía generada anualmente es de 600 MWh [15].

Oceanlinx Mk3 (2008): Surge como una tercera generación del dispositivo Kamei, instalado en New South Wales, Australia (*ver Fig.3k*). Es una plataforma flotante con ocho cámaras OWC que se encuentra conectada a la red y produce 2.5 MW [17].



Figura 3: Dispositivos OWC instalados a nivel mundial [14-17].

BBDB (2011): Es una implementación a la planta creada en el 2002, se desarrolló por la empresa irlandesa Ocean Energy Ltd (*ver Fig.3i*). Consta de un absorbedor de tipo puntual simétrico que le permite orientarse libremente hacia la ola incidente. Es un dispositivo muy compacto que además ofrece buenos rendimientos y no requiere tanto esfuerzo para su anclaje [16].

GreenWave (2014): Es un dispositivo con una potencia de 1 MW construido por la compañía Oceanlinx (*ver Fig.3m*). Hace algunos años ocurrió un accidente en las bolsas de aire que soportaban la estructura de 3000 toneladas, por lo que actualmente no se encuentra en funcionamiento [14,16].

Yongsoo (2015): Es una planta de 500 kW instalada en la isla de Jeju, Corea del Sur (*ver Fig.3n*). La planta tiene 37 m de largo y 31.2 m de ancho y se encuentra operando desde mediados del 2016, es la planta funcional más reciente de la que se tiene registro [15].

3.4. ANTECEDENTES

Uno de los pioneros en el campo del aprovechamiento de la energía de las olas fue el japonés Yoshio Masuda, que empezó sus investigaciones en 1945 y en 1960 desarrolla un sistema neumático para la carga de baterías en boyas de navegación [18]. Los primeros trabajos de Lamb [19] y Stoker [20] fueron en el desarrollo de la teoría de ondas bidimensionales, generadas en aguas profundas por una presión oscilante aplicada uniformemente sobre un segmento de superficie libre. Posteriormente expresiones más detalladas fueron dadas por Wehausen y Laitone [21], incluyendo los casos en dos y tres dimensiones para distribuciones de presión oscilante no uniforme en aguas con profundidad finita. Más tarde, McCormick [22] y Evans [23] consideraron el caso general en dos y tres dimensiones de sistemas de absorción de energía a partir de distribuciones oscilantes de presión, incluyendo la difracción generada por los objetos sumergidos.

Sarmiento y Falcão [24] analizaron un conjunto de variables de diseño del dispositivo para el caso bidimensional y profundidad constante, relacionando la fase de la turbina con el flujo de aire interno de la cámara. También es importante mencionar el trabajo de Evans y Porter [25] en el estudio bidimensional de las características hidrodinámicas de un OWC con pared frontal, para fondo plano. Rezanejad, y J. Bhattacharjee [26], analizan el efecto sobre la eficiencia del dispositivo de implementación de una OWC de doble cámara colocada sobre un fondo escalonado, el problema matemático se formula en el sistema de coordenadas cartesiano bidimensional bajo la teoría lineal de ondas de agua. El rendimiento del dispositivo propuesto se analiza y compara con los típicos OWC de una sola y con OWC de doble cámara sobre un perfil de fondo uniforme, mostrando que de esta manera el dispositivo puede mejorarse significativamente en una amplia gama de frecuencias.

S. John Ashlin y V. Sundar [27] realizaron un estudio que se centra principalmente en la influencia de la configuración de perfil de fondo en el OWC en su rendimiento hidrodinámico; en uno de sus prototipos emplearon un perfil de fondo de curva circular, con el cual se obtuvo un mejor rendimiento en términos de su conversión de energía, el cual aumenta a medida que el perfil de fondo se encuentre más cercano al periodo natural del oleaje. Más tarde, Pasquale y Camporeale [28] desarrollaron un modelo linealizado para estimar la hidrodinámica de una OWC sumergida, considerando oleaje aleatorio. Medina López et. al. [29] presentan un modelo numérico para analizar los efectos de los cambios en la morfología en las OWC. El modelo fue desarrollado en FLUENT y basado en la teoría del modelo de actuador de disco para simular el rendimiento de la turbina, encontraron que la disipación de energía dependía directamente del volumen del fondo del canal. Senturk y Ozdamar [30] realizaron el análisis de una OWC sustituyendo la pared frontal parcialmente sumergida, por una barrera completamente sumergida con una abertura.

En la actualidad se siguen desarrollando diversos trabajos y estudios para el aprovechamiento de la energía del mar en dispositivos OWC, Chia-Ying Chang et al. [31] presentan una investigación analítica y experimental del rendimiento hidrodinámico y la optimización de la cámara de la OWC, manipulando

las condiciones geométricas del dispositivo para incrementar la amplitud del oleaje. Mitsumasa Lino y Takeaki Miyazaki [32] estudiaron el efecto de la inclinación del colector de la OWC para describir las oscilaciones del oleaje, analizando el periodo de resonancia obtenida con un oscilador mecánico de un grado de libertad, comprobaron que cambiar la dirección del movimiento afecta las características de oscilación de las OWC, debido principalmente a la reducción de la fuerza de recuperación de la gravedad. Posteriormente K. Rezanejad y C. Guedes Soares [33] realizaron una investigación numérica y experimental del rendimiento hidrodinámico de una OWC, ellos detectaron que la eficiencia del dispositivo es muy sensible a las variaciones en la amortiguación de la turbina, aunque la máxima eficiencia absoluta es menos sensible a las ligeras alteraciones aplicadas a la amortiguación de la turbina.

Yu-Shu Kuo et al. [34] emplearon un software de diferencias finitas para estudiar las características hidrodinámicas de los rompeolas sobre una OWC, obtuvieron un modelo numérico el cual se verificó mediante un experimento en un canal anclado a un mecanismo de interacción aire-agua y en base a sus resultados desarrollaron un diseño óptimo de rompeolas de cajón OWC para la generación de energía. Un estudio similar fue realizado por K. Rezanejad y J. Bhattacharjee [35], en su trabajo analizan los efectos en la eficiencia de un fondo escalonado acoplado a una OWC, los resultados analíticos muestran que con un ajuste adecuado se puede incrementar significativamente la absorción de potencia del dispositivo. G. Malara et al. [36] estudian la dinámica y la extracción de potencia de un dispositivo OWC en U, implementando un modelo hidrodinámico en el que se muestra que a medida que aumenta el ancho del dispositivo se obtiene un incremento en la potencia.

Bautista et al. [37] mediante un análisis de escalas múltiples, estudiaron la frecuencia de resonancia de una OWC circular. Posteriormente, A. Mora et al. [38] analizaron la contribución de un colector de ondas para mejorar la eficiencia e incrementar la potencia útil de una OWC, aplicaron el teorema de transporte de Reynolds a la primera ley de la termodinámica, y asumiendo el flujo de aire como incompresible, obtuvieron el modelo matemático para calibrar la cámara de presión de aire de la OWC, esto se resolvió usando el método numérico estándar de Runge-Kutta de cuarto orden.

Los trabajos mencionados anteriormente facilitan el acceso a los conocimientos requeridos para analizar la hidrodinámica y la eficiencia de las Estructuras de Columnas de Agua Oscilante (OWCs). Los estudios teóricos indican que de manera natural, con las oscilaciones del oleaje, es posible mover la columna de agua para transformar la energía mecánica proveniente del océano a energía eléctrica; sin embargo no en todas las regiones costeras se presenta un potencial energético de oleaje óptimo para la producción de energía con una OWCs, lo que puede convertirse en una problemática seria que, implica ineficiencias en el proceso o pérdidas económicas. Para atender a la situación mencionada, se propone variar la topografía de un colector de ondas acoplado a una estructura OWC, sustituyendo el fondo uniforme del colector por un fondo ondulatorio, con la finalidad de alterar la frecuencia de oscilación, amplitud y celeridad de la onda incidente, para poder obtener la máxima potencia posible, sin importar el potencial del oleaje de la región donde se presente la estructura.

CAPÍTULO 4

4. HIDRODINÁMICA DEL COLECTOR DE ONDAS CON TOPOGRAFÍA ONDULAR ACOPLADO A UNA OWC

4.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Con el fin de analizar la relevancia que tiene un colector de ondas con fondo cosenoidal acoplado a una OWC, se propone el modelo físico mostrado en la Fig. 4, en él se considera un sistema de coordenadas cartesianas donde el plano $x - y$ se encuentra sobre el nivel medio del mar y z es vertical. El eje x es positivo hacia la derecha y el eje z es positivo hacia arriba. La estructura OWC tiene un ancho $2b$ y una altura h_c y se encuentra parcialmente sumergida a una profundidad W a partir del nivel medio del mar, la pared que separa el canal con la estructura OWC tiene un espesor delgado s , el aire que incide en la cámara de compresión fluye a través de la abertura cuadrangular que tiene por lado $2l$. El colector de ondas tiene una profundidad media h_0 , una longitud L , y el fondo obedece una distribución oscilante definida por $h(x)$.

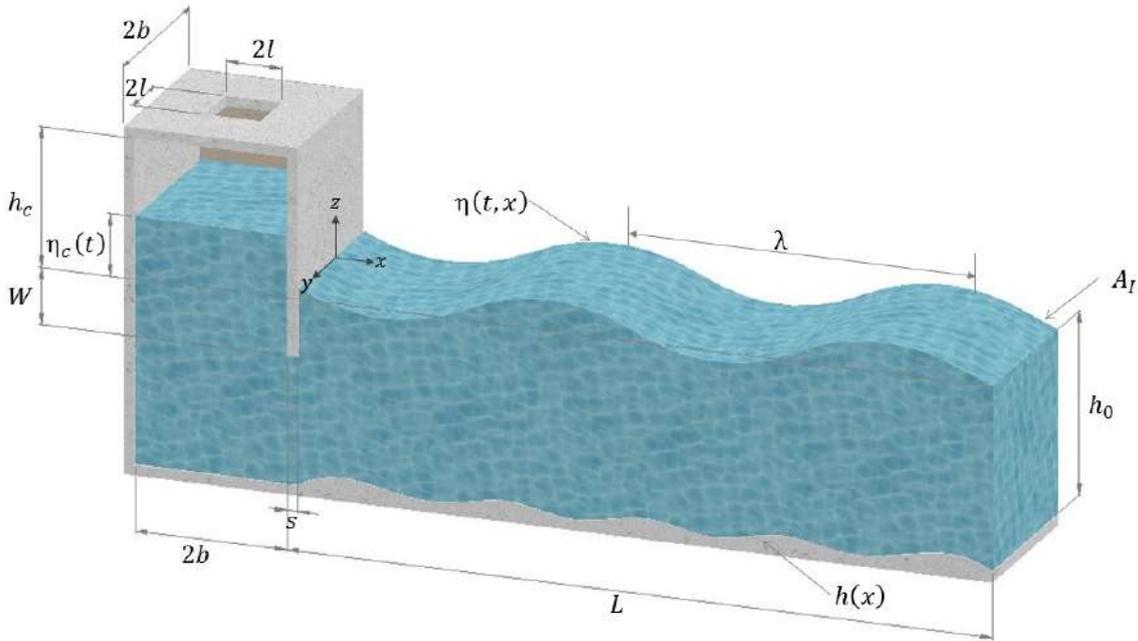


Figura 4: Diagrama esquemático del sistema propuesto OWC-Collector de ondas.

La función trascendente $h(x)$, describe la variación del fondo del colector de ondas, con una altura de onda $2h$, N es el número de oscilaciones sobre un intervalo definido de longitud L :

$$h(x) = -h_0 + \left[h + h \cos \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{N}{L} \cdot x \right) \right] \quad (1)$$

Para la solución del modelo de este trabajo se emplea el software COMSOL Multiphysics 5.3. La simulación se realizó en dos etapas, una para la propagación del oleaje en el colector de ondas y la otra con la columna de agua oscilante acoplada al colector. Dichos análisis se describen a continuación.

4.2. FORMULACIÓN DE LA PROPAGACIÓN DE ONDAS EN EL COLECTOR CON FONDO COSENOIDAL

En este apartado se desarrolla el modelo matemático de la propagación del oleaje en un colector de ondas con fondo cosenoidal acoplado a la Columna de Agua Oscilante. Usando la teoría de ondas largas u ondas de flujo somero, la cuales deben cumplir las condiciones: $h/\lambda < 1/20$ o $kh < \pi/10$, donde (λ) es la longitud de onda y k es el número de onda. Las ecuaciones para ondas largas se obtienen de la integración de las ecuaciones de Navier-Stokes, en el caso donde la escala de longitud horizontal es mucho mayor que la escala de longitud vertical, bajo esta condición, la conservación de masa implica que la velocidad vertical del fluido es pequeña [39]. Puede demostrarse por la ecuación de momento que los gradientes de presión vertical son casi hidrostáticos, y que los gradientes de presión horizontal se deben al desplazamiento de la superficie de presión, lo que implica que el campo de velocidad horizontal es constante en toda la profundidad del fluido. La integración vertical permite que la velocidad vertical se elimine de las ecuaciones. Estas ecuaciones están dadas por [40]:

Ecuación de continuidad:

$$\frac{\partial \eta(x, t)}{\partial t} = -\frac{\partial u(x, t) [h(x) + \eta(x, t)]}{\partial x} \quad (2)$$

Ecuación de cantidad de movimiento:

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial t} = -g \frac{\partial \eta(x, t)}{\partial x} \quad (3)$$

donde: $\eta(x, t)$ es la variación de la superficie libre del oleaje, $u(x, t)$ es el vector velocidad, t es el tiempo y g es la aceleración de la gravedad. Las Ecs. (2) y (3) han sido ampliamente estudiadas analítica y numéricamente, en una o dos dimensiones, sin embargo, éstas se analizan considerando el oleaje como un fenómeno independiente del efecto que puede provocar un obstáculo [41]. Ambas ecuaciones pueden ser resueltas simultáneamente, al combinarlas se obtiene una ecuación diferencial que gobierna la oscilación de la superficie libre en cualquier instante [42].

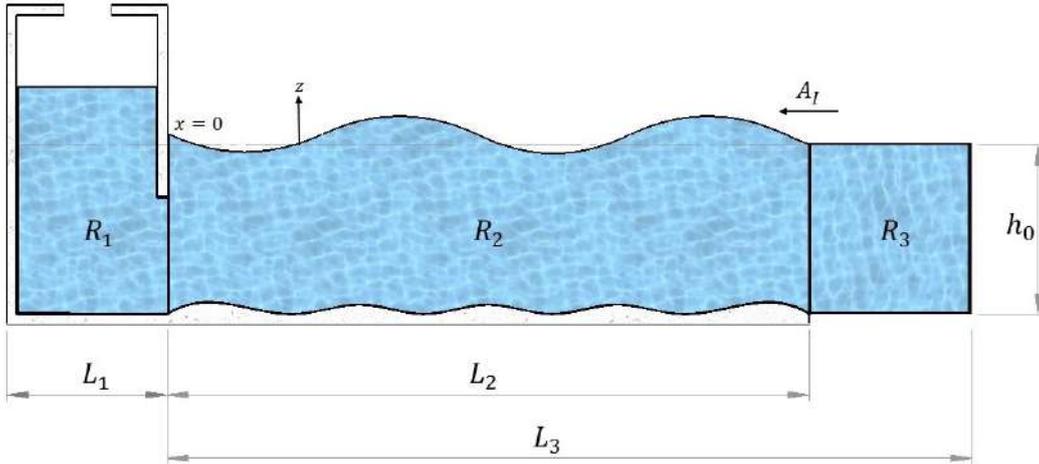


Figura 5: Modelo físico del colector ondas.

Para poder realizar el análisis del colector de ondas utilizaremos tres regiones de propagación, las regiones R_1 y R_3 son canales con fondo uniforme y la región R_2 corresponde al colector con fondo cosenoidal, como se ilustra en la Fig. 5. Las ecuaciones de gobierno linealizadas deben de ser resueltas en:

$$h(x) = \begin{cases} h_0 & \text{para } -L_1 \leq x \leq 0 \\ h(x) = -h_0 + [h + h \cos(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{N}{L} \cdot x)] & \text{para } 0 \leq x \leq L_2 \\ h_0 & \text{para } L_3 - L_2 \leq x \leq L_3 \end{cases} \quad (4)$$

4.2.1. ANÁLISIS ADIMENSIONAL DE LA PROPAGACIÓN DEL OLEAJE

Realizar un análisis en términos de variables físicas puede resultar complicado dada la gran cantidad de combinaciones que pueden presentarse, para resolver este problema las ecuaciones de gobierno se adimensionalizan, usando las variables adimensionales siguientes:

$$\Delta = \frac{\eta}{A_I}; \quad \chi = \frac{x}{L}; \quad \bar{h}(\chi) = \frac{h(\chi)}{h_0}; \quad \tau = \omega t; \quad U = \frac{h_0 \cdot L \cdot u}{A_I \sqrt{h_0 \cdot g \cdot \lambda}}$$

Sustituyendo las variables adimensionales en las Ecs. (2) y (3) se obtiene,

$$\frac{\partial \Delta}{\partial \tau} + \kappa^2 \frac{\partial U(\chi, \tau) [\bar{h}(\chi) + \epsilon \Delta(\chi, \tau)]}{\partial \chi} = 0, \quad (5)$$

$$\frac{\partial U}{\partial \tau} + \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \Delta(\bar{h}(\chi), \tau)}{\partial \bar{h}(\chi)} = 0 \quad (6)$$

y sustituyendo también las variables en la Ec. (1)

$$\bar{h}(\chi) = 1 + \left[\Gamma + \Gamma \cos \left(\frac{\pi}{2} \cdot N \cdot \chi \right) \right], \quad (7)$$

con los parámetros adimensionales:

$$\kappa = \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda}{L}; \quad \Gamma = \frac{h}{h_0}; \quad \epsilon = \frac{A_I}{h_0}$$

Acoplando las Ecs. (5) y (6), para la región R_2 , en el límite $\epsilon \rightarrow 0$ se obtiene:

$$\frac{\partial^2 \Delta}{\partial \tau^2} - \bar{h}(\chi) \frac{\kappa^2}{2\pi} \frac{\partial}{\partial \chi} - \frac{\kappa^2}{2\pi} \frac{\partial \Delta}{\partial \chi} \frac{\partial \bar{h}(\chi)}{\partial \chi} = 0 \quad (8)$$

Para ondas progresivas con movimiento armónico simple, la linealización del problema permite la separación del factor del tiempo $e^{-i\omega t}$ como sigue [43]:

$$\Delta(\chi, \tau) = Re [\delta(\chi) e^{-i\tau}] \quad (9)$$

Sustituyendo la Ec. (9) en la ec. (8) obtenemos:

$$\frac{\partial^2 \delta(\chi) e^{-i\tau}}{\partial \tau^2} - \bar{h}(\chi) \frac{\kappa^2}{2\pi} \frac{\partial^2 e^{-i\tau}}{\partial \chi^2} - \frac{\kappa^2}{2\pi} \frac{\partial \bar{h}(\chi)}{\partial \chi} \frac{\partial^2 \delta(\chi) e^{-i\tau}}{\partial \chi} = 0 \quad (10)$$

Reacomodando la ecuación anterior:

$$-\delta(\chi) e^{-i\tau} - \frac{\kappa^2}{2\pi} \bar{h}(\chi) e^{-i\tau} \frac{\partial^2 \delta(\chi)}{\partial \chi^2} - \frac{\kappa^2}{2\pi} e^{-i\tau} \frac{\partial \bar{h}(\chi)}{\partial \chi} \frac{\partial \delta(\chi)}{\partial \chi} = 0 \quad (11)$$

Dividiendo entre $(e^{-i\tau})$, $(\bar{h}(\chi))$, $(K^2/2\pi)$ y acomodando la ecuación anterior obtenemos el modelo matemático que describe la propagación del oleaje bajo la influencia de la topografía ondular propuesta:

$$\frac{d^2\delta(\chi)}{d\chi^2} + \frac{1}{\bar{h}(\chi)} \frac{d\bar{h}(\chi)}{d\chi} \frac{d\delta(\chi)}{d\chi} + \frac{1}{\bar{h}(\chi)} \frac{2\pi}{\kappa^2} \delta(\chi) = 0 \quad (12)$$

La primera condición de frontera para la Ec. (12), se puede derivar bajo el supuesto de que el equilibrio del flujo de energía debe mantenerse entre dos secciones transversales arbitrarias. En $\chi = 0$, tenemos un flujo de energía transmitido y otro de energía radiada, que es inducido por el movimiento de la OWC, por otro lado en $\chi = 1$, se presentan flujos de energía incidente y reflejado. Por lo tanto el balance de flujo de energía se puede expresar como:

$$ch_0E_R + c_r h_0 E_r + c(h_0 - W) E_T = ch_0 E_I \quad (13)$$

donde $E_R = \frac{1}{2}\rho g \eta_R^2$, $E_r = \frac{1}{2}\rho g \eta_r^2$, $E_T = \frac{1}{2}\rho g \eta_T^2$ y $E_I = \frac{1}{2}\rho g \eta_I^2$ son las energías de las ondas reflejada, radiada, transmitida e incidente, respectivamente, donde $c = \omega/\lambda$ es la celeridad de las ondas reflejada, transmitida e incidente, y es constante en las regiones R_1 y R_2 ; $c_r = \omega_r/\lambda_r$ es la celeridad de la onda radiada, la cual se genera en el colector de ondas de propagación por la oscilación de la OWC. La frecuencia de la onda radiada está dada por ω_r y su longitud de onda es λ_r , tomando en cuenta los comentarios anteriores, la Ec. (13) puede expresarse en la forma siguiente

$$\eta_R^2 + \left(\frac{c_r}{c}\right) \eta_r^2 + (\bar{h} - \mu) \eta_T^2 = \eta_I^2 \quad (14)$$

Acomodando la Ec. (14) en términos de la longitud de onda y expresándola en su forma adimensional, obtenemos la ecuación siguiente

$$|\beta_R|^2 + (\bar{h} - \mu) |\delta(\chi = 0)|^2 + \frac{\omega_r \lambda_r A_r^2}{\omega \lambda A_I^2} = 1 \quad (15)$$

donde $|\beta_R| = |A_R/A_I|$ y $|\delta(\chi = 0)|$ son los coeficientes de reflexión y transmisión, respectivamente. La relación entre la pared vertical sumergida w_c y la profundidad h_0 está definida por el parámetro adimensional $\mu = w_c/h_0$.

El coeficiente de reflexión $|\beta_R|$, está formado por la suma de la onda reflejada debida a la geometría del colector de ondas y la generada por la pared vertical en $\chi = 0$. Para colectores de ondas esbeltos con su longitud horizontal característica del mismo orden que la longitud de onda, se demostró que la reflexión del oleaje es pequeña, además que para $w_c/\lambda \ll 1$ el coeficiente de reflexión es también muy pequeño [44]. Por lo tanto a partir de los comentarios anteriores, consideramos que $|\beta_R| \rightarrow 0$. Además para el límite de $(\omega_r/\omega) \sim O(1)$ implica que $\lambda_r/\lambda \ll 1$ y así el tercer término del lado izquierdo de la Ec. (15) también desaparece. Con base en lo anterior la primera condición de frontera para la Ec. (12), puede expresarse como sigue:

$$\delta|_{\chi=0} \approx \frac{1}{(\bar{h} - \mu)^{1/2}} \quad (16)$$

La Ec. (16) representa la condición de frontera de acoplamiento entre la OWC y el colector de ondas en $\chi = 0$. Para la condición de frontera en $\chi = 1$, se utiliza la condición trivial:

$$\delta|_{\chi=1} \approx 1 \quad (17)$$

4.3. ANÁLISIS NUMÉRICO DEL SISTEMA ACOPLADO COLECTOR DE ONDAS - OWC

En este trabajo se utilizó el software COMSOL Multiphysics 5.3 para analizar la hidrodinámica de la OWC, este software es un paquete de modelado, análisis y simulación por elementos finitos para varias aplicaciones físicas, especialmente fenómenos de fluidos, térmicos, estructurales, electromecánicos o multifísicos. Para el modelo del sistema acoplado colector de ondas - OWC (mostrado en la figura 4) se utilizó la física de flujo de fluidos, con dos fluidos incompresibles (para el agua y para el aire). Las ecuaciones para resolver el análisis numérico para cada fluido incompresible están definidas por:

$$\rho_j \frac{\partial u_j}{\partial t} + \rho_j (u_j \cdot \nabla) u_j = \nabla \cdot \left[-p_j + \mu_j \left(\nabla u_j + (\nabla u_j)^T \right) \right] \quad (18)$$

$$\rho_j \nabla \cdot (u_j) = 0 \quad (19)$$

donde: $j = a, w$, ($a = \text{aire}$, $w = \text{agua}$) ρ_j es la densidad, t es el tiempo, $\nabla = (\partial/\partial x, \partial/\partial z)$, μ_j es la viscosidad cinemática y el exponente T es la transpuesta de los efectos inerciales de la ecuación. Finalmente p_j y u_j son la presión manométrica y la velocidad que se calcularán, definidas como p_w y u_w , para la física del agua y p_a y u_a , para el aire dentro de la OWC.

4.3.1. CONDICIONES DE FRONTERA

Para la solución numérica de las ecuaciones de gobierno se presentan las condiciones de frontera siguientes:

- Para el dominio del líquido las condiciones de frontera y condiciones iniciales se definen como:

$$x = 0, \quad u_w = \left(\frac{A_I \cdot f}{\Gamma \cdot (1 - \mu)^{0,5}} \right) \text{sen}(f \cdot t) \quad (20)$$

$$t = 0, \quad u_w = 0 \quad y \quad p_w = 0 \quad (21)$$

donde μ relaciona la parte comunicada sumergida de la OWC con la altura del nivel medio del mar ($\mu = W/h_0$).

- En la interfaz entre el líquido y el gas se tiene la condición de frontera por continuidad:

$$u_a = u_w \quad (22)$$

- Bajo la condición de tomar como un fluido incompresible al aire en $z = h_c$ se tiene:

$$u_a = \left(\frac{b}{l} \right)^2 u_w \quad (23)$$

- Para el dominio del aire en la OWC las condiciones iniciales son:

$$t = 0, \quad u_a = 0 \quad y \quad p_a = 0. \quad (24)$$

- Todas las paredes de la estructura presentan la condición de impermeabilidad:

$$n \cdot u_j = 0 \quad (25)$$

donde, n es el vector unitario.

CAPÍTULO 5

5. RESULTADOS

5.1. PROPAGACIÓN DE ONDAS EN EL COLECTOR

La figura 6 muestra la elevación de la superficie libre adimensional δ como una función de χ , para diferentes valores del parámetro geométrico Γ , que relaciona la altura del fondo del colector con la altura del nivel medio del mar. En la gráfica se analiza el comportamiento de seis valores de Γ , manteniendo fijos los valores de $\kappa = 0.001$ y $N = 16$. Para el caso trivial cuando $\Gamma = 0$ (que representa un colector de ondas de fondo horizontal constante) la amplitud adimensional es $\delta = 1$, al incrementar la altura del fondo del colector para obtener un $\Gamma = 0.02$ no se tiene un incremento en la amplitud tan representativo, pero si un desfase en la frecuencia del oleaje. Con $\Gamma = 0.04$ se incrementa el valor de la elevación de la superficie libre a un valor adimensional de 1.1 y cuando $\Gamma = 0.06$ este valor se incrementa a 1.4. Los incrementos más significativos de la elevación de la superficie libre ocurren cuando $\Gamma = 0.08$ y 0.1, obteniendo valores de $\delta = 1.8$ y 3 respectivamente, como se observa en la gráfica prácticamente se duplica y triplica la amplitud del oleaje en comparación a cuando no se usa un colector con fondo cosenoidal. Es importante identificar también que para diferentes valores de Γ se tienen alteraciones en la frecuencia del oleaje. La osciación representada en color verde, donde $\Gamma = 0.1$, es la que presenta una mayor amplitud y por lo tanto es la que incrementaría más el potencial energético del oleaje.

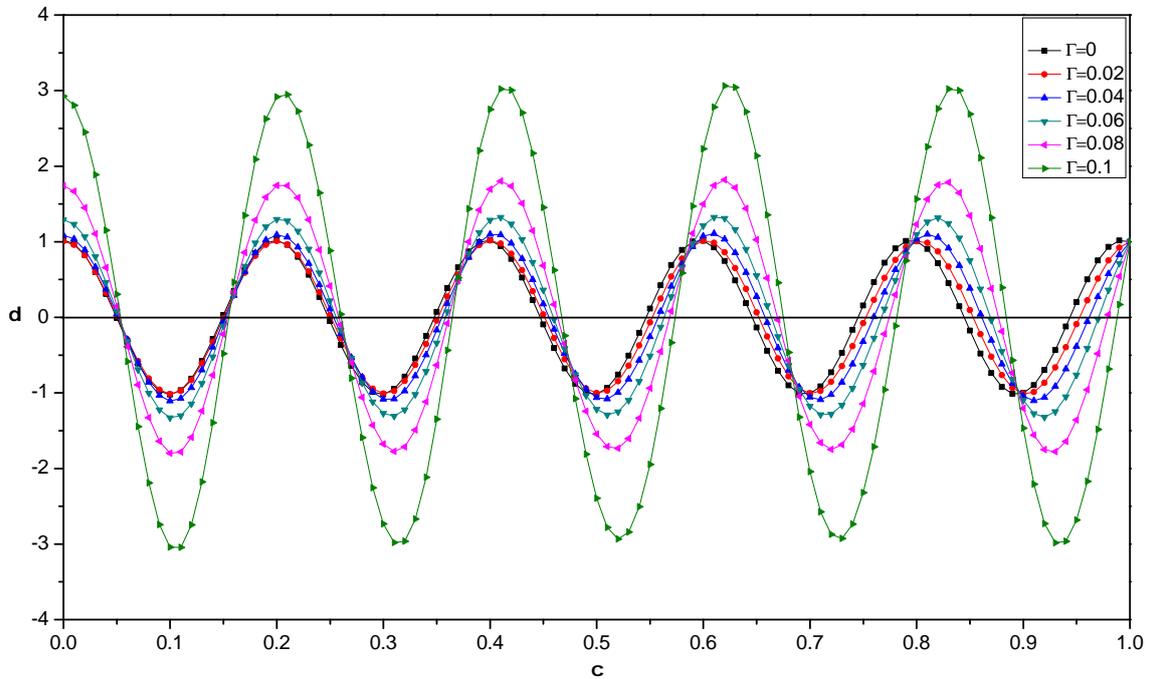


Figura 6: Elevación de la superficie libre adimensional δ como una función del eje adimensional χ , para un colector de ondas con fondo cosenoidal, con valores constantes de $\kappa = 0.001$ y $N = 16$, con variaciones del parámetro geométrico Γ .

En la figura 7 se analiza el efecto que provoca la variación del parámetro dinámico adimensional κ , que relaciona la longitud de onda con la longitud del colector, para esto se fijan los valores de Γ y el número de oscilaciones en la topografía del colector de ondas (0.1 y 16 respectivamente). En la figura se muestran cinco diferentes gráficas en las cuales se puede notar que a medida que aumenta el valor de κ la elevación de la superficie libre disminuye, por lo que podemos determinar que para obtener la mayor cantidad de potencial energético en el oleaje es mejor utilizar valores pequeños de κ , esto se debe a que mientras más largo sea el colector se presentará una menor cantidad de reflexión de ondas (en el trabajo realizado por A. Mora et. al. [38] se demuestra la relación de la reflexión de ondas en función del largo de un colector de ondas acoplado a una OWC) con lo que se obtiene un mejor aprovechamiento del recurso energético del oleaje. También se puede notar que el parámetro κ tiene un efecto en la frecuencia del oleaje, ya que a medida que los valores de este parámetro aumentan, la frecuencia disminuye, presentándose una menor cantidad de olas dentro del colector (lo también tiene un impacto en la potencia que se obtendrá en la OWC).

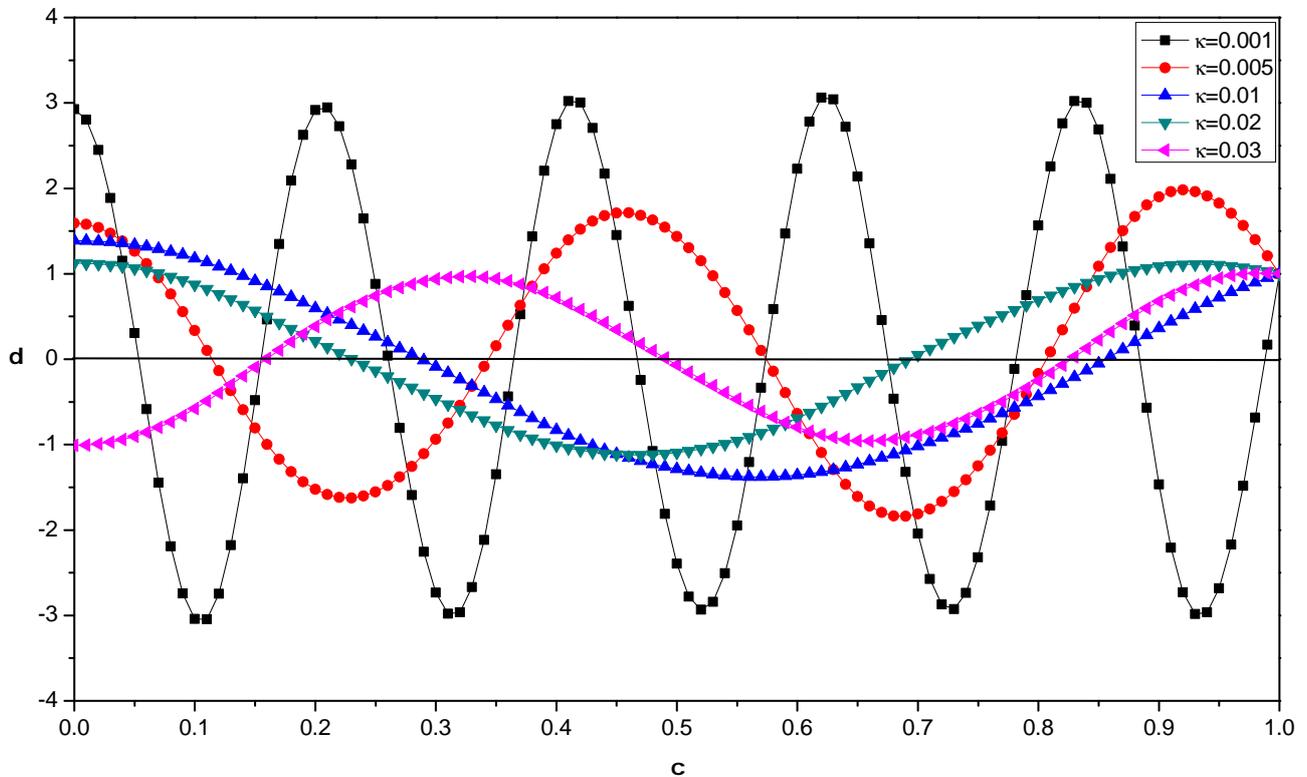


Figura 7: Elevación de la superficie libre adimensional δ como una función del eje adimensional χ , para el colector de ondas con fondo cosenoidal, manteniendo constantes $\Gamma = 0.1$ y $N = 16$, para cinco valores del parámetro κ ($= 0.001, 0.005, 0.01, 0.02$ y 0.03).

La figura 8 muestra la elevación de la superficie libre respecto al eje adimensional χ con una variación en el número de oscilaciones de la topografía del colector acoplado a la OWC. Para este análisis se fijan los valores de los parámetros adimensionales Γ y κ (0.1 y 0.001 respectivamente). Se observa que la frecuencia del oleaje es muy similar sin importar el número de oscilaciones del colector, la principal diferencia entre las gráficas, es en la elevación de la superficie libre, teniendo que mientras mayor es el número de ondas es menor el incremento en la amplitud de δ , sin embargo el cambio en la elevación es prácticamente nulo, por lo que podemos concluir que el número de ondulaciones del colector de ondas no es representativo. En la gráfica se muestra la obtención de tres valores de δ para los casos en que $N = 4, 8$ y 16 respectivamente, para el primer caso se obtiene una amplitud de onda de 3, cuando se proponen ocho oscilaciones en el colector $\delta = 2.7$ y cuando $N = 16$ la elevación de la superficie libre disminuye a 2.5. Por lo tanto se debe considerar un menor número de oscilaciones en la topografía para el diseño del colector.

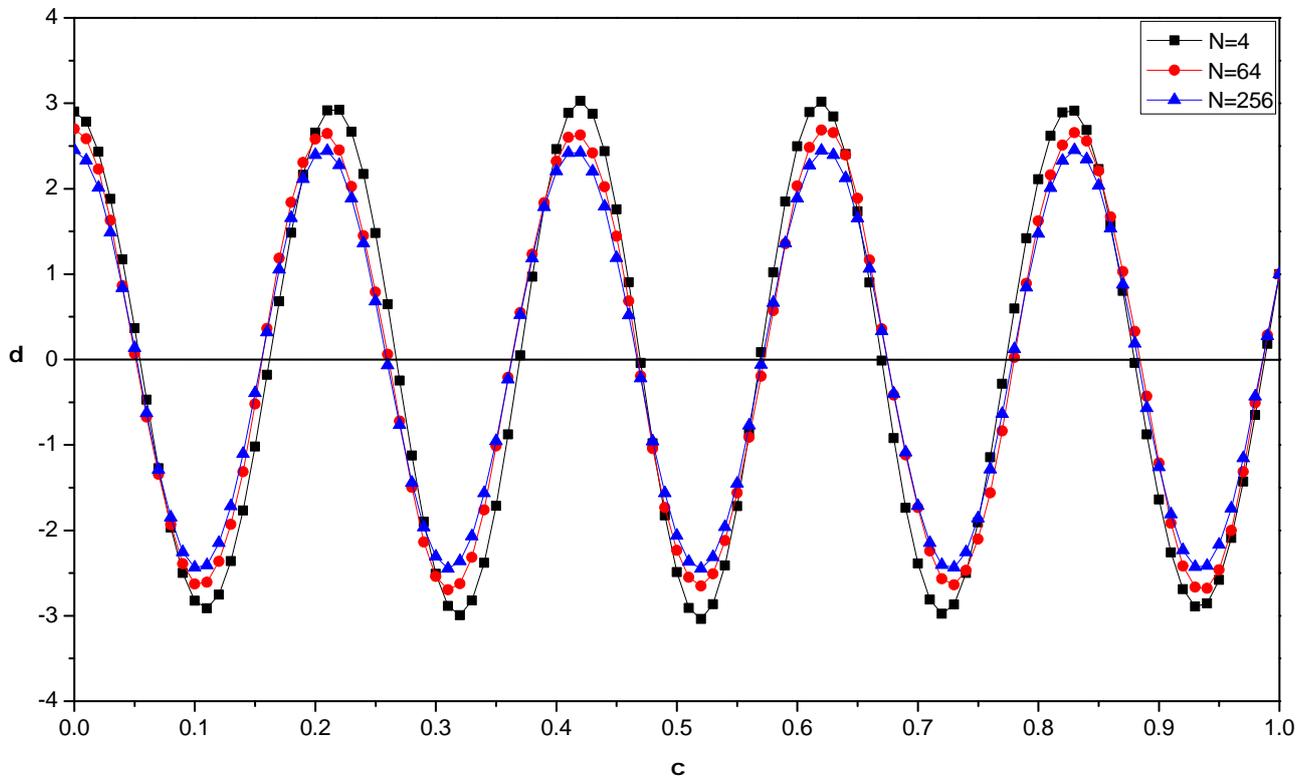


Figura 8: Elevación de la superficie libre adimensional δ como una función del eje adimensional χ , para un colector de ondas con fondo cosenoidal, con valores constantes de los parámetros $\Gamma = 0.1$ y $\kappa = 0.001$, y cuatro valores de N ($= 4, 8$ y 16 respectivamente).

5.2. HIDRODINÁMICA DEL SISTEMA ACOPLADO OWC - COLECTOR DE ONDAS

Para obtener la solución en COMSOL Multiphysics se emplean dos módulos de flujo laminar monofásico, uno para la hidrodinámica dentro de la OWC y otro para la aerodinámica dentro de la cámara de aire. Una vez seleccionada la física del sistema se genera la geometría, esto nos permite localizar las fronteras físicas y seleccionar los dominios de la parte sólida de la OWC, de la parte líquida (para la columna de agua) y del flujo de aire (para la columna de aire).

Los resultados numéricos se realizaron tomando en cuenta los valores físicos propuestos por [45]: $2b = 0.64$ m, $2l = 0.18$ m, $W = 0.17$ m, $h_c = 0.308$ m, $h_0 = 0.92$ m (dimensiones que se definen en el diagrama esquemático de la Fig. 4). Para el oleaje se toma una $\lambda = 28.3$ m con una $A_I = 0.0308$ m, y para el colector de ondas $L = 20.28$ m y h ($= 0, 0.046$ y 0.092) m. Las propiedades de los fluidos y de la estructura se seleccionan de la librería de materiales del software, después se definen las condiciones de frontera especificadas en la sección 4.3.1 y se genera la malla, en la figura 9 se muestra el mallado triangular uniforme que, consta de 2817 elementos para el dominio y 231 elementos para el contorno, para el cálculo numérico, que se resuelve utilizando una discretización por el método de elementos finitos, se resuelven las ecuaciones de gobierno 18 y 19 para un intervalo de tiempo de 0 - 100.

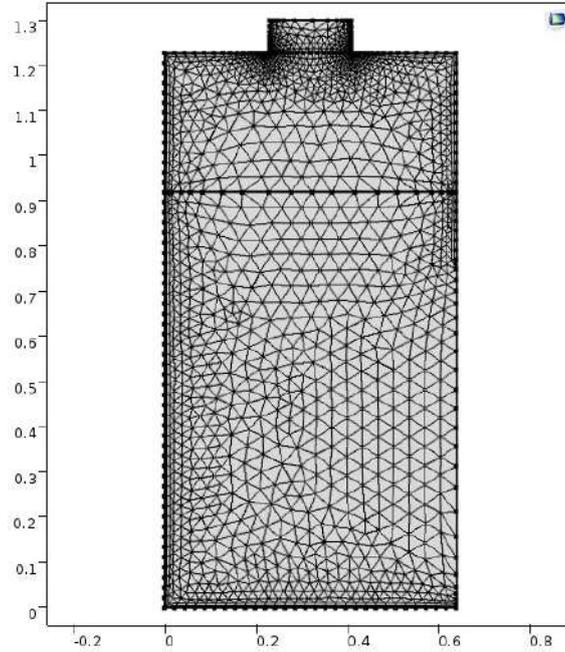


Figura 9: Mallado en CFD de la Columna de Agua Oscilante.

A continuación se analizan los efectos del modelo acoplado OWC - colector de ondas, los resultados obtenidos en el software muestran el campo vectorial de velocidades y presiones en la cámara de aire y en la descarga hacia el orificio de salida de la OWC para diferentes tiempos representativos ($t = 20, 40, 60$ y 80 segundos). Para analizar el efecto del colector de ondas propuesto se realizan variaciones en los valores de Γ (en 0, 0.05 y 0.1), manteniendo fijos los valores de f y μ , que se obtienen de la manera siguiente:

$$f = \sqrt{c^2 - k^2} \quad (26)$$

$$\mu = \frac{W}{h_0} \quad (27)$$

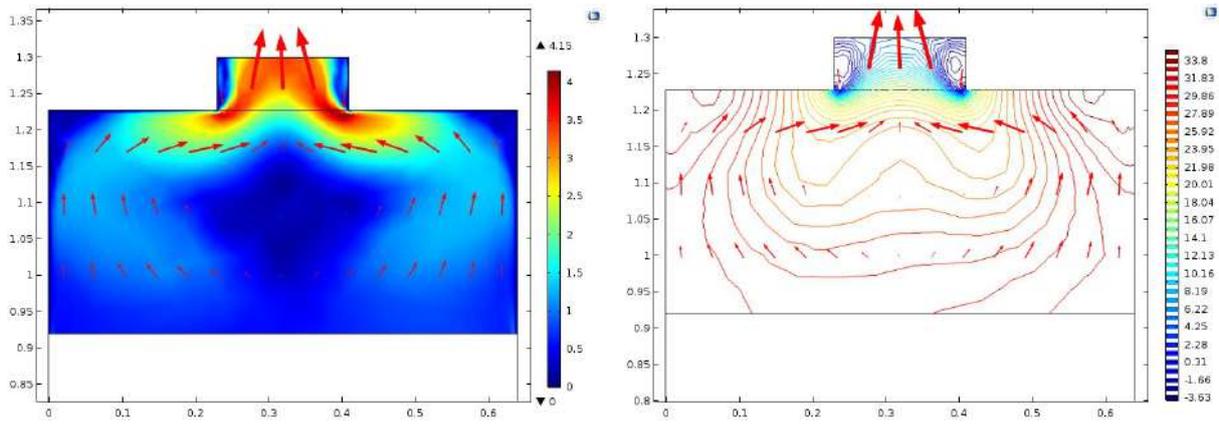
donde $c = \sqrt{gh_0}$ y $k = 2\pi/\lambda$. Sustituyendo λ, g, W y h_0 se obtienen los valores de $f = 0.666$ Hz y $\mu = 0.1847$.

En las figuras 10, 11 y 12 se aprecian las etapas de expansión y de compresión en el interior de la estructura. En la primera etapa el oleaje incidente provoca que la columna de agua suba, lo que a su vez comprime la columna de aire, este aire se expulsa por el orificio de descarga $2l$. La segunda etapa ocurre cuando la ola sale de la columna, provocando que el nivel del agua disminuya y con esto la columna de aire se expanda. Los vectores mostrados en las figuras indican la dirección del flujo de aire.

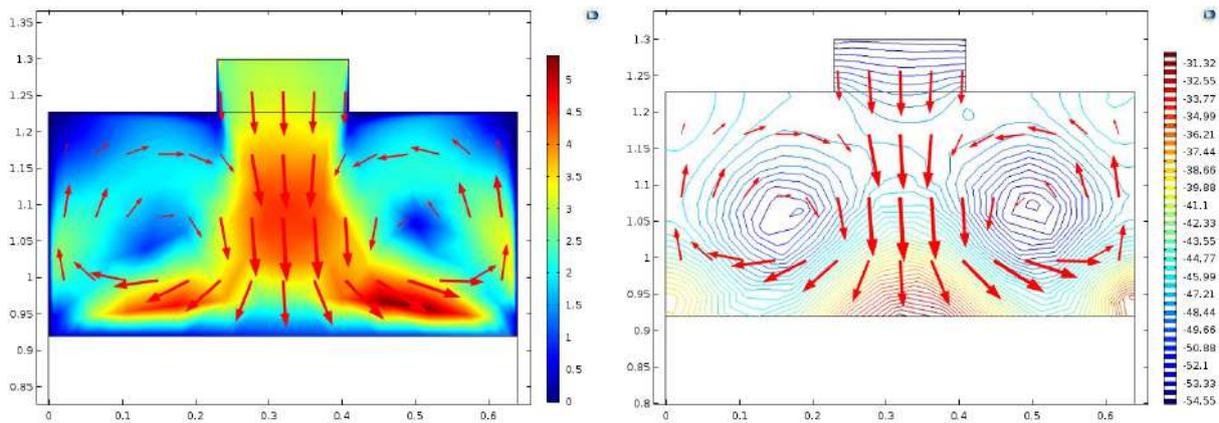
En la figura 10 se muestra el comportamiento del aire cuando se presenta el caso trivial de un canal con fondo constante, es decir con $\Gamma = 0$, en el tiempo $t = 20$ s el aire fluye hacia la salida de la OWC a una velocidad de 4.0 m/s y a una presión de 33.8 Pa. Para $t = 40$ s se presenta una expansión del aire dentro de la OWC, la velocidad y la presión máximas se presentan en la parte media de la columna de aire y no en el orificio de salida, obteniéndose 3.5 m/s y 31.32 Pa a la salida de la estructura y 5.0 m/s y 54.55 Pa en su parte media. Cuando $t = 60$ s de nuevo se presenta una compresión del aire, en este instante la velocidad y presión son de 4.0 m/s y 39.64 Pa, respectivamente. Para $t = 80$ s la columna de agua se expande a una velocidad de 5.0 m/s con una presión de 29.58 Pa. Teniendo como valores promedio en velocidad y presión 4.125 m/s y 33.585 Pa, respectivamente.

En la figura 11 se muestran los campos de velocidades y presiones cuando se implementa un colector de ondas con fondo cosenoidal con $\Gamma = 0.05$, en el tiempo representativo de veinte segundos se tiene una una velocidad de 6.0 m/s a una presión de 65.95 Pa, en la simulación de la parte superior de la figura se describe el movimiento del aire que desciende por el orificio $2l$ y fluye por encima de la columna de agua generando vórtices hacia las paredes de la estructura. En el instante de tiempo $t = 40$ segundos el aire fluye hacia la salida de la OWC a una velocidad y presión de 7.0 m/s y 60.65 Pa, respectivamente. Cuando $t = 60$ segundos de nuevo el aire se expande sobre el agua generando una presión de 28.52 Pa en la parte media de la estructura y una presión de 43.18 Pa en el orificio $2l$, a una velocidad de 6.0 m/s. Para $t = 80$ segundos la velocidad del aire en el interior del dispositivo es de 5.0 m/s y la presión obtenida es de 64.81 Pa. Analizando los valores obtenidos cuando se implementa el colector con fondo cosenoidal se nota un incremento en velocidad y presión en comparación a un colector con fondo constante.

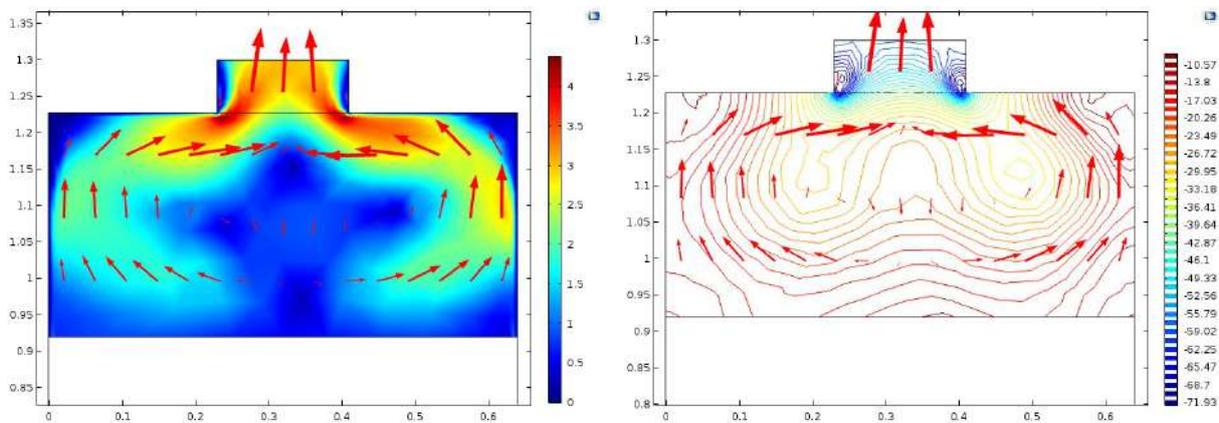
En las simulaciones mostradas en la figura 12 se muestran los campos vectoriales de velocidad y presión (para los mismos instantes de tiempo analizados anteriormente) cuando se tiene el valor máximo posible en la elevación de la superficie libre a la entrada de la OWC al fijar $\Gamma = 0.1$ y $\kappa = 0.01$ en el colector de ondas. En la figura 12 a) se presentan los campos vectoriales de velocidad y presión, en el orificio $2l$ se tiene una velocidad de 9.0 m/s con una presión de 90.97 Pa cuando han transcurrido 20 segundos. En la figura 12 b) se analiza la velocidad y presión en el instante de tiempo $t = 40$ segundos, cuando el aire fluye hacia el orificio $2l$ la velocidad es de 10.0 m/s y la presión es de 119.6 Pa. Para $t = 60$ segundos, el aire entra a la OWC a 8.0 m/s y 91.73 Pa, como se muestra en la figura 12 c). Para el tiempo $t = 80$ segundos, mostrado en figura 12 d) el aire sale del dispositivo a una velocidad y presión de 9.0 m/s y 98.26 Pa, respectivamente. Realizando una comparativa de la hidrodinámica de la OWC con el colector de ondas para los tres valores de Γ analizados se puede afirmar que mientras mayor sea el valor de este parámetro geométrico el potencial energético del dispositivo transformador de energía del oleaje se incrementa.



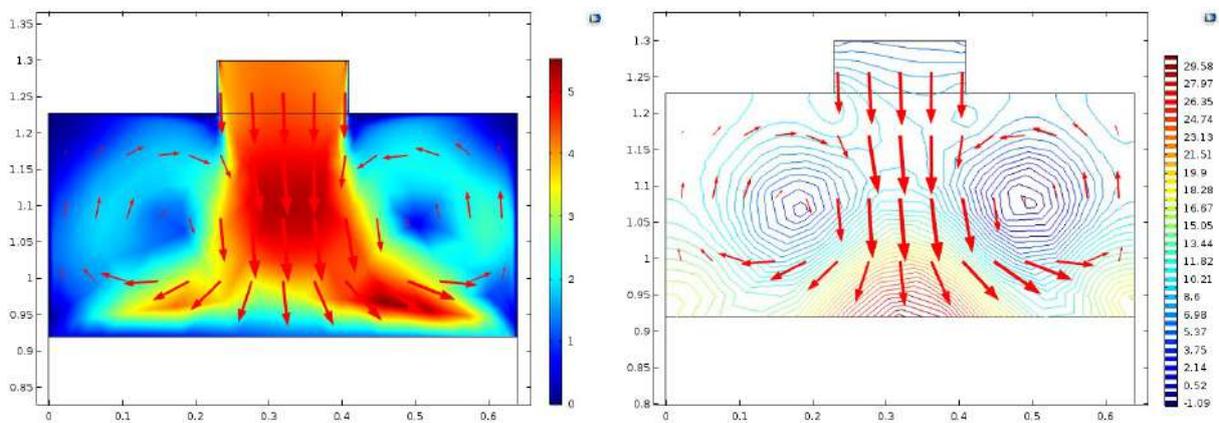
a) Campos vectoriales de velocidad y presión en $t = 20$ s



b) Campos vectoriales de velocidad y presión en $t = 40$ s

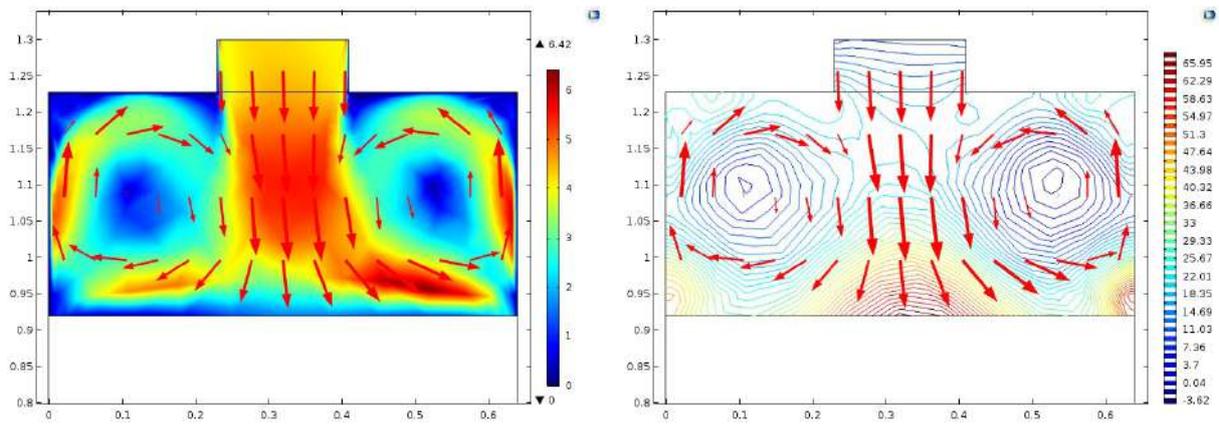


c) Campos vectoriales de velocidad y presión en $t = 60$ s

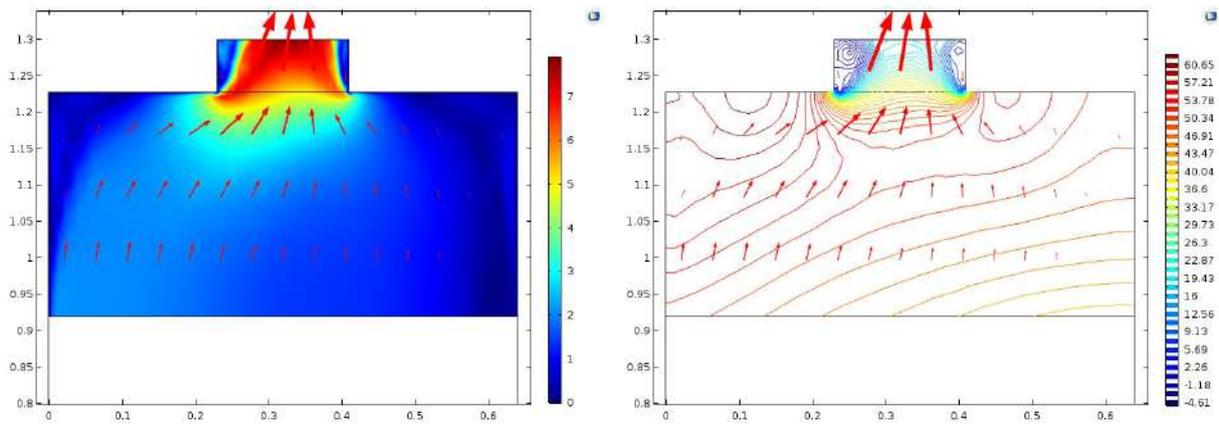


d) Campos vectoriales de velocidad y presión en $t = 80$ s

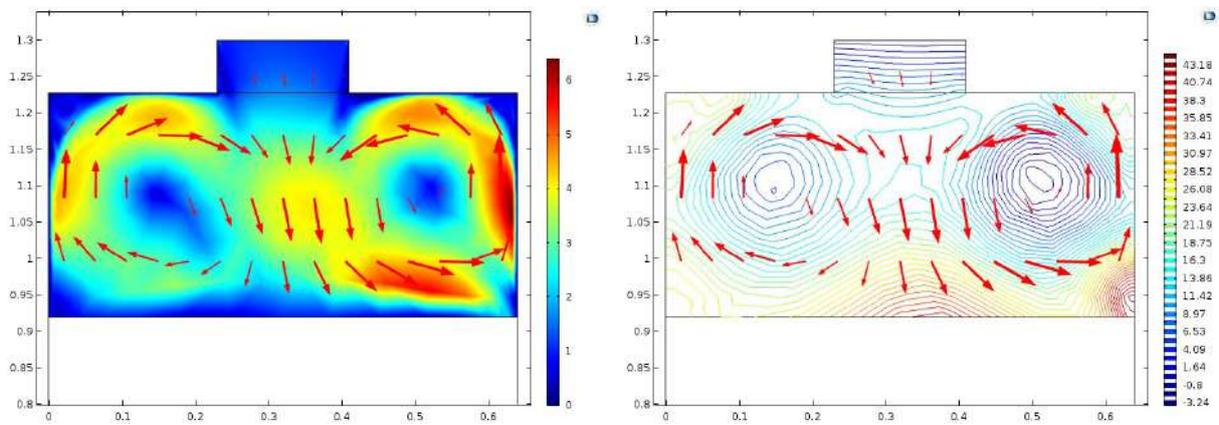
Figura 10: Campos vectoriales de velocidades y presiones en la OWC cuando $\Gamma = 0$, para los tiempos representativos $t = 20, 40, 60$ y 80 segundos.



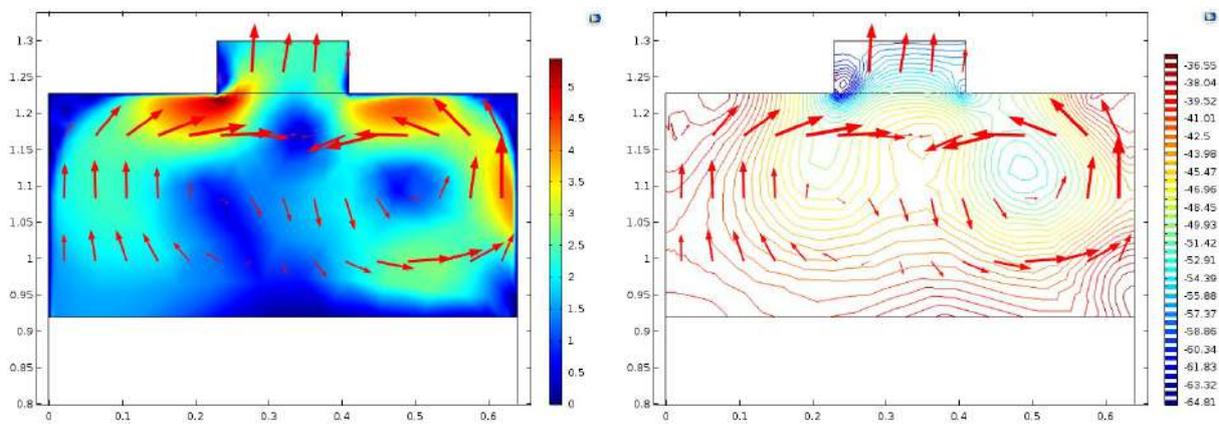
a) Campos vectoriales de velocidad y presión en $t = 20$ s



b) Campos vectoriales de velocidad y presión en $t = 40$ s

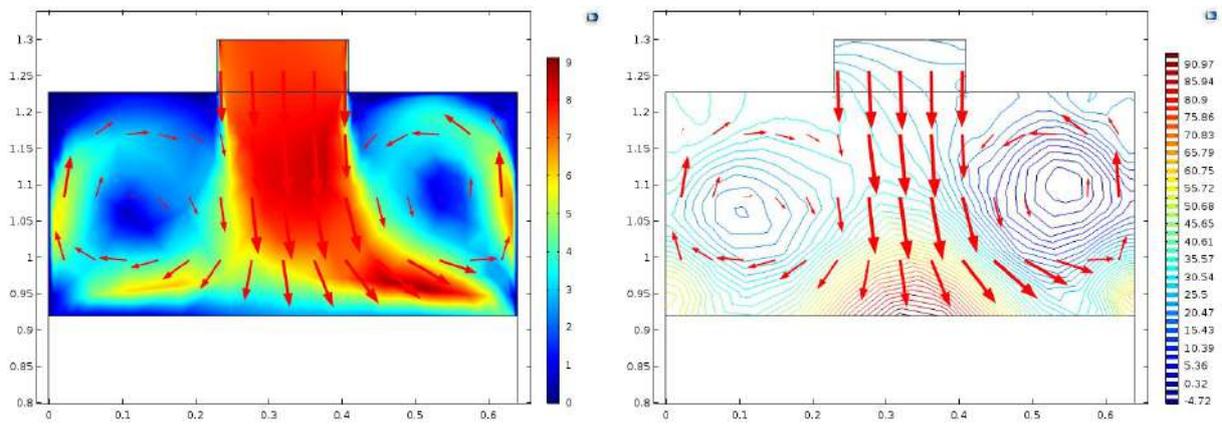


c) Campos vectoriales de velocidad y presión en $t = 60$ s

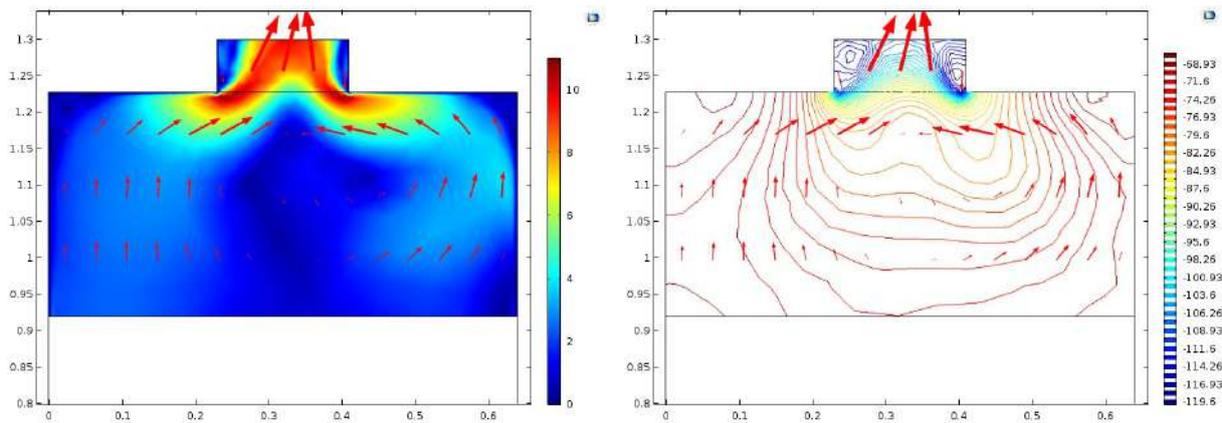


d) Campos vectoriales de velocidad y presión en $t = 80$ s

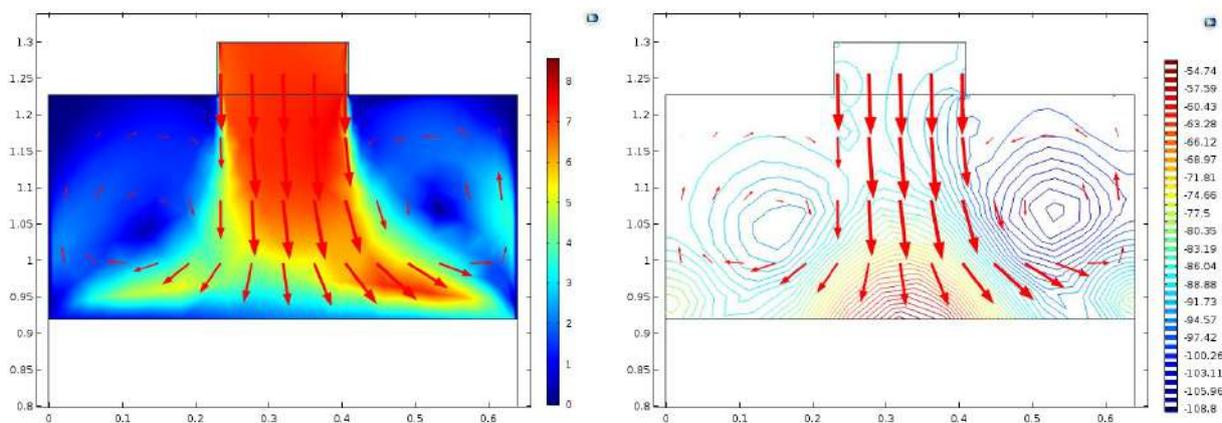
Figura 11: Campos vectoriales de velocidades y presiones en la OWC cuando $\Gamma = 0.05$, para los tiempos representativos $t = 20, 40, 60$ y 80 segundos.



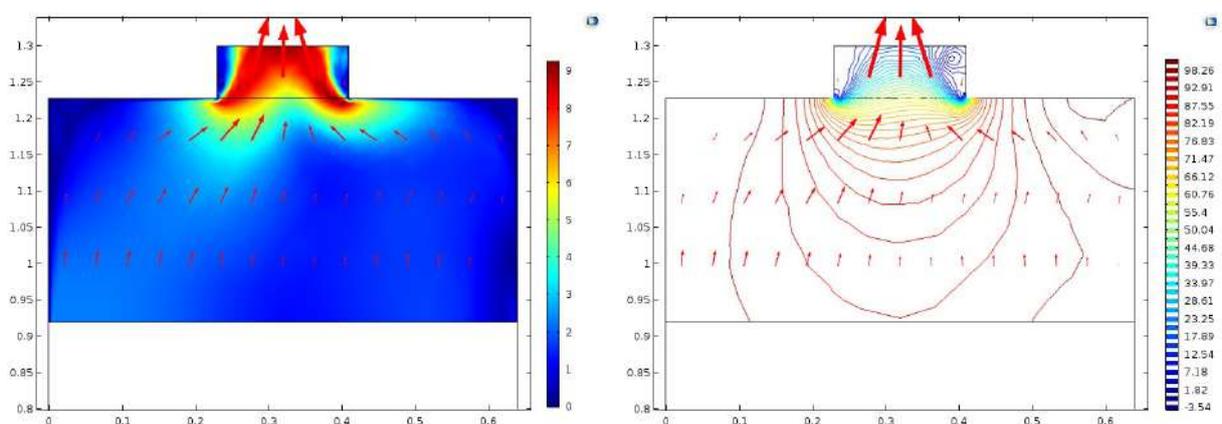
a) Campos vectoriales de velocidad y presión en $t = 20$ s



b) Campos vectoriales de velocidad y presión en $t = 40$ s



c) Campos vectoriales de velocidad y presión en $t = 60$ s



d) Campos vectoriales de velocidad y presión en $t = 80$ s

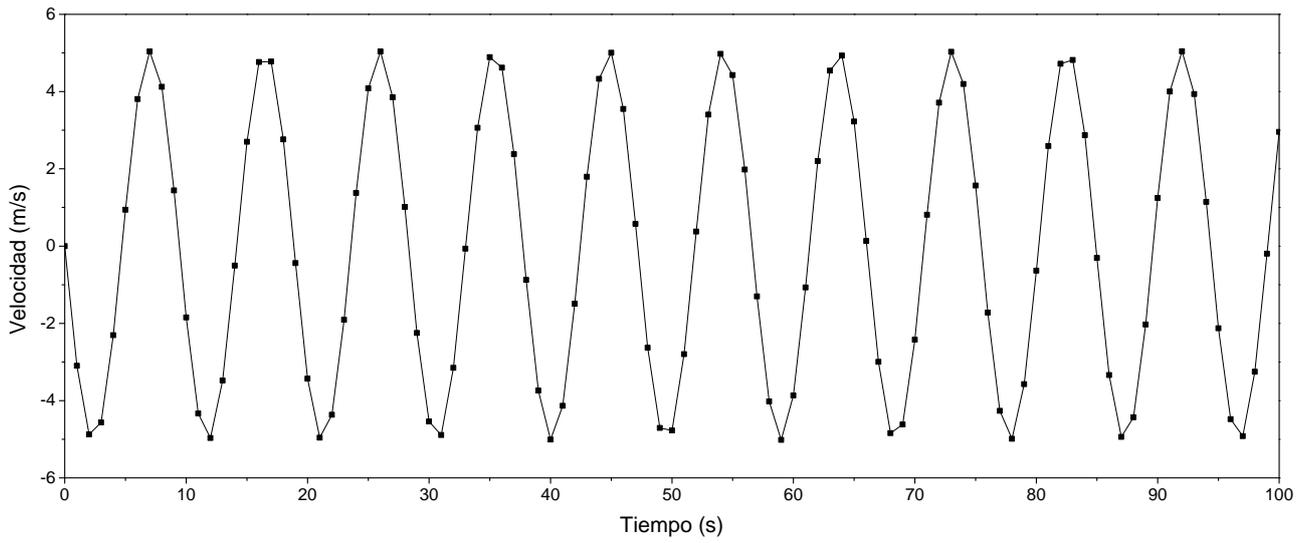
Figura 12: Campos vectoriales de velocidades y presiones en la OWC cuando $\Gamma = 0.1$, para los tiempos representativos $t = 20, 40, 60$ y 80 segundos.

En las figuras 13, 14 y 15 se analiza la velocidad respecto al tiempo en $2l$, es decir por el orificio superior de la estructura, en un estado transitorio para un intervalo de tiempo de cero a cien segundos. Para este análisis se mantienen fijos los valores de f y μ , y se varía el parámetro geométrico Γ , proponiendo tres valores obtenidos de la perturbación del oleaje debida al colector acoplado a la OWC, $\Gamma = 0, 0.05$ y 0.1 . Para obtener el valor de la velocidad a la salida de la OWC se introduce primero la condición de frontera en la Ec. (20), a la entrada de la OWC y se obtiene la velocidad promedio en la salida $2l$.

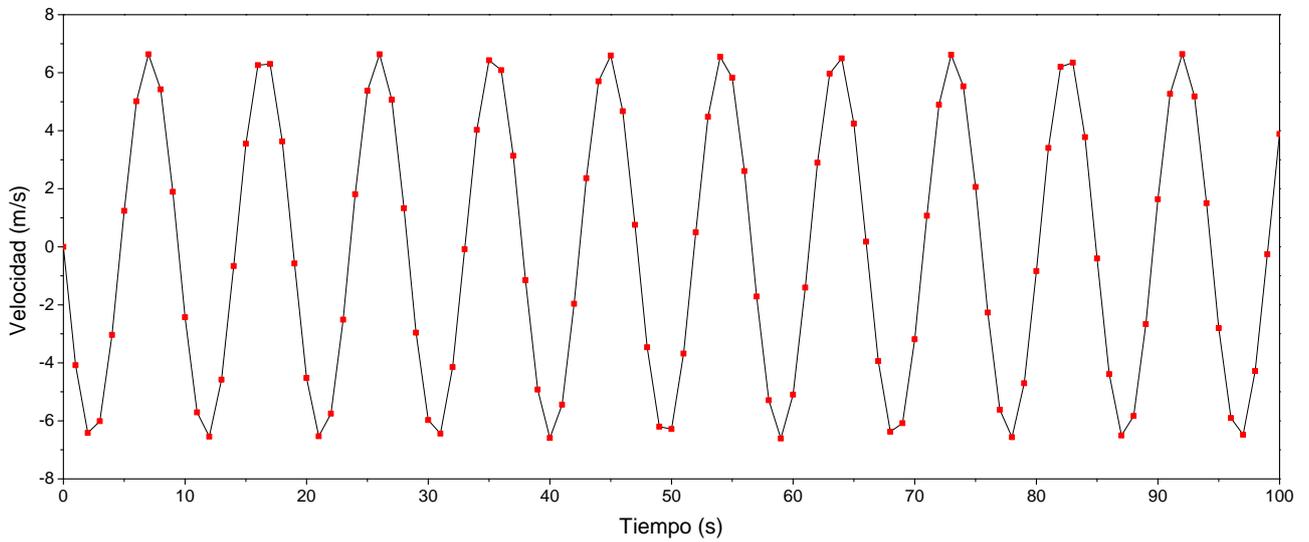
En la figura 13 a) se observa la velocidad en un intervalo de tiempo de 0 a 100 segundos cuando se acopla la OWC a un colector de ondas de fondo constante ($\Gamma = 0$), la velocidad obtenida en $2l$ es de 5.25 m/s. En la figura 13 b) se analiza la velocidad contra el tiempo cuando se acopla un colector de ondas con fondo cosenoidal con un $\Gamma = 0.05$, con el cual se obtiene un incremento en la velocidad a la salida del dispositivo, registrándose una velocidad de 7.2 m/s. En la figura 13 c) se utiliza el colector propuesto en este trabajo, en el que $\Gamma = 0.1$, la velocidad incrementa a 8.42 m/s. Se puede observar que cuando $\Gamma = 0.05$ la velocidad se duplica y cuando $\Gamma = 0.1$ esta se triplica, en comparación a un colector con $\Gamma = 0$.

En la figura 14 se analizan las gráficas de las presiones obtenidas a la salida del dispositivo OWC, se considera un intervalo de tiempo de 0 a 100 segundos, en el cual la presión aumenta 2.6 veces más en este colector respecto a uno convencional, se presentan valores de presión de 32.4 Pa, 54.8 Pa y 88.7 Pa cuando Γ se fija a 0, 0.05 y a 0.1, respectivamente. Implementando el colector de ondas con fondo cosenoidal propuesto se tiene un notable incremento en la presión obtenida en el dispositivo, por lo tanto se aprovecha mejor el recurso energético del oleaje.

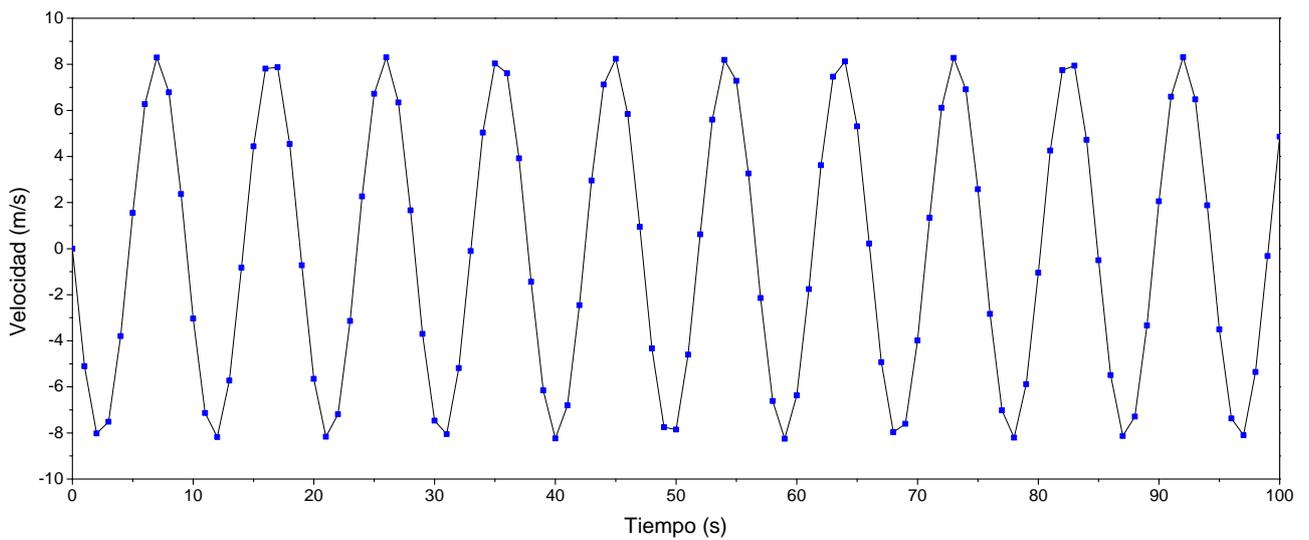
La figura 15 muestra el aumento de potencia en la OWC por efecto del parámetro Γ en el colector de ondas propuesto. La potencia obtenida en la Columna de Agua Oscilante depende directamente de la alteración del oleaje en el colector, mientras más alto sea el oleaje incidente mayor será la potencia útil. En la gráfica se muestran tres diferentes valores de Γ , cuando $\Gamma = 0$ se tiene una potencia de 11.5 W, cuando $\Gamma = 0.05$ la potencia entregada en la OWC es de 20.2 W y con el colector propuesto en este trabajo, cuando $\Gamma = 0.1$ se tiene un incremento en la potencia de 32.6 W. Con los datos obtenidos es posible afirmar que se tiene un aumento de potencia del 283.47 por ciento en comparación con un colector de ondas con fondo horizontal.



a) Velocidad contra tiempo, cuando $\Gamma = 0$

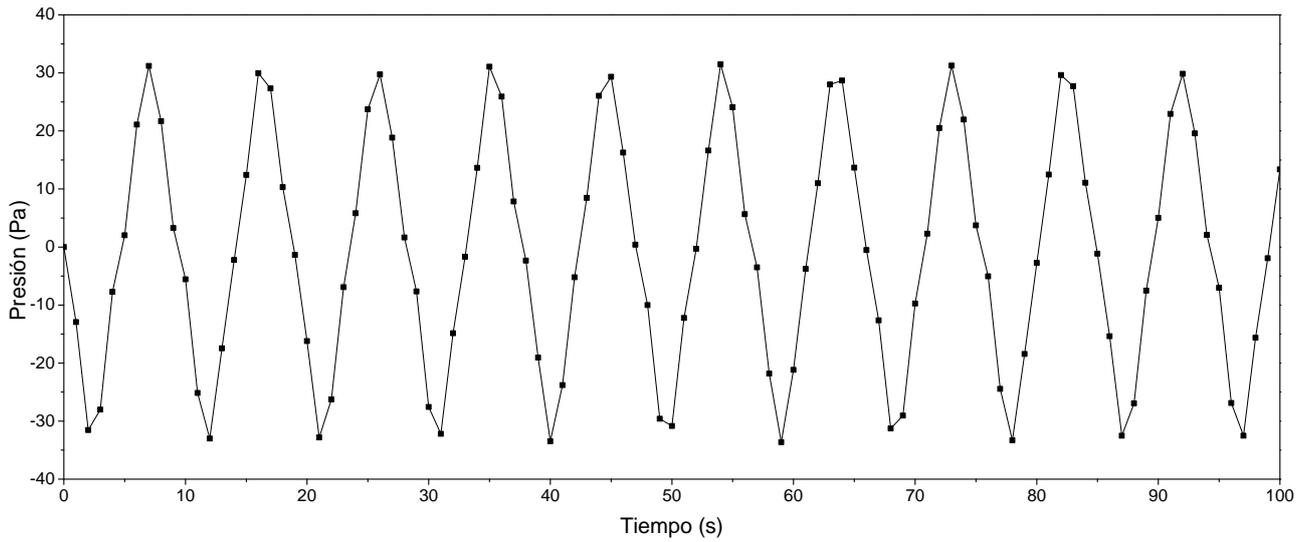


b) Velocidad contra tiempo, cuando $\Gamma = 0.05$

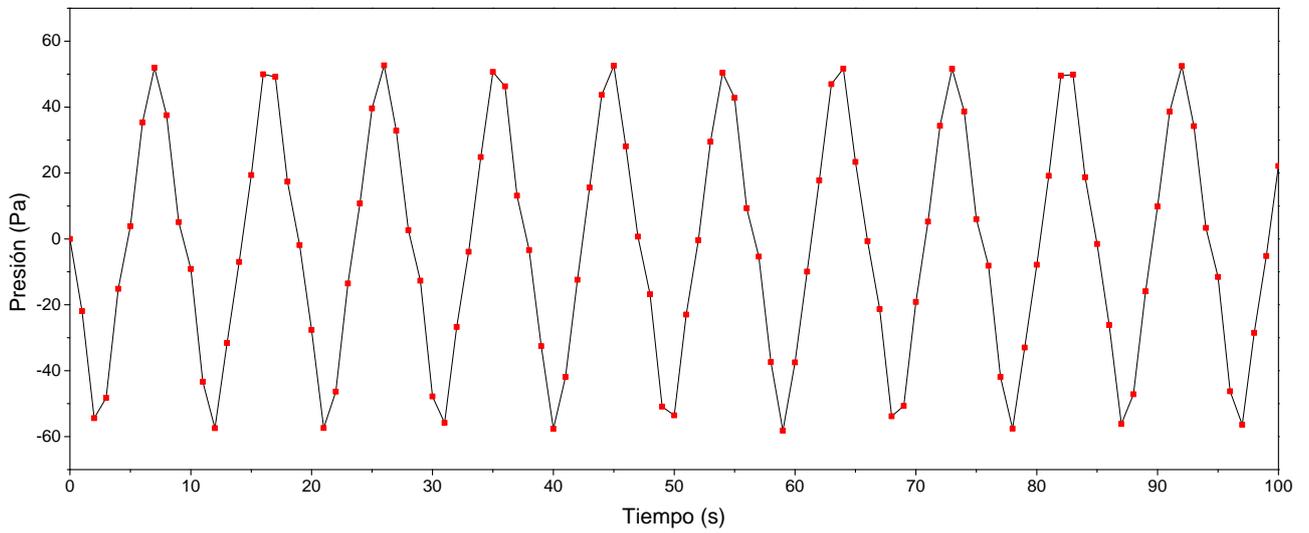


c) Velocidad contra tiempo, cuando $\Gamma = 0.1$

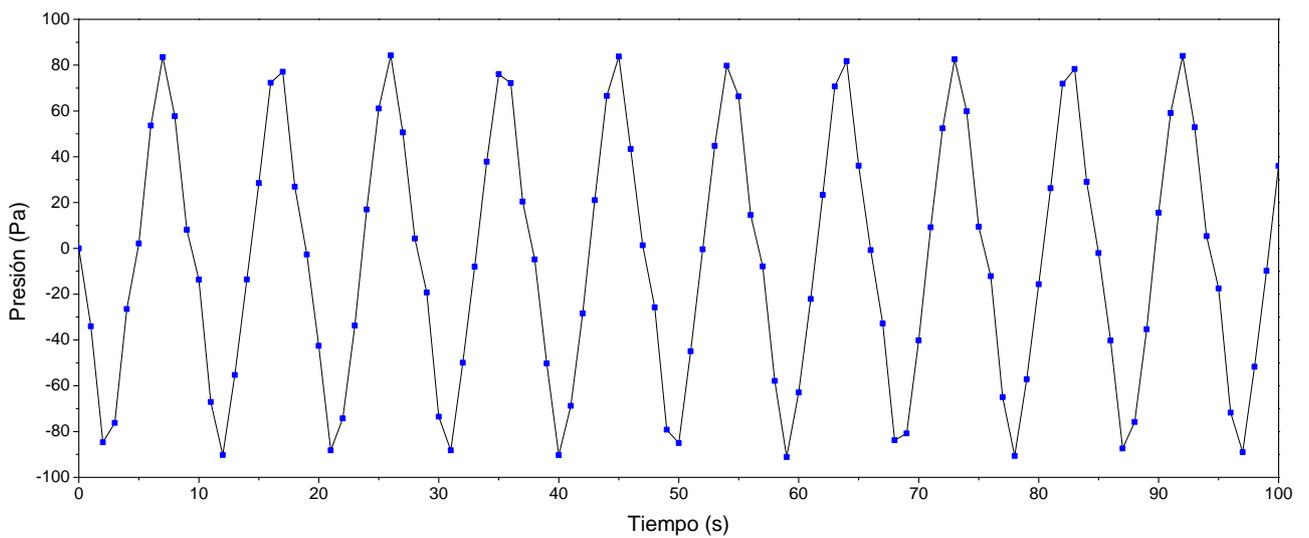
Figura 13: Velocidad de descarga del aire en la Columna de Agua Oscilante en un intervalo de tiempo de 0 a 100 segundos para valores de $\Gamma = 0, 0.05$ y 0.1 , respectivamente.



a) Presión contra tiempo, cuando $\Gamma = 0$

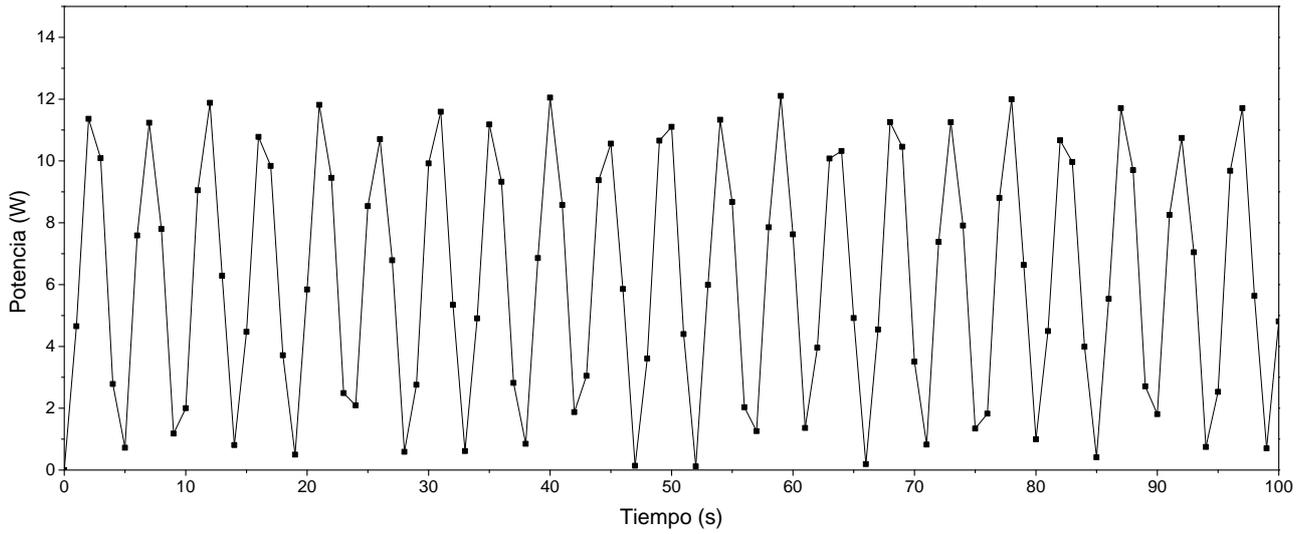


b) Presión contra tiempo, cuando $\Gamma = 0.05$

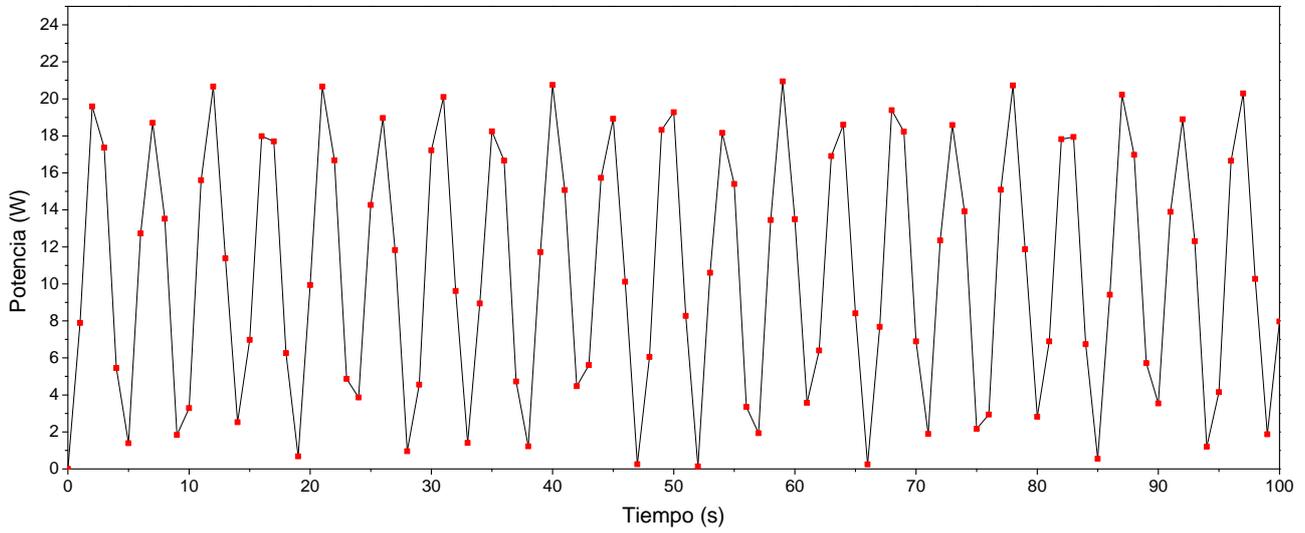


c) Presión contra tiempo, cuando $\Gamma = 0.1$

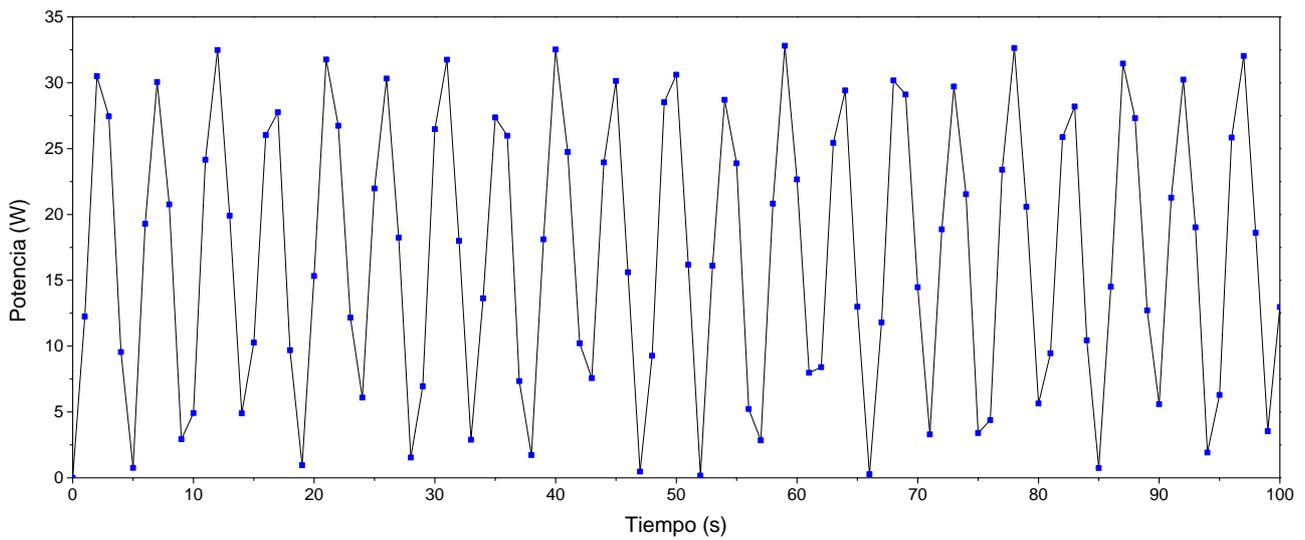
Figura 14: Presión de descarga del aire en la Columna de Agua Oscilante en un intervalo de tiempo de 0 a 100 segundos para valores de $\Gamma = 0, 0.05$ y 0.1 , respectivamente.



a) Potencia contra tiempo, cuando $\Gamma = 0$



b) Potencia contra tiempo, cuando $\Gamma = 0.05$



c) Potencia contra tiempo, cuando $\Gamma = 0.1$

Figura 15: Potencia de la Columna de Agua Oscilante en un intervalo de tiempo de 0 a 100 segundos para valores de $\Gamma = 0, 0.05$ y 0.1 , respectivamente.

CAPÍTULO 6

6. CONCLUSIONES

En este trabajo se realizó un estudio numérico de una Columna de Agua Oscilante acoplada a un canal con fondo cosenoidal. Se aplicó la teoría de ondas largas a las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento en su forma adimensional para obtener el modelo matemático que describe la propagación del oleaje bajo la influencia del fondo propuesto. Se verificó que una Columna de Agua Oscilante conectada a un colector de ondas con topografía ondulada desarrolla valores de potencia más grandes que los de una OWC con un colector de ondas fondo uniforme.

A continuación se resumen las conclusiones del presente trabajo:

- Realizar un modelo matemático adimensional presenta enormes ventajas frente a uno con variables físicas, ya que es posible adecuarlo con relativa facilidad a diferentes situaciones requeridas asegurando que el comportamiento físico sea muy similar.
- Para valores $0.01 < \Gamma < 0.1$ se tiene un incremento en δ , de tal manera que mientras Γ aumenta también se tiene un incremento en la elevación de la superficie libre, o en la amplitud del oleaje, con lo que se tiene un aumento de potencia, por esto se puede afirmar que el valor óptimo para este parámetro es el de 0.1.
- El efecto del parámetro κ en la alteración de la amplitud del oleaje presenta una relación inversamente proporcional entre el aumento de este parámetro con el aumento en la amplitud del oleaje, ya que a medida que aumenta κ la amplitud de onda incidente disminuye, se analizaron cinco valores de este parámetro dinámico en los cuales se muestra el mismo comportamiento. Se puede determinar que para obtener la mayor cantidad de potencial energético en el oleaje es mejor utilizar valores pequeños de κ , esto debido a que un canal largo presenta una menor reflexión de ondas. También se puede notar que este parámetro tiene un efecto en la frecuencia del oleaje, ya que a medida que sus valores aumentan, la frecuencia disminuye.
- El colector de ondas con fondo cosenoidal tiene un efecto en la hidrodinámica de la OWC, modificando tanto la velocidad como la presión dentro de la cámara de aire, lo que representa un incremento en la potencia útil. Por ejemplo un colector convencional 11.5 W y 32.6 W para el colector con topografía ondular propuesto.
- Para el modelo numérico realizado en este trabajo se tomaron en cuenta valores físicos de una OWC a pequeña escala, desarrollándose incrementos en velocidad, presión y potencia con el colector de ondas ondular acoplado. Si se implementara el colector propuesto a dispositivos OWC reales los incrementos de las magnitudes mencionadas serían mucho mayores, por lo que el modelo matemático presentado para el colector de ondas es una importante aportación al área de investigación y desarrollo de este tipo de dispositivos enfocados al aprovechamiento de energía. La energía de las olas es una energía limpia prácticamente inagotable y con los resultados positivos del trabajo presentado se puede afirmar que es una opción viable para la producción del recurso energético aún si la zona donde se pretenda instalar la estructura no presenta condiciones de oleaje favorables.

7. REFERENCIAS

- [1] Mueller, M.A., Polinder, H, Baker, N. (2007), *Current and Novel Electrical Generator Technology for Wave Energy Converters*. Drivers Conference. IEMDC, IEEE International.
- [2] Carcas S. M. (2010), *Harvesting Ocean Power: an International Perspective*. Pathways to Energy Security, ASME.
- [3] Brooke, J. (2003), *Wave Energy Conversion*. Ocean Engineering Book. Series 6, Amsterdam, Netherlands., pages 28-32.
- [4] Goldemberg, J. (2006), *The Promise of Clean Energy*. Elsevier, Energy Policy., pages 85-90.
- [5] Flannery, T. (2005), *The Weather Makers*. Edit Text, Melbourne, Australia.
- [6] WRI EarthTrends: <http://earthtrends.wri.org/text/coastal-marine/variable-61.html>
- [7] Acuaret, Delivering knowledge and understanding: <http://www.aquaret.com/comcontentview/21>
- [8] Andersen T. L., Frigard P. (2012), *Lecture Notes for the Course in Water Wave Mechanics*. Department of Civil Engineering, Aalborg University.
- [9] Goda Y. (2000), *Random Seas and Design of Maritime Structures*. World Scientific.
- [10] Rodríguez L. (2008), *Power Conversion Systems for Electrical Energy Production*. Department of Electrical Engineering Nova University, Lisbon.
- [11] Drew B., Plummer A. R., Sahinkaya M.N. (2009), *A Review of Wave Energy Converter Technology*. Department of Mechanical Engineering, University of Bath, UK.
- [12] Waters R. (2008), *Energy from Ocean Waves. Full Scale Experimental Verification of a Wave Energy Converter*. PhD thesis, Uppsala University, Division of Electricity.
- [13] Lindroth S. (2011), *Buoy and Generator Interaction with Ocean Waves*. PhD Thesis from Faculty of Science and Technology, Uppsala University.
- [14] Gomes R.P.F, Henriques J.C.C, Gato L.M.C, Falcão A.F.O. (2012), *Hydrodynamic Optimization of an Axisymmetric Floating Oscillating Water Column for Wave Energy Conversion*. Renewable Energy 44.
- [15] Arqam I., Kashif S.A.R., Saqib M.A., Asad M. M. (2014), *Wave Electrical Energy Systems: Implementation, Challenges and Environmental Issues, Renewable and Sustainable Energy Reviews*.
- [16] Lejerskog E., Bostrom C., Hai L., Waters R., Leijon M. (2015), *Experimental Results on Power Absorption from a Wave Energy Converter at the Lysekil Wave Energy Research Site*. Renewable Energy 77.
- [17] P. Fernández Díez (2011), *Técnicas que Aprovechan la Energía de las Olas*. Word Energy Statistics and Balances., pages 16-23.
- [18] Y. Masuda and M. E. McCormick. (1987), *Experiences in Neumatic Wave Energy Conversion in Japan. In Utilization of Ocean Waves-Wave to Energy Conversion*. pages 1-13., ASCE.

- [19] Lamb, H. (1975), *Hydrodynamics*. Cambridge University Press, New York.
- [20] Stoker, J. (1957), *Water Waves the Mathematical Theory with Applications*. Interscience, New York.
- [21] Wehausen, J. Laitone, E. (1960), *Surface Waves*. Vol. IX of Encyclopedia of Physics, Springer-Verlag, San Diego.
- [22] M. McCormick (2007), *Ocean Wave Energy Conversion*. Dover Publications, United States.
- [23] Evans, D. (1982), *Wave-Power Absorption by Systems of Oscillating Surface Pressure Distribution*. Journal of Fluid Mechanics, pages 481-499.
- [24] Sarmiento, A. and Falcão, A. de O. (1985), *Wave Generation by an Oscillating Surface Pressure and its Application in Wave-Energy Extraction*. Journal of Fluid Mechanics.
- [25] Evans, D. and Porter, R. (1995), *Hydrodynamic Characteristics of an Oscillating Water Column Device*. Applied Ocean Research., pages 155-164.
- [26] K. Rezanejad, J. Bhattacharjee, and C. G. Soares (2015), *Analytical and Numerical Study of Dual Chamber Oscillating Water Columns on Stepped Bottom*. Renew. Energ. 75:272-282.
- [27] S. John Ashlin, V. Sundar, S.A. Sannasiraj (2016), *Effects of Bottom Profile of an Oscillating Water Column Device on its Hydrodynamic Characteristics*. Department of Ocean Eng., Indian Institute of Technology Madras, India. Renewable Energy 96 pages 341-353.
- [28] F. Pasquale and M. C. Camporeale (2008), *A Linearized Model for Estimating the Performance of Submerged Resonant Wave Energy Converters*. Renewable Energy, 33(4)pages 631-641.
- [29] E. Medina-López, R.J. Bergillos, A. Moñino, M. Clavero (2017), *Effects of Seabed Morphology on Oscillating Water Column Wave Energy Converters*. Energy 135 pages 659-673.
- [30] U. Senturk and A. Ozdamar (2012), *Wave Energy Extraction by an Oscillating Water Column with a Gap on the Fully Submerged Front Wall*. Appl. Ocean Res. 37 pages 174-182.
- [31] Chia-Ying Chang and Frederick N. (2015), *Analytical and Experimental Investigation of Hydrodynamic Performance and Chamber Optimization of Oscillating Water Column System*. Energy 113 pages 597-614.
- [32] Mitsumasa Iino and Takeaki Miyazaki (2016), *Effect of Inclination on Oscillation Characteristics of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter*. Ocean Engineering 116 pages 226-235.
- [33] K. Rezanejad and C. Guedes Soares (2016), *Experimental and Numerical Investigation of the Hydrodynamic Performance of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter*. Renewable Energy 106 pages 1-16.
- [34] Yu-Shu Kuo and Chih-Yin Chung (2016), *Hydrodynamic Characteristics of Oscillating Water Column Caisson Breakwater*. Renewable Energy 103 pages 439-447
- [35] K. Rezanejad and J. Bhattacharjee (2013), *Stepped sea Bottom Effects on the Efficiency of Nearshore Oscillating Water Column Device*. Ocean Engineering 70 pages 25-38.

- [36] G. Malara and F. Arena (2013), *Analytical Modelling of an U-Oscillating Water Column and Performance in Random Waves*. *Renew. Energ.*, pages 116-126.
- [37] E. G. Bautista, J. M. Reyes, O. Bautista, and J. C. Arcos (2013), *Deformation of Water Waves by Geometric Transitions With Power Law Function Distribution*. *WASET*,7 pages 1416-1423.
- [38] A. Mora, E. Bautista, F. Méndez (2017), *Influence of a Tapered and Slender Wave Collector on the Increment of the Efficiency of an Oscillating Water Column Wave-Energy Converter.*, pages 20-36.
- [39] Ib A. Svendsen (2006), *Introduction to Nearshore Hydrodynamics*. Word Scientific, Advanced Series on Ocean Engineering Vol. 2, pages 72-199.
- [40] Robert G. Dean, Robert A. Dalrymple (2000), *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. Word Scientific ced Series on Ocean Engineering Vol. 2, pages 26-31.
- [41] N. Kuznetsov, V. Mazya and B. Vainberg (2004), *Linear Water Waves, A Mathematical Approach*. Ed. Cambridge University Press, pages 01-05.
- [42] João Cruz (2008), *Ocean Wave Energy, Current Status and Future Prepectives*. Ed. Springer, pages 142-155.
- [43] Chiang C. Mei (2005), *Theory and Applications of Ocean Surface Waves Part 1: Linear Aspects*. Advanced Series on Ocean Engineering Vol. 23, pages 228-302.
- [44] A. Iturrioz and R. Guanche (2005), *Validation of OpenFOAM for Oscillating Water Column Three-Dimensional Modeling*. Environmentl Hydraulics Institute of Cantabria, Universidad de Cantabria, Santander, Spain, pages 222-236.
- [45] Morris-Thomas, M., Irvin, R., Thiagarajan, K. (2007), *An Investigation into the Hydrodynamic Efficiency of an Oscillating Water Column*. *J. Offshore Mech. Arct.* 129, pages 821-834.