



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA**  
**HIDRÁULICA – INGENIERÍA DE COSTAS Y RÍOS**

Análisis de desempeño de un dispositivo para la conversión de la energía del oleaje por oscilación de columna de agua (OWC)

**TESIS**  
**QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:**  
**MAESTRO EN INGENIERÍA**

**PRESENTA:**  
**MIGUEL FERNANDO DOMÍNGUEZ SANDOVAL**

**TUTOR PRINCIPAL**  
**DR. JOSÉ LÓPEZ GONZALEZ, INSTITUTO DE INGENIERÍA**

Sisal, Hunucmá, Yucatán Enero 2018



**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: Dr. Mariño Tapia Ismael De Jesús

Secretario: Dr. Torres Freyermuth Alec

Vocal: Dr. López González José

1<sup>er.</sup> Suplente: Dr. Figueroa Espinoza Bernardo

2<sup>d o.</sup> Suplente: Dr. Appendini A. Christian M.

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros, Sisal, Yucatán, México

**TUTOR DE TESIS:**

DR. JOSÉ LÓPEZ GONZALEZ

-----  
**FIRMA**

*A lo largo del espacio hay energía.... Es una mera cuestión de tiempo hasta que los hombres tengan éxito en sus mecanismos vinculados al aprovechamiento de esa energía.*

Nikola Tesla.

## Abstract

Renewable energies have taken a very important place in the production of energy worldwide, due to the environmental problems related to the use of fossil fuels in the production of electricity. In Mexico, the use of alternative energies is a matter of national interest, which is why the development of wind and solar energy has taken on importance in recent years, however ocean energy remains an untapped alternative, even though the country has with approximately 11,200 km of coastal coastline, one of the main delays is the lack of development and investigation of devices for the use of this resource. This research shows the results from a set of experiments with a device that transforms the wave energy called OWC-MDS due to oscillation of the water column (OWC). The experiments were carried out in a wave flume at The Laboratory of Engineering and Coastal Processes of the Engineering institute of the UNAM. The main goal was to determine the performance of an energy conversion device, which transform wave energy using a completely submerged OWC. The experiments consisted in relating the device geometry with its performance under different wave conditions. Therefore, a physical model was built, with two completely submerged air chambers and different cross-sectional areas connected each other through a PVC pipe. When the wave crest set up over the chambers, different waters levels are generated, due to this, an air flow through the conduit is generated and this way we can get energy with a generator located inside the pipe. Several wave scenarios were carried out to determine the maximum potential of the OWC. These scenarios were recorded by pressure sensors and ultrasonic level sensors, they were installed inside of the chamber to measurement air and water pressure and level water variation, respectively. From the data it was possible to determine the oscillation maxima for each of the wave conditions to which the model was subjected. The theoretical potential energy that the device is able to take advantage of for its conversion to electrical energy was also obtained. The results suggest that a device at prototype scale would be capable of generating 22 MWh/ year. However, the technical feasibility for construction requires further investigation.

## Resumen

Las energías renovables han tomado un lugar muy importante en la producción de energía a nivel mundial, esto debido a los problemas ambientales relacionados al uso de combustibles fósiles en la producción de energía eléctrica. En México el uso de energías alternas es un tema de interés nacional, por lo que el desarrollo en energía eólica y solar han tomado importancia en los últimos años, sin embargo la energía del océano sigue siendo una alternativa sin aprovechamiento, aun cuando el país cuenta con aproximadamente 11,200 km de litoral costero, uno de los principales atrasos es la falta de desarrollo e investigación de dispositivos para el aprovechamiento de este recurso. En este enfoque, este trabajo presenta los resultados de una serie de experimentos realizados en el canal de oleaje del Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros (LIPC) del Instituto de Ingeniería UNAM con el fin de conocer el desempeño del dispositivo denominado OWC-MDS para la conversión de energía del oleaje usando el método de oscilación de la columna de agua (en inglés Oscillating Water Column, OWC) que trabaja de manera sumergida. Para ello se diseñó y construyó un modelo físico que constó de 2 cámaras de aire, una oscilante y otra resonante, con diferente sección transversal conectadas entre sí a través de un conducto para formar de esta manera un sistema cerrado. El funcionamiento del dispositivo depende directamente del gradiente de presión inducido por la propagación del oleaje. La diferencia de la geometría entre las dos cámaras genera un efecto de amplificación o resonancia. Se utilizaron sensores de presión instalados dentro de las cámaras para medir los cambios de presión del aire dentro del sistema, al igual que sensores ultrasónicos de nivel para medir las variaciones de la oscilación del agua. A partir de los datos se pudo determinar los máximos de oscilación para cada una de las condiciones de oleaje a la que fue sometido el modelo. También se obtuvo la energía potencial teórica que el dispositivo es capaz de aprovechar para su conversión a energía eléctrica. Los resultados sugieren que un dispositivo a escala prototipo sería capaz de generar 22 MWh/año. Sin embargo, la viabilidad técnica para la construcción requiere mayor investigación.

# Índice

<b>Abstract</b> .....	i
<b>Resumen</b> .....	ii
<b>Índice</b> .....	iii
<b>Índice de Figuras</b> .....	v
<b>Índice de Tablas</b> .....	ix
<b>Índice de ecuaciones</b> .....	x
<b>1 Introducción</b> .....	1
<b>2 Planteamiento del problema y objetivos</b> .....	2
2.1    Objetivo general.....	2
2.2    Objetivos específicos.....	2
<b>3 Estado del arte</b> .....	3
3.1    Producción actual de energía.....	3
3.1.1    Desarrollo nacional en Energía oceánica. ....	8
3.2    Antecedentes de la extracción de energía marina.....	10
3.3    Clasificación de las fuentes de energía del océano .....	12
3.3.1    Conversión de energía del oleaje.....	14
3.4    Clasificación de los dispositivos de conversión de energía de oleaje (Wave Energy Converters, WECs).....	14
3.4.1    Localización .....	15
3.4.2    Tipos de dispositivos .....	15
3.5    Potencial energético del oleaje.....	18
3.5.1    Potencial Energético.....	18
3.5.2    Zonas de aprovechamiento.....	20
3.5.3    Oleaje como recurso potencial de extracción de energía.....	21
3.5.4    Consideraciones ambientales. ....	21
3.6    Marco teórico.....	24
3.6.1    Teoría lineal del oleaje .....	24
3.6.2    Ecuaciones de gobierno y condiciones de contorno.....	24
3.6.3    Cambio de presiones bajo condiciones de oleaje .....	26

3.6.4	Campo de velocidades .....	26
3.6.5	Variación del campo de presiones bajo una onda progresiva. ....	27
3.6.6	Energía cinética y potencial del oleaje .....	28
3.7	Teoría de absorción sumergida usando la oscilación de la columna de agua (OWC).....	30
3.7.1	Principio de oscilación del dispositivo SPA-OWC. ....	30
3.8	Ecuaciones del Dispositivo OWC-MDS .....	31
3.9	Calculo de energía potencial extraíble del sistema OWC_MDS.....	34
<b>4</b>	<b>Metodología</b> .....	<b>38</b>
4.1	Dimensionamiento del dispositivo.....	38
4.2	Construcción del modelo físico .....	42
4.3	Modelado físico.....	44
<b>5</b>	<b>Resultados y Discusiones</b> .....	<b>53</b>
5.1	Experimentación en el canal de oleaje .....	53
5.2	Resultados del modelado físico.....	56
5.2.1	Datos de Presión .....	56
5.2.2	Variación de nivel de agua .....	59
5.3	Máximos de oscilación .....	60
5.4	Dinámica y energía de la columna de agua en las cámaras de oscilación .....	63
5.4.1	Experimento T2-H20 .....	63
5.4.2	Experimento T3-H20 .....	64
5.4.3	Experimento T1.5-H15 .....	66
5.5	Energía del flujo de aire .....	69
5.5.1	Experimento T2-H20 .....	70
5.5.2	Experimento T1.5-H15 .....	71
5.5.3	Experimento T3-H20 .....	72
<b>6</b>	<b>Conclusiones</b> .....	<b>75</b>
6.1	Consideraciones del modelo físico.....	77
6.2	Futuros trabajos y líneas de investigación .....	78
<b>7</b>	<b>Anexos</b> .....	<b>79</b>
7.1	Calculo del periodo natural de oscilación del dispositivo OWC-MDS.....	79
<b>8</b>	<b>Referencias bibliográficas</b> .....	<b>82</b>

## Índice de Figuras

Figura 3.1.1. Promedio de concentración de CO <sub>2</sub> en la superficie de la atmosfera (ppm) del periodo de 1980-2015. (Quéré et al. 2015).....	3
Figura 3.1.2 Distribución global del consumo de energía en el año 2014. Fuente REN21..	5
Figura 3.1.3. Producción de energía renovable global. Mundial, EU-28, BIRCS y el top 7 de los países con mayor producción, para finales del año 2015. Fuente REN21 .....	6
Figura 3.1.4. Capacidad de producción de energía Geotermal, lista de 10 países y resto del mundo, para finales del 2015, Ren21.....	7
Figura 3.1.5. Generación de energía renovable en México, para el año 2016.Fuente SENER.....	7
Figura 3.1.6 Crecimiento en generación en energía limpia en México para el 2015.(SENER, 2016b).....	8
Figura 3.4.1. Tipos de dispositivos con relación a su modo de absorción de energía del oleaje. ....	17
Figura 3.4.2.clasificación de los diferentes tipos de dispositivos de absorción de energía del oleaje basados en su funcionamiento.(Falcão 2010).....	17
Figura 3.5.1. Distribución global de la energía potencial para un promedio anual.(Cornett 2008).....	19
Figura 3.5.2. Distribución del potencial de energía por oleaje en el Mar Caribe y el Golfo de México (KW/m) (Appendini et al. 2015).....	19
Figura 3.5.3 Distribución de la energía del oleaje en las costas de todo el mundo, potencial energético expresado en KW/m de cresta de ola. (Polinder & Scuotto 2005) ....	20
Figura 3.7.1. Esquema del prototipo de SPA-OWC de Song y Park .....	30
Figura 3.8.1. Diagrama de funcionamiento del dispositivo OWC-MDS.....	32
Figura 3.8.2 Diagrama de cuerpo libre del sistema propuesto. ....	33
Figura 3.9.1. Eficiencia reportada para turbinas de flujo bidireccional, conformados por perfiles Naca. Obtenidas de (Cui & Hyun 2016; Halder & Samad 2016). ....	37
Figura 4.1.1 Esquema del dispositivo OWC-MDS propuesto. ....	39
Figura 4.1.2 Esquema del diseño propuesto del dispositivo para la experimentación física. ....	41

Figura 4.2.1. Construcción del modelo físico, en la derecha se observa la preparación de la cámara de oscilación (corte con sierra de mesa) y en la izquierda la cámara de resonancia siendo pegada para lograr la hermeticidad. ....	43
Figura 4.2.2. . Configuración final del dispositivo OWC-MDS. El cual consta de 2 cámaras de aire y un conducto por el cual pasara el flujo de aire.....	44
Figura 4.3.1. Esquema de la distribución del canal de oleaje del LPC.....	45
Figura 4.3.2 Colocación del modelo en el canal de olas, la sujeción del mismo es por medio de tubos de aluminio los cuales tan sujetos en los bordes del canal con prensas tipo "c" .....	46
Figura 4.3.3 Graduación de la regla para la medición de la oscilación de la columna de agua. Sensor ultrasónico utilizado para medir la variación en la columna de agua .....	47
Figura 4.3.4. Distribución de los sensores utilizados en el modelo para la experimentación en el canal de olas. ....	48
Figura 4.3.5. Sensor de presión S30X Keller®, utilizado para la experimentación, se puede observar la membrana dentro del conducto del sensor, debido a eso es posible que se genere la burbuja de aire al estar sumergido. ....	49
Figura 4.3.6. Sistema Arduino utilizado para la captura de datos de nivel (derecha). Vista interior de la cámara de resonancia donde se puede observar la ubicación del sensor ultrasónico y los sensores de presión. ....	49
Figura 4.3.7. Colocación de sensores de resistividad eléctrica para la obtención de datos de superficie libre. ....	50
Figura 4.3.8. Configuración final del modelo físico, se observa la instalación de los sensores de presión y ultrasónicos. ....	51
Figura 4.3.9. Diagrama de colocación del modelo en el canal de oleaje. ....	52
Figura 5.1.1. Datos crudos obtenidos por el sensor de nivel ultrasónico. Se observa en las regiones marcadas con los círculos rojos los picos de elevación derivados de la turbulencia en la superficie del agua dentro de las cámaras. ....	54
Figura 5.1.2. Serie de datos medidos comparados con los datos de ajuste, después de haber realizado la limpieza y la reducción de picos de sobre elevación. ....	55
Figura 5.2.1 Experimento desarrollado en el canal de olas. Se observa el comportamiento del dispositivo OWC-MDS.....	56

Figura 5.2.2 Variación de las presiones del dispositivo medida con los sensores Keller durante el llenado del canal de oleaje.....	57
Figura 5.2.3. Datos de presión para la prueba correspondiente a 2 segundos de periodo y 15 centímetros de altura de ola.....	58
<i>Figura 5.2.4 Datos de presión experimento con periodo de 1 segundo y altura de 10 cm.</i>	59
Figura 5.2.5 Datos y ajuste realizado a la señal de variación del nivel de agua, experimento (t=1, H=10). .....	60
Figura 5.3.1 Variación máxima de oscilación en cada uno de los ensayos.....	61
Figura 5.3.2. Panel a) Relación de máximos de oscilación, periodo y altura de ola (cámara de resonancia). Panel b) Relación de máximos de oscilación, periodo y altura de ola (cámara de oscilación). .....	62
Figura 5.4.1 Resultados del experimento Hs=20, T= 2 s, para la cámara de oscilación....	64
Figura 5.4.2. Resultados de la oscilación de agua para el experimento Hs=20 cm y T=2 s. ....	64
Figura 5.4.3 Resultados para la cámara de oscilación registrados y calculados durante el experimento Hs=20 y T=3s.....	65
<i>Figura 5.4.4. Resultados para la cámara de resonancia para el experimento correspondiente a Hs=20cm y T=3s. ....</i>	65
Figura 5.4.5 Resultados registrados y calculados del experimento correspondiente a Hs=15 y T=1.5s, para la cámara de oscilación. ....	66
Figura 5.4.6. Resultados del experimento correspondiente a Hs=15 y T= 1.5s, registrados en la cámara de resonancia. ....	67
Figura 5.4.7 Concentrado de la energía potencial teórica calculada a partir de los registros de oscilación de agua. ....	68
Figura 5.5.1 a) Gráficos de la presión para las pruebas con mayor variación, elaborados a partir de los datos obtenidos a través de los sensores Keller durante los experimentos de laboratorio, b)Potencia obtenida de los datos de laboratorio.....	70
Figura 5.5.2.-a) Gráfica de presiones para prueba T3-H15, b) Gráfica de Potencial teórico extraíble del flujo de aire. ....	71
Figura 5.5.3.- a) Gráfica de presiones (Pa), b) Gráfica de Potencial teórico extraíble (watt), para experimento T3-H20 .....	72

Figura 5.5.4 Distribución de la energía potencial del flujo de aire generado por el dispositivo OWC-MDS.....	73
Figura 6.1.1. Esquema de la configuración del dispositivo completamente sumergido. ....	77
Figura 7.1.1 geometría del dispositivo propuesto para el cálculo del periodo de resonancia o periodo óptimo de oscilación.....	79
Figura 7.1.2. Tabla de valores para el cálculo de masa agregada ( $m_w$ ) y momento de inercia ( $I_w$ ), para cuerpos completamente sumergidos, tomado de(McCormick 2007) .....	81

## Índice de Tablas

Tabla 3.1 Variables ambientales y su afectación por la implementación de dispositivos de conversión de energía del oleaje (WECs) Tabla traducida del estudio de Bald et al. 2010. ....	23
Tabla 4.1 Cálculo de los máximos de oscilación que podría alcanzar el sistema con la geometría de la cámara de oscilación propuesta. ....	40
Tabla 4.2 Configuración de los experimentos realizados. La primera columna se representa las alturas de ola. La segunda los periodos del oleaje.....	52
Tabla 5.1.- Tabla de Nomenclatura de los sensores, para la interpretación de las gráficas de presiones.....	58
Tabla 5.2. Concentrado de los resultados de la dinámica de las oscilaciones en los experimentos.	67
Tabla 5.3 Valores de energía potencial teórica extraíble por el sistema expresada en mili Watts. ....	69
Tabla 5.4. Concentrado de la energía potencial del flujo de aire. ....	74

## Índice de ecuaciones

Ecuación 3.6.1- Ecuación de la hidrodinámica o “Ecuación de Bernoulli” .....	25
Ecuación 3.6.2- Ecuación de la hidrodinámica linealizada .....	25
Ecuación 3.6.3- Condiciones de Frontera de fondo.....	25
Ecuación 3.6.4 Condición Cinemática de superficie libre .....	25
Ecuación 3.6.5- Ecuación del Flujo potencial .....	26
Ecuación 3.6.6- Ecuación de la superficie libre del movimiento de la onda .....	26
Ecuación 3.6.7- Velocidad potencial de una onda .....	26
Ecuación 3.6.8- Velocidad potencial en u del movimiento de la onda.....	26
Ecuación 3.6.9- Componente w de la velocidad potencial de la onda.....	27
Ecuación 3.6.10- Ecuación que describe el campo de presión hidrostática.....	27
Ecuación 3.6.11- Campo de presión bajo de la onda.....	27
Ecuación 3.6.12- Ecuación que determina la presión dinámica en una onda .....	27
Ecuación 3.6.13- Descripción de la Presión dinámica .....	27
Ecuación 3.6.14- Sustitución de la presión en la ecuación del flujo potencial.....	27
Ecuación 3.6.15- Presión dinámica en función de la ecuación de dispersión .....	28
Ecuación 3.6.16- Ecuación de la presión dinámica evaluada en $z=0$ .....	28
Ecuación 3.6.17- Ecuación de la energía Potencial del oleaje .....	28
Ecuación 3.6.18- Energía cinética del oleaje.....	28
Ecuación 3.6.19- Ecuación de la suma de la energía cinética del oleaje y la energía potencial.....	29
Ecuación 3.6.20- Energía por unidad de longitud del oleaje .....	29
Ecuación 3.8.1- Ecuación de las presiones que actúan en el Dispositivo MDS-OWC .....	33
Ecuación 3.8.2- Igualdad de fuerzas y presiones para el Dispositivo MDS-OWC.....	33
Ecuación 3.8.3- Ecuación de la igualdad de las presiones y superficies en el Dispositivo MDS-OWC.....	33
Ecuación 3.8.4- Ecuación de igualdad de la presión hidrostática en ambas cámaras del Dispositivo MDS-OWC .....	34
Ecuación 3.8.5- Ecuación que describe la variación del nivel de agua en función del área propuesta para la cámara de oscilación en el Dispositivo MDS-OWC.....	34

Ecuación 3.9.1- Ecuación para determinar los cambios en el volúmen de agua dentro del Dispositivo .....	34
Ecuación 3.9.2- Ecuación que determina la velocidad del fluido desplazado en la oscilación de la columna de agua por el paso de ola incidente .....	35
Ecuación 3.9.3- Ecuación para el cálculo de la aceleración del fluido desplazado durante la oscilación en el interior de las cámaras del Dispositivo MDS-OWC .....	35
Ecuación 3.9.4- Ecuación que determina la energía cinética de la columna de agua en movimiento .....	35
Ecuación 3.9.5- Descripción de la masa del agua desplazada en la columna de agua .....	35
Ecuación 3.9.6- Ecuación que determina la energía cinética para cada paso de tiempo en el Dispositivo MDS-OWC .....	35
Ecuación 3.9.7- Energía potencial teorica de extracción .....	35
Ecuación 3.9.88- Ecuación con la que se obtiene la velocidad de aire .....	36
Ecuación 3.9.9 Velocidad del flujo de aire contenido en el Dispositivo MDS-OWC .....	36
Ecuación 3.9.10 Energía potencial aplicando coeficiente de extracción, para el calculo de la energía en el flujo de aire .....	37

## 1 Introducción

El uso de fuentes de energías renovables han despertado interés debido a los problemas económicos (costos elevados de extracción y producción de combustibles fósiles (EIA 2017)) y ambientales (gases de efecto invernadero) que emanan del uso de combustibles fósiles (Fairhurst and Niekerk 2016). Estos problemas han llevado al desarrollo de tecnologías que aprovechen fuentes renovables de energía los cuales generen un menor impacto al medio ambiente como es el caso de la energía eólica, solar , biomasa e hidroeléctrica (Sabzehgar and Moallem 2009).

Dentro del marco de las fuentes de energía renovable, existen muchos desarrollos e investigaciones de las fuentes de energía antes mencionadas ya que se han dado a conocer por la eficiencia en sus métodos de conversión, no obstante las fuentes de energía del océano han tenido un menor avance en cuanto a desarrollo y utilización a pesar del alto potencial de energía que se estima que posee (aproximadamente 92 KW/m en las costas con mayor potencial de extracción (Polinder and Scuotto 2005)). Esto se debe a que las condiciones del mar son agresivas para la instalación, operación y mantenimiento de los dispositivos instalados (Panwar, Kaushik, and Kothari 2011).

En los últimos años, el interés por utilizar las fuentes de energía del océano se ha incrementado alrededor del mundo, por lo que han surgido nuevos y variados dispositivos de conversión. Tanto que, centros de investigación alrededor del mundo han enfocado los esfuerzos al desarrollo de dispositivos para este tipo de aprovechamiento. Sin embargo, en México el desarrollo en este campo es muy escaso. Más recientemente, los esfuerzos para mejorar el aprovechamiento de este tipo de energías está rindiendo frutos y prueba de ello es la creación del Centro Mexicano de Innovación en Energías renovables del océano (CEMIE-Océano). El CEMIE-Océano está conformado por instituciones gubernamentales y privadas, con el objetivo de aprovechar la energía del océano (oleaje, corrientes por marea, y gradientes salinos).

En este contexto se enmarca el presente trabajo en el que se analizó el desempeño de un dispositivo de conversión de energía del oleaje por oscilación de la columna de agua (OWC). El método OWC, ha sido de gran interés entre los investigadores por lo que se han desarrollado diferentes modelos los cuales consisten principalmente en una cámara que contiene aire y se encuentra parcialmente sumergida que reacciona a la oscilación de la

superficie libre provocada por el oleaje generando un flujo de aire que es aprovechado mediante turbinas de flujo bidireccional.

## 2 Planteamiento del problema y objetivos

Actualmente la energía eléctrica es indispensable para realizar muchas de las actividades en nuestra sociedad. A pesar de las políticas enfocadas en reducir el consumo de energía eléctrica, la demanda energética sigue en aumento a nivel mundial. Aunado a ello, las reservas de petróleo cada vez son menores y los problemas a los que se enfrenta la explotación del recurso se encuentra en las diferentes etapas como son: la extracción, refinación y comercialización; así como el creciente problema de contaminación relacionado con la quema de combustible fósil en la transformación de energía eléctrica contribuyendo en el cambio climático. Debido a ello surge la necesidad de nuevas formas de obtención de energía para contrarrestar los problemas provocados por la generación de energía actual basada en la utilización de combustibles fósiles. El presente trabajo está enfocado en el desarrollo de un dispositivo de para la extracción de la energía contenida en el oleaje.

### 2.1 Objetivo general

Evaluar el desempeño de un dispositivo de generación de energía undimotriz, enfocado al aprovechamiento por el método OWC.

### 2.2 Objetivos específicos

Los objetivos específicos planteados en el marco del presente trabajo son los siguientes:

- Construir un modelo físico de un sistema por oscilación de columna de agua.
- Diseñar los experimentos de laboratorio con la finalidad de obtener mediciones de su funcionamiento.
- Analizar el desempeño del sistema con los datos obtenidos en la experimentación física, y determinar la factibilidad para su desarrollo a escala prototipo.

### 3 Estado del arte

#### 3.1 Producción actual de energía

En la actualidad los métodos de producción de energía, son poco aceptados por la comunidad científica dedicada al estudio del medio ambiente, ya que al utilizar combustibles fósiles o minerales se generan gases de efecto invernadero lo que a su vez está relacionada con los temas de contaminación por dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>).

La concentración de CO<sub>2</sub> desde 1795 ha aumentado aproximadamente 277 partes por millón (ppm) y para el mes de marzo de 2015 se ha reportado una concentración por encima de 400 ppm por lo que, de acuerdo a los investigadores enfocados en este tema es un problema que se refleja en el cambio climático, pues suponen que es una reacción directa a la contaminación por la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmosfera (Figura 3.1.1)(Quéré et al. 2015).

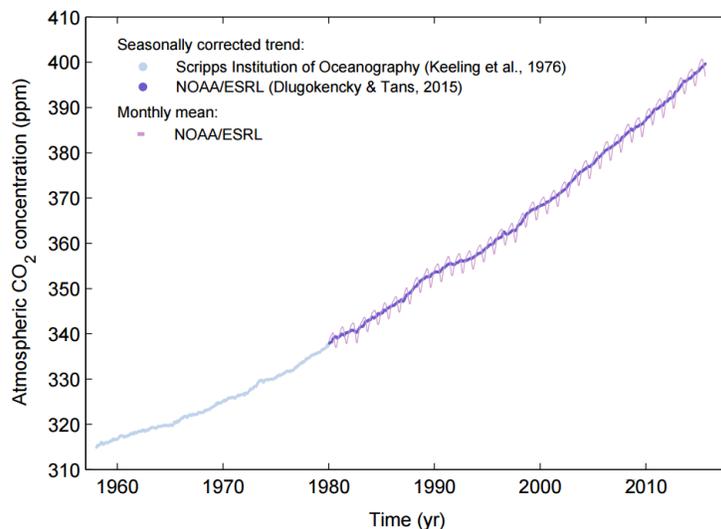


Figura 3.1.1. Promedio de concentración de CO<sub>2</sub> en la superficie de la atmosfera (ppm) del periodo de 1980-2015. (Quéré et al. 2015)

A causa de la contaminación por la producción de la energía eléctrica, y la demanda en el consumo de energía, las alarmas a una nueva crisis energética vivida en los 70's genera el resurgimiento del estudio de la viabilidad de generar energía a través de recursos renovables, los cuales sean capaces de reducir la emisión de gases contaminantes. A esta energía se le denomina energía limpia, ya que al ser obtenida por medios en los cuales no interviene la combustión, los desechos y gases contaminantes se reducen

considerablemente (Fernandes and Bakhshandeh 2015; Panwar, Kaushik, and Kothari 2011).

Las energías renovables como se conocen hoy, ya sea eólica, solar, biomasa, geotermia, y otras más, toman un papel importante para el futuro del planeta. A diferencia de los combustibles fósiles y fuentes nucleares los cuales se usan en la producción de la energía actualmente, los recursos renovables como su nombre lo indica pueden volver a regenerarse para ser utilizados una y otra vez. Por tal motivo es importante conocer que cantidad de ésta energía esta disponibles en el planeta y buscar la manera de aprovechar cada uno de los recursos del modo más apropiado, así como producir la menor afectación al entorno del cual son extraídos (Panwar, Kaushik, and Kothari 2011).

Durante el 2014 el uso de energías renovables creció a raíz del incremento del consumo global de energía, particularmente en países en desarrollo. A pesar del aumento en el uso de energía, por primera vez en cuatro décadas, la emisión de carbono a nivel mundial asociado con la producción y el consumo de energía se mantuvo estable en este año. Esta estabilización en los sistemas puede ser atribuido al aumento en la utilización de energías renovables y los avances en la eficiencia de consumo en los dispositivos eléctricos (Foley et al. 2015).

El reporte realizado por “Renewable Energy Policy Network for the 21st Century” (REN21) para el año 2016 muestra que para finales del 2015 las energías renovables aumentaron de 19.1% a 23.7% de la producción total global. El 16.6% fueron producidas por hidroeléctricas y para las energías del océano sólo un 0.4% se vieron reflejadas en la producción total, en las cuales se incluyen las energías geotermiales y la concentración de energía solar. Los combustibles fósiles siguen siendo la principal fuente para la generación de energía y este año registraron un 76.3% del total de la producción mundial, aunque para este año disminuyo un 2% de la producción total. La energía nuclear a su vez creció de un 2% a un 2.6% en la producción total ( Figura 3.1.2).

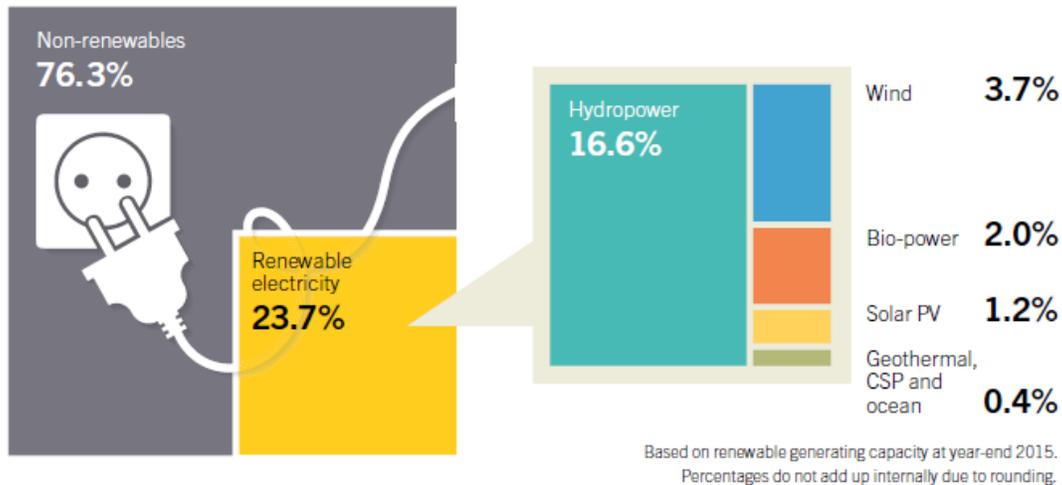


Figura 3.1.2 Distribución global del consumo de energía en el año 2014. Fuente REN21

Como se mencionó anteriormente, los datos reportados por el REN21 muestran que existe un crecimiento en el uso de energías renovables, debido a que no sólo son importantes por el hecho de reducir los gases de invernadero causantes del cambio climático, sino que también porque se están convirtiendo en opción para la creación de nuevas oportunidades de trabajo y generar una economía a partir de ello. La implementación de muchas de estas alternativas pueden llegar a proveer de energía eléctrica a millones de personas que continúan viviendo sin los servicios básicos de abastecimiento eléctrico (Kristin Seyboth et al. 2016).

Por lo anterior muchos países han optado por incrementar la generación de energía eléctrica con fuentes de energías renovables, tal es el caso de Holanda con la implementación de parques eólicos, Portugal extrayendo la energía del oleaje con el desarrollo del Pelamis, y en México con plantas hidroeléctricas de baja escala, las cuales aprovechan el caudal de los ríos que se transportan en ellos para la generación de energía eléctrica.

Como se mencionó, la energía eólica y solar han tenido un avance tecnológico importante, en comparación con las energías extraídas del océano que siguen siendo motivo de estudio y desarrollo. Al final del año 2015 la capacidad instalada global en energía de océano fue aproximadamente de 530 mega watts (MW), la cual mayormente fue extraída de las mareas, específicamente de corrientes de marea a través de estuarios y bahías (Kristin Seyboth et al. 2016).

En los últimos años se ha reportado un crecimiento en el aprovechamiento de las energías del océano, por lo que se han desarrollado gran cantidad de dispositivos para la conversión de las diferentes fuentes de energía en el océano. La producción total de energía eléctrica por energías renovables en el último año fue de aproximadamente 785 giga watts (GW-capacidad instalada), siendo la capacidad de producción de las energías del océano solamente de 530 megawatts (MW-capacidad instalada) es decir el 0.07% del total (Figura 3.1.3). Además, de la bibliografía consultada se pudo observar que aunque se tiene un importante avance en el aprovechamiento de la energía del océano, los aparatos de conversión de oleaje aún son objeto de desarrollo para mejorar los resultados eficiencia-costo (Kristin Seyboth et al. 2016).

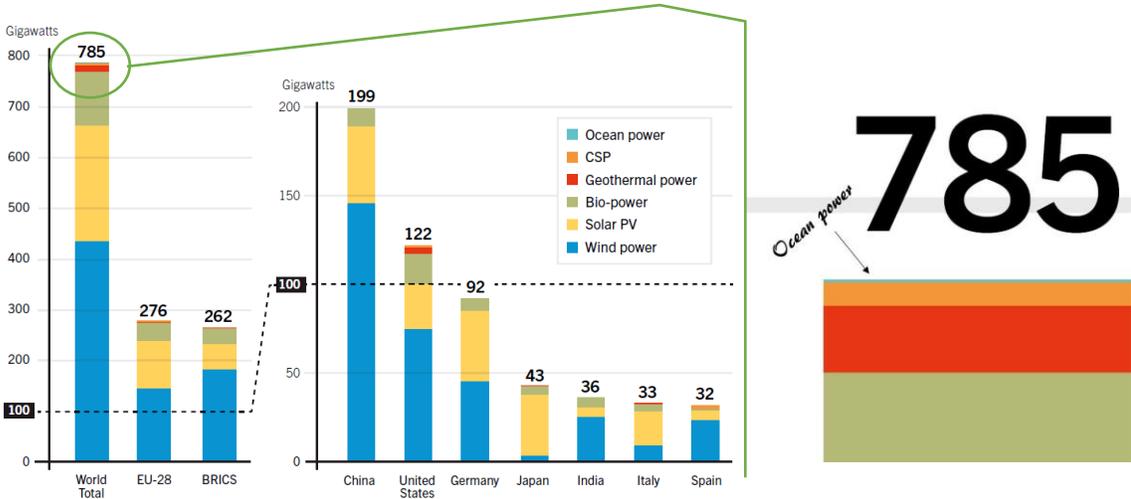


Figura 3.1.3. Producción de energía renovable global. Mundial, EU-28, BIRCS y el top 7 de los países con mayor producción, para finales del año 2015. Fuente REN21

Dentro del reporte global de energías renovables, la participación de México es principalmente en energías geotermales, las cuales en el año 2015 tuvieron un aumento en su capacidad de producción de un 17% lo cual representa 53 MW adicional, siendo el total de 1.1 GW colocándose entre los 10 países de mayor producción a nivel mundial en la generación de este tipo de energía renovable (Figura 3.1.4) (Kristin Seyboth et al. 2016).

En México el desarrollo de las energías renovables se ha enfocado en gran medida en la extracción de la energía solar y eólica por tal motivo se ha tenido un gran avance. Sin embargo, el aprovechamiento y estudio de las energías del océano no refleja la misma proporción de avance a pesar de que más del 56% de los estados de la república cuenta

con litoral costero (SEMARNAT) , además de contar con un potencial energético en el caribe y golfo de México de aproximadamente 8 kW/m que podría ser utilizado como fuente de extracción de energía para la conversión a energía eléctrica (Appendini et al. 2015).

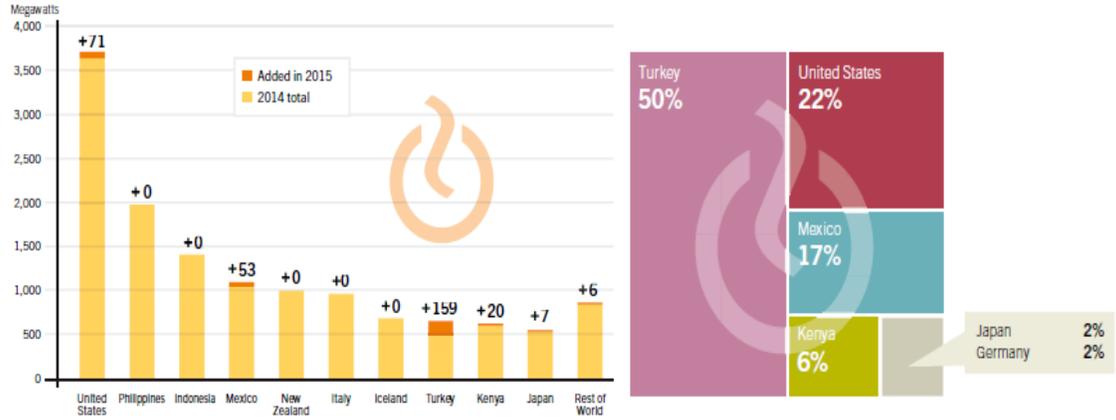


Figura 3.1.4. Capacidad de producción de energía Geotermal, lista de 10 países y resto del mundo, para finales del 2015, Ren21.

La secretaria de energía (SENER) ha fijado como meta una participación de energías limpias en la generación de electricidad del 25% para el año 2018, del 30% para el año 2021 y del 35% para el año 2024. Para el final del año 2016 se registró un 25.19% de la participación de las energías renovables teniendo una distribución como se muestra en la Figura 3.1.5, siendo la hidroeléctrica y la eólica las de mayor aportación en México.

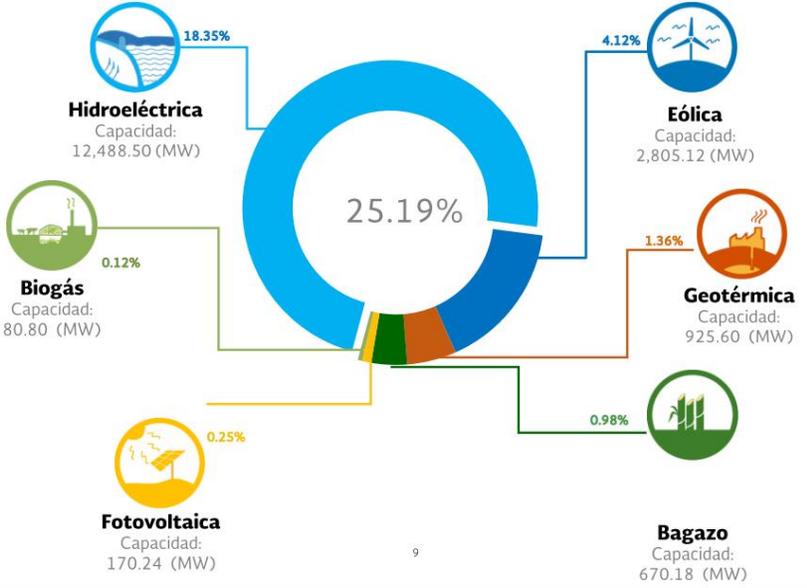


Figura 3.1.5. Generación de energía renovable en México, para el año 2016. Fuente SENER

En este sentido la Secretaría de energía en México (SENER) ha motivado y ha invertido en investigación y desarrollo para las energías limpias, sin embargo, como se puede observar en la Figura 3.1.6, las energías renovables no incluyen las energías oceánicas, siendo esto un motivador para el desarrollo de esta investigación.

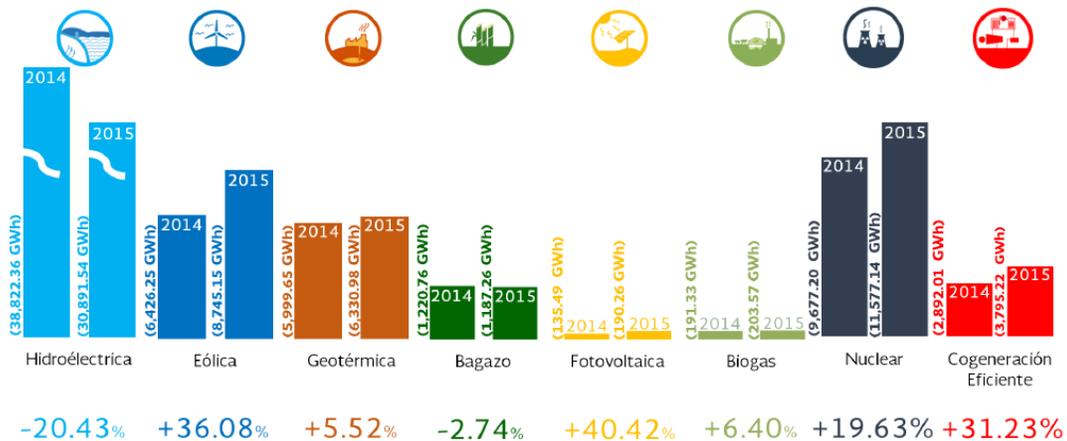


Figura 3.1.6 Crecimiento en generación en energía limpia en México para el 2015. (SENER, 2016b)

### 3.1.1 Desarrollo nacional en Energía oceánica.

De los dispositivos registrados a nivel académico, se tiene conocimiento de un hidrogenerador denominado IMPULSA desarrollado en el instituto de ingeniería de la UNAM, el cual es un dispositivo para el aprovechamiento de las corrientes marinas, por medio de una estructura flotante que redirige el flujo a través de ella y provocando el movimiento de alabes o turbinas con la cual se genera la energía. Este dispositivo sigue siendo objeto de investigación, optimización y pruebas de laboratorio (López González, Silva Casarín, and Mendoza Baldwin 2011).

Existe también otro dispositivo en etapa de desarrollo académico denominado “Blow-jet” el cual es una estructura cónica que trabaja con la superficie libre del oleaje, cuando parte de la columna de agua entra por el frente del dispositivo el agua dentro se redirige hacia una sección más pequeña y por los cambios en el área produce un aumento en la velocidad y la presión del fluido, creando así un chorro de agua que puede ser utilizado para mover turbinas unidas a rotores y de esa manera lograr la conversión de la energía (Mendoza et al. 2015).

En México no existen antecedentes de desarrollo de prototipos a nivel comercial o de demostración para la generación de energía a partir de fuentes marinas, el principal rezago es la falta de conocimiento del recurso marino aprovechable en las costas mexicanas y la

identificación de los sitios con mayor potencial energético. La veracidad y la falta de información también es un problema para el desarrollo de estas tecnologías, debido a que muchas estaciones de medición se encuentran sin trabajar y en muchas zonas no existe registro de datos necesarios para la investigación.

En el 2016 atendiendo a esta problemática y dentro de este contexto, surge la propuesta para la creación y conformación del CEMIE-Océano, con la participación de 56 socios conformados por Centros de Investigación, Instituciones de Educación Superior, empresas y asesores internacionales del más alto nivel. El consorcio del CEMIE-Océano se encontrará encabezado por la UNAM, bajo el liderazgo del Instituto de Ingeniería, siendo el Dr. Rodolfo Silva Casarín el responsable técnico del grupo, coordinador y líder del proyecto (Instituto de Ingeniería 2016).

Así entonces, el CEMIE-Océano posee la misión de convertirse en el centro con mayor cantidad de líneas de investigación en temas de aprovechamiento de las fuentes renovables del océano, desarrollo de tecnologías de alto impacto y la formación de recursos especializados en Latinoamérica, lo que parece indicar que en un futuro no muy lejano, se contará con dispositivos desarrollados en el país para la extracción de energía empleando las diferentes fuentes que el océano ofrece.

### 3.2 Antecedentes de la extracción de energía marina.

El potencial energético del oleaje presente en las diferentes costas alrededor del mundo ha impresionado a muchos investigadores e inventores, por lo que desde hace más de dos mil años se ha tenido registro de diferentes dispositivos capaces de aprovechar y convertir la energía contenida en las olas para beneficio humano. Uno de los primeros dispositivos de la época actual fue desarrollado por el japonés Yoshio Masuda en 1940, esto dio inicio a pruebas en dispositivos de conversión utilizando el principio de conversión OWC (Oscillating Water Column). Sin embargo, las investigaciones de los años siguientes se vieron interrumpidas por la segunda guerra mundial ya que el financiamiento fue retirado para destinarlo a solventar los gastos que generaba el enfrentamiento, el cual finalizó en el año de 1945.

En Europa en la época de 1970 los avances en las investigaciones para las energías undimotriz se vio representada por Stephen Salter investigador de la universidad de Edimburgo en Escocia, ahí desarrolló la tecnología conocida como “Edinburgh Duck” que consiste en un dispositivo para la absorción y conversión de energía del oleaje por medio de la rotación de giroscopios localizado dentro del dispositivo en forma de pera y un generador eléctrico que convierte esa rotación en energía (Cruz 2008).

Otro de los investigadores pioneros fue Kjell Budal junto con Johannes Falnes iniciaron la investigación en Noruega. Como aporte principal se les conoce la teoría que nombraron “Efecto Antena”, el cual describe que un dispositivo flotante es capaz de absorber mucha más energía de la onda incidente, haciendo la analogía a las antenas de radio. En Estados Unidos Michael McCormick fue uno de los pioneros para el estudio de la energía del oleaje en la época moderna desarrollando investigación para energía de oleaje (Falnes 2007).

Recientemente, con la promulgación y la firma del protocolo de Kioto (ONU 1998), con respecto a las emisiones de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, nuevamente se retomó el interés por la investigación y el desarrollo de dispositivos para la extracción de energía del océano y los gobiernos nuevamente otorgaron el financiamiento a las instituciones dedicadas a este desarrollo (Falnes 2007).

La presión ejercida por el cambio climático a causa del consumo de los combustibles fósiles ha vuelto a poner los recursos renovables marinos como una opción viable para la generación de energía. En el océano, la energía al ser físicamente visible a través del oleaje ha atraído la atención de diversos investigadores. Durante varias décadas se han llevado a

cabo cientos de trabajos de investigación y desarrollo sobre dispositivos de conversión de energía, el cual comenzó muchos años atrás. Hasta el día de hoy existen gran cantidad de diseños y prototipos listos para su despliegue. Aunque estos dispositivos son relativamente prototipos, debido a que la inversión en infraestructura y los requisitos reglamentarios son un impedimento. Por otro lado el análisis del oleaje, para conocer el clima y la energía disponible es necesario para la selección de sitios adecuados para su funcionamiento (Arinaga and Cheung 2012).

En algunos países la carrera de marea representa una oportunidad para la extracción de energía y su semejanza con las hidroeléctricas representa un avance importante tanto en crecimiento como en la utilización de tecnología madura por lo cual, esta tecnología se encuentra muy adelantada en comparación al aprovechamiento de la energía de las olas. Mientras que los dispositivos para el aprovechamiento de oleaje no ha llegado a la misma etapa de desarrollo. Gran parte de ese atraso se debe a la variabilidad que existe en el recurso, debido a que el oleaje cambia sus condiciones dependiendo a la variabilidad de las estaciones, la profundidad, y las condiciones topográficas en la que se propaga (Foley et al. 2015).

Para la energía renovable extraída del océano, el recurso o fuente que demuestra mayor capacidad de generación es la obtenida de las mareas, la cual se mantuvo alrededor de 530 MW en el 2014 (Kristin Seyboth et al. 2016). Prácticamente los dispositivos nuevos estuvieron en modo piloto o en proyectos de laboratorio. En el foro de energía del océano de Estados Unidos en 2014 (U.S. Energy 2014), se puso en marcha la cooperación con distintas asociaciones para resolver los problemas de desarrollo para energías del océano. El desarrollo continúa en varios sitios de prueba y los dispositivos han presentado gran avance en tecnología hasta el día de hoy (Foley et al. 2015).

La energía del océano se clasifica con base a la manifestación de energía principal, es decir, la clasificación dependerá del recurso tal como la marea, el oleaje, las corrientes marinas, y en su caso los gradientes de temperatura y salinos. Cada una de estas clasificaciones contiene a su vez distribuciones las cuales dependerán de la localización (aguas someras o aguas profundas), el tipo de operación y el modo de absorción (Falcão 2010) .

### 3.3 Clasificación de las fuentes de energía del océano

El océano es considerado la mayor fuente de energía renovable, tanto que, puede llegar a sustituir en un futuro la producción de energía generada en base a combustibles fósiles. De los diferentes recursos que el océano ofrece (corrientes, mareas, oleaje, gradiente de temperatura y salinos), el que muestra la mayor evidencia de energía es el oleaje, por lo que se han desarrollado gran cantidad de dispositivos para el aprovechamiento de este recurso.

Para lograr una explotación adecuada de los recursos energéticos que ofrece el océano, es necesario conocer cada una de las fuentes de energía disponibles, así como su densidad y distribución tanto espacial como temporal, también es necesario entender los procesos involucrados en los fenómenos oceánicos. Pero antes de conocer esto, es importante el conocimiento de los mecanismos físicos involucrados en la conversión de estas energías (Falcao 2014).

Una clasificación de las energías del océano de acuerdo a sus características físicas que ha sido manejada por los investigadores enfocados al estudio de este tema es la que se describe a continuación, la cual se basa en el recurso del océano que se utiliza para la extracción:

- Energía por amplitud de mareas (Mareomotriz).
- Energía de las corrientes marinas.
- Energía por cambios de temperatura
- Energía por gradientes de salinidad
- Energía del oleaje (Undimotriz).

Siguiendo con la descripción de cada una de las fuentes del océano se tiene que la energía de las mareas se puede aprovechar construyendo presas, o embalses. Estos sistemas funcionan cuando el nivel del mar aumenta por el efecto de la marea y provoca que el agua ingrese a estos embalses a través de compuertas o conductos donde se instalan turbinas de baja carga que son accionadas principalmente por la diferencia de nivel de agua que se genera al aumentar o disminuir la marea, lo que permite la conversión de la energía potencial a cinética y posteriormente a energía eléctrica (Charlier 1993). Es claro que para el aprovechar la energía de las mareas de esta manera, es conveniente que el rango de las mismas sea amplio, lo que limita las zonas de aprovechamiento.

Para la conversión de la energía contenida en las corrientes marinas se maneja el conocimiento de los parques eólicos, es decir el principio de turbinas que al ser sometidos a un flujo, conectadas a un generador, transforman la energía del flujo en energía mecánica y posteriormente en energía eléctrica. Este mismo principio es utilizado para la conversión de corrientes marinas en energía eléctrica, pero a diferencia de las turbinas eólicas, las turbinas marinas presentan escenarios más desfavorables en mantenimiento y operación ya que las condiciones en altamar son más agresivas que en tierra firme (Bahaj y Myers 2003).

El aprovechamiento de la energía por cambios de temperatura o gradiente térmico, solo es aplicable en ciertas zonas del océano, ya que el principio básico de este tipo de generación se basa en la diferencia de temperatura entre las aguas superficiales y las aguas profundas, debido a que la superficie del mar es calentada por la radiación solar, esta diferencia de temperatura es utilizada para crear un ciclo Rankin el cual consiste en calentar y evaporar un líquido de trabajo con el agua caliente de la superficie, el cual acciona turbinas de vapor que al rotar generan energía eléctrica. Una vez que el fluido ha pasado a través de la turbina, aprovechando las bajas temperaturas del agua profunda, esta se utiliza para condensar el vapor residual y se vuelve a repetir el proceso. Este tipo de conversión de energía ha sido estudiado durante mucho tiempo pero aún no se ha logrado desarrollar completamente ya que presenta inconveniente que aún no se logran resolver, entre ellos los altos costos de operación y mantenimiento (Tiron et al. 2015).

La energía del oleaje es una de las fuentes de energía más estudiadas, el principio consiste en aprovechar el movimiento constante de oscilación de las olas con un dispositivo que transforme la energía cinética del oleaje en energía mecánica y posteriormente a energía eléctrica (Tiron et al. 2015). Debido a que esta es la fuente de generación de energía más estudiada se ha propuesto gran variedad de dispositivos, la eficiencia de los mismos depende de factores como la ubicación con respecto a la costa o simplemente la forma en convertir el movimiento del oleaje en energía mecánica.

Dado el enfoque de esta investigación se revisó a mayor detalle la información relacionada con la energía del oleaje tal como la densidad de energía, los métodos de absorción y los diferentes dispositivos que se han desarrollado hasta la fecha.

### 3.3.1 Conversión de energía del oleaje.

El oleaje como fuente de energía renovable, ofrece ciertas ventajas sobre otras que lo hacen atractivo para su aprovechamiento, las cuales se mencionan a continuación:

- El oleaje ofrece una alta densidad de energía en comparación a otras fuentes convencionales de energía renovable.
- El impacto o huella de carbono al medio en el que se desarrolla es menor que en otros sistemas de conversión de energía. El departamento de energías renovables de Reino Unido realizó estudios del impacto potencial y presento una estimación de las emisiones emitidas en su ciclo de vida de un dispositivo conversor de energía del oleaje y determinó que para el ciclo completo de vida las emisiones de contaminante que se generaría serían muy bajas.
- Las olas pueden viajar largas distancias y perder solo una pequeña parte de su energía en el transcurso.
- Se ha reportado que los dispositivos de conversión de energía pueden presentar en muchos casos eficiencias de aproximadamente 90 por ciento (López et al. 2013; Drew, Plummer, and Sahinkaya 2009), mientras que en los dispositivos de conversión de energía de viento y solar presentan una eficiencia del 30-40 por ciento.

Cabe mencionar que a pesar que la energía del oleaje presenta ciertas ventajas en comparación con la energía eólica y solar, también tiene ciertos inconvenientes como los altos costos de construcción y mantenimiento, razón por la cual aún no se tiene un dispositivo en fase comercial.

### 3.4 Clasificación de los dispositivos de conversión de energía de oleaje (Wave Energy Converters, WECs).

La conversión de energía de las olas es un concepto muy extenso y más aún la forma y tipos de conversión, por ejemplo solo entre Japón, Europa y Norte América han patentado más de mil dispositivos de conversión de energía del oleaje. A pesar de esta gran variedad de dispositivos, aun no se cuenta con un dispositivo que cumpla con las exigencias de la relación eficiencia-costo esto debido a diversos factores entre ellos los altos costos de mantenimiento. De esta manera para distinguir los diversos dispositivos WEC que existen se ha clasificado en dos grandes grupos a) por su localización y b) tipo de conversión y dentro de esta clasificación se dividen por la forma de operación (Falcão 2010).

### 3.4.1 Localización

De acuerdo a la localización en la cual los dispositivos son desplegados se pueden distinguir dos grupos: 1) dispositivos WEC de aguas someras y 2) dispositivos WEC de aguas profundas.

Una característica obvia de los dispositivos de aguas someras, es que los costos de producción y mantenimiento son menores comparados con los dispositivos de aguas profundas. Estos se ubican principalmente en la zona de rompiente. Sin embargo, estos dispositivos se ven limitados por el potencial de energía que ofrece esta zona.

En cuanto a los dispositivos de aguas profundas todo es diferente y las dificultades en el mantenimiento, construcción e instalación requieren de equipo sofisticado y de mayor envergadura lo que significa directamente mayor costo de producción, además en aguas profundas el potencial energético del oleaje es también mayor lo que deriva en dispositivos de dimensiones mayores en comparación con los dispositivos de aguas poco profundas (Drew, Plummer, and Sahinkaya 2009).

### 3.4.2 Tipos de dispositivos

Existen diferentes clasificaciones para los dispositivos de aprovechamiento del oleaje, pero la clasificación predominante es de acuerdo al método de conversión de energía.

Se consideran como dispositivos “tipo atenuador” los que actúan paralelos a la dirección predominante del oleaje, se dice que estos dispositivos ‘montan’ las olas para su funcionamiento. Un ejemplo de este tipo es el Pelamis Wave Power. Los dispositivos atenuadores están alineados en dirección a la onda incidente, y pueden estar soportados por estructuras rígidas o articuladas (Henderson 2006; Pelamis Wave Power 2017).

Existen los dispositivos de “punto de absorción” son dispositivos de dimensiones relativamente menor a las longitud de onda incidente. Estos dispositivos pueden ser flotantes en la superficie del agua o sumergidos. Dependen del incremento de presión por los cambios en la superficie. Debido a que son pequeños la dirección del oleaje no es muy importante para este tipo de dispositivos. Estos dispositivos son usualmente, axisimétricos alrededor de un eje vertical, el concepto es muy atractivo desde el punto de modelado ya que las fuerzas que actúan sobre el cuerpo son solo por las ondas incidentes. Un ejemplo de este método es el dispositivo denominado “PowerBouy” desarrollado en Estados Unidos (Ocean Power Technologies 2017).

Los denominados “terminator” son aquellos que su eje principal trabaja paralelo a la ola y absorbe la energía interceptando la cara de la ola un ejemplo claro de los dispositivos de este tipo es el “Wave Plane” (Drew, Plummer, and Sahinkaya 2009; WavePlane 2017).

#### 3.4.2.1 *Modos de operación*

Después de identificar las categorías la próxima clasificación es por el modo de operación.

- 1) Los dispositivos sumergidos de presión diferencial son del tipo de punto de absorción, normalmente comprende dos partes principales, una que es la parte fija en el fondo del mar y la cual está llena de aire y la otra es una parte móvil generalmente cilíndrica que se mueve sobre la parte fija. Cuando la cresta de la ola pasa por encima del dispositivo, se genera un incremento en la fuerza hidrostática sobre el mismo y el cilindro bajara provocando un aumento de presión en el aire, mismo que es aprovechado para impulsar una turbina o pistón y este a su vez un generador eléctrico (Figura 3.4.1).
- 2) Conversión de energía de oleaje en la zona de rompiente, normalmente esta energía se extrae con dispositivos posicionados perpendicularmente a la dirección del oleaje, que se mueve hacia atrás y hacia delante utilizando la velocidad de oscilación de las partículas del oleaje.
- 3) Los dispositivos que trabajan con la oscilación de la columna de agua consisten en una cámara abierta en la línea de agua o nivel de agua. Las olas dirigidas a esta cámara generan una presión en el aire contenido dentro la cámara, el cual es dirigido hacia la parte externa de la cámara y pasa a través de una turbina, la cual transforma el flujo de aire en movimiento y a su vez en energía eléctrica.
- 4) Los dispositivos que trabajan por rebases de agua, consisten en aquellos que capturan el agua de rebase de agua de las olas incidentes y las concentran en un reservorio el cual tiene una sola salida hacia el mar, en ella está instalada una turbina la cual gira con el paso del agua. Dentro del reservorio existen estructuras la cuales reducen la sección y con ello aumentan la velocidad del flujo (Drew, Plummer, and Sahinkaya 2009).



Figura 3.4.1. Tipos de dispositivos con relación a su modo de absorción de energía del oleaje.

Muchos autores clasifican los dispositivos dependiendo de su localización con respecto a la costa (somera o profunda) o por su método de absorción. En la Figura 3.4.2, se tiene una clasificación tomada de la revisión realizada por Falcão en 2010 la cual describe las diferentes categorizaciones antes mencionadas y los dispositivos propuestos de cada una de las clasificaciones.

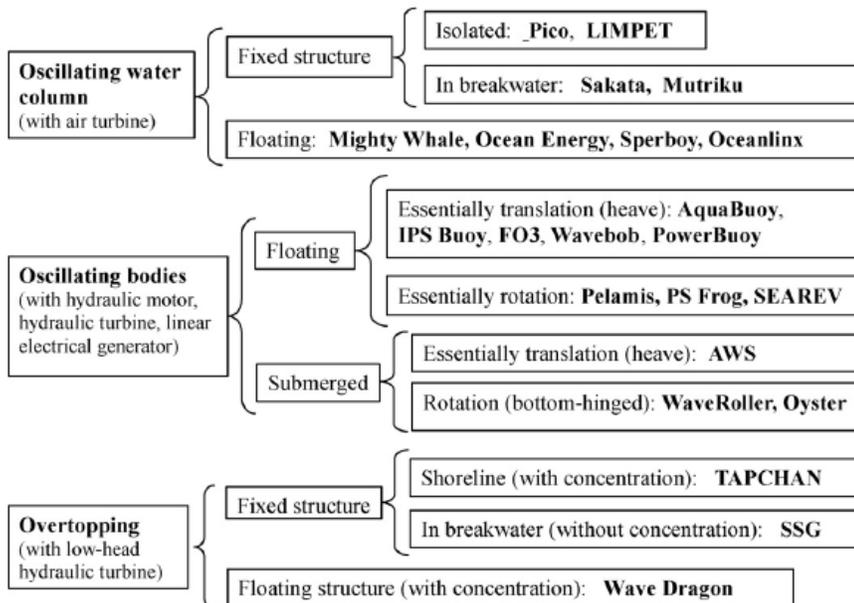


Figura 3.4.2. clasificación de los diferentes tipos de dispositivos de absorción de energía del oleaje basados en su funcionamiento. (Falcão 2010)

### 3.5 Potencial energético del oleaje

El poder energético del oleaje es enorme y de mayor confianza comparado con otras energías renovables, tal como la solar y la eólica. Esto debido a que la densidad de energía es de 2-3 KW/m<sup>2</sup> mientras que la energía eólica 0.4-0.6 KW/m<sup>2</sup> y la solar de 0.1-0.2 KW/m<sup>2</sup>, demostrando tener un mayor potencial sobre las ya conocidas fuentes de energía renovables (Villate 2010).

En esta sección se describe el oleaje como potencial energético, las posibles zonas de aprovechamiento a nivel internacional y nacional, también se mencionan algunas de las consideraciones ambientales que deben tomarse en cuenta al momento de la implementación de dispositivos WECs.

#### 3.5.1 Potencial Energético

En el desarrollo tecnológico enfocado a la extracción de energía del oleaje es necesario conocer las condiciones ambientales del entorno tanto anuales como estacionales (clima) y el estimado de energía en cada zona de interés. En este sentido, gran cantidad de artículos científicos han sido publicados donde se muestra la cantidad de energía del oleaje existente en el mundo con mayor viabilidad para colocar granjas de WECs.

En la Figura 3.5.1 se observa la distribución global de la energía del oleaje. El mayor potencial de energía se encuentra entre 40° y 60° en ambos hemisferios, pero si se comparan los hemisferios en función a la variación anual del oleaje se tiene que el hemisferio sur tiene una menor variabilidad. En el pacifico norte cerca de las costas de Canadá y de Washington se estima que el potencial es de aproximadamente de entre 20-60KW/m y aumenta conforme la latitud se incrementa (Cornett 2008; López et al. 2013).

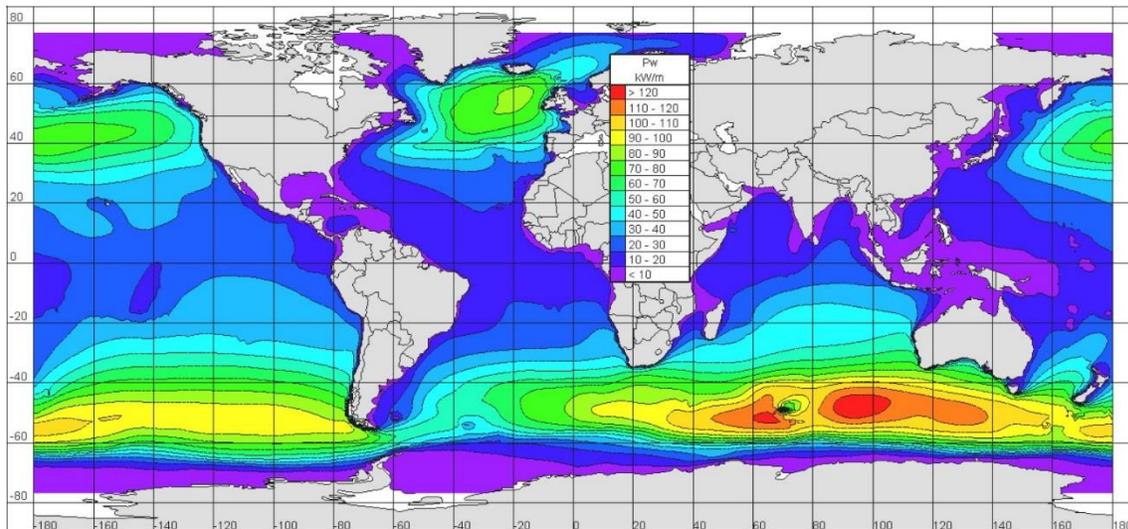


Figura 3.5.1. Distribución global de la energía potencial para un promedio anual.(Cornett 2008)

Otro trabajo se realizó enfocándose a la zona del caribe, donde se utilizaron datos de Re-análisis para estimar la variabilidad del clima del oleaje y con ello determinar el potencial en el caribe. En la Figura 3.5.2 se observa que los valores para esta zona van de 2 a 14 KW/m, que comparado con la Figura 3.5.1 tienen resultados similares para la zona del Caribe.

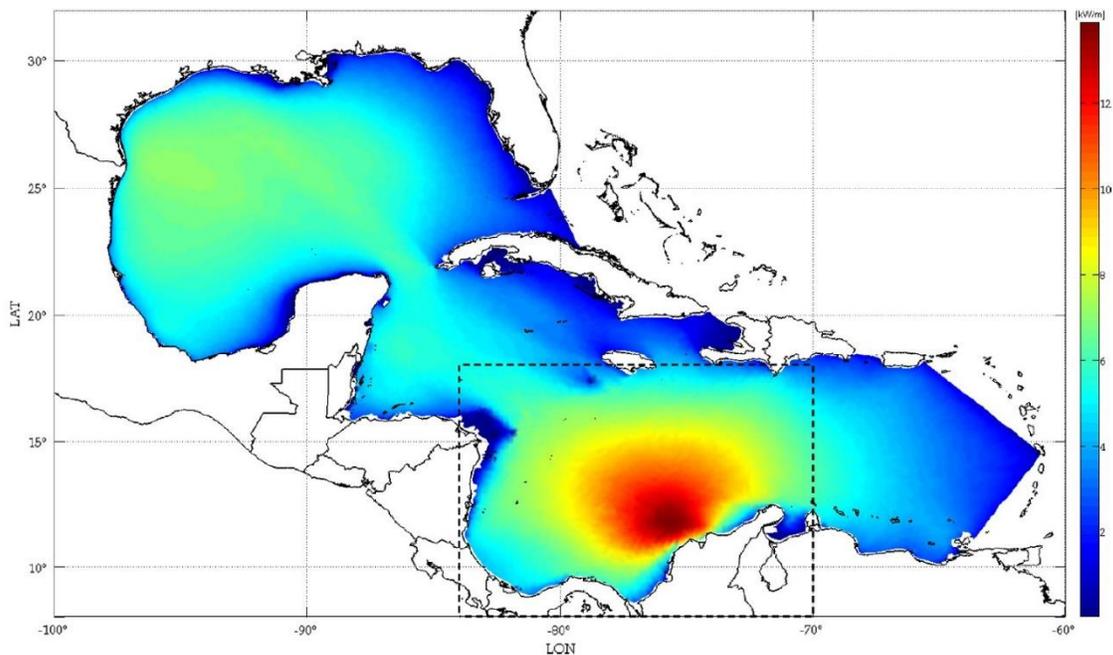


Figura 3.5.2. Distribución del potencial de energía por oleaje en el Mar Caribe y el Golfo de México (KW/m) (Appendini et al. 2015).

En el estudio se menciona que el potencial es muy bajo comparado con otras zonas del mundo, sin embargo puede ser aprovechado si se logra desarrollar un dispositivo adaptado a las condiciones de la zona con la finalidad de obtener la mayor eficiencia (Appendini et al. 2015).

### 3.5.2 Zonas de aprovechamiento

Es una convención mundial que la densidad de la potencia de las olas es medida en Kilowatts por metro de onda. Existen muchos estudios realizados sobre la capacidad de energía en el océano producido por el oleaje, un ejemplo de ello se muestra en la Figura 3.5.3. donde se puede apreciar la densidad de energía, también se puede observar, que las costas más ricas para la extracción de esta energía son las costas de Europa en el océano Atlántico para el hemisferio norte y en el hemisferio sur la zona del océano antártico incluyendo las costas de Argentina, Chile y Australia (Polinder and Scuotto 2005).



Figura 3.5.3 Distribución de la energía del oleaje en las costas de todo el mundo, potencial energético expresado en KW/m de cresta de ola. (Polinder and Scuotto 2005)

### 3.5.3 Oleaje como recurso potencial de extracción de energía.

Algunos de los beneficios que el oleaje ofrece como recurso potencial son:

- La energía del oleaje puede viajar grandes distancias perdiendo solamente un poco de su energía.
- Los dispositivos de aprovechamiento pueden operar hasta un 90% del tiempo en comparación con los de viento o solar que solo operan por lo general un 30% del tiempo.
- La predicción del potencial de energía contenida en el oleaje puede ser estimada con mucha aproximación.
- Es ampliamente viable debido a las diferentes zonas de aprovechamiento: en la costa, cerca de ella y en aguas profundas.
- El impacto ambiental de los dispositivos para la extracción del oleaje es mínimo y su infraestructura ayudaría a amortiguar la energía del oleaje que impacta sobre las costas o puertos.

En general el oleaje representa una prometedora fuente de energía renovable que puede ser aprovechada de forma satisfactoria, ya que está libre de las variaciones presentes en otras fuentes de energía como la eólica o solar y como se mencionó anteriormente presenta ventajas que otras fuentes de energía no tienen (Appendini et al. 2015; Drew, Plummer, and Sahinkaya 2009; López et al. 2013). El reto es poder aprovechar gran parte de la energía contenidas en las olas.

### 3.5.4 Consideraciones ambientales.

El desarrollo de dispositivos para la conversión de la energía del oleaje en la última década se ha incrementado de manera exponencial, tanto en número como en tamaño y esta tendencia sigue en aumento. A pesar de que la gran mayoría de los dispositivos continúan en etapa de desarrollo parte de ellos han alcanzado su fase máxima de operatividad lo que los convierte en dispositivos demostrativos y muchos de ellos cercanos a comerciales. Algunos de estos dispositivos se han instalado o están en proceso de implementación, por lo que es necesario pensar en las consideraciones ambientales que esta implementación tendrá en el medio marino (Riefolo et al. 2015).

Un punto importante para la implementación de un dispositivo WEC es el estudio de la adecuada zona para su funcionamiento. Pero también es importante conocer la zona para identificar la afectaciones ambientales y también gestionar los posibles conflictos con los

demás usuarios del recurso (pescadores, tránsito marino, entre otros). En un estudio realizado por Azzellino en 2013, se calculó el potencial energético del oleaje en alta mar y cerca de las costas comparado con las afectaciones ambientales, parte del estudio incluye el análisis de su instalación con relación a la afectación provocada en biodiversidad, la presencia de mamíferos marinos y pastos marinos afectadas por la implementación o construcción de estructuras. A pesar de que aún no se cuenta con una regulación ambiental para la implementación de sistemas WEC a la fecha solo algunas empresas han realizado estudios considerando los riesgos ambientales (Bald, Campo, and Franco 2010).

Un factor a considerar en la colocación e implementación de dispositivos WECs es que se cambian las condiciones hidrodinámicas en mayor o menor medida y los efectos dependen de la forma y el tipo de estructura, si es sumergida o flotante, el peso del elemento y los tipos de amarre que se utilicen. El estudio realizado por Michel en 2017 indica que algunos factores de modificación con este tipo de dispositivos es la reflexión, difracción, la rotura del oleaje, así como la interacción de las corrientes producidas por estos fenómenos. Al modificarse algunos de los factores, la hidrodinámica del lugar se afecta a su vez el transporte de sedimentos provocando cambios en las zonas costeras con erosión o acreción de sedimentos.

Las afectaciones se clasifican en 2 clases (Bald, Campo, and Franco 2010): las inducidas por la construcción o implementación de WECs y por su operación.

#### Construcción.

- Perturbación del fondo marino para la instalación de cimentaciones, anclajes y cables de transmisión.
- Suspensión de sedimentos y perturbación durante la instalación de anclajes o cimentaciones.
- Ruido durante la perforación para la implementación de cables o tuberías en el fondo marino.
- Pérdida de hábitat por la construcción de los dispositivos en sitio.
- Perturbación de hábitat durante la instalación de cables de transmisión.
- Contaminación del hábitat a causa de desechos creados durante la construcción.

#### Operación

- Ruido excesivo y vibraciones creadas por los dispositivos durante su funcionamiento.
- Contaminación creada por los recubrimientos, anticorrosivos y otros químicos utilizados para el mantenimiento del sistema.
- Creación de campos electromagnéticos por la conversión y transportación de la energía.

En la Tabla 3.1 se muestra el impacto que se tiene con la implementación de diferentes dispositivos de conversión. Se muestra un grupo de variables las cuales presentarían afectaciones por la implementación de algunos proyectos de WECs. Donde los colores verdes indican impacto bajo, los amarillos impacto moderado y los rojos alto impacto o daño al entorno descrito.

*Tabla 3.1 Variables ambientales y su afectación por la implementación de dispositivos de conversión de energía del oleaje (WECs) Tabla traducida del estudio de Bald et al. 2010.*

		Variable	Impacto
Entorno físico	Hidrografía	temperatura	....
		salinidad	...
		oxígeno disuelto	...
		propiedades ópticas	
		Nutrientes	...
		clorofila	...
		claridad de agua	
	Hidrodinámica	zona de generación de oleaje	
		corrientes	
	Sedimentos	granulometría	
calidad de sedimentos			
Paisaje	paisaje		
Entorno Biótico	Comunidades/Fuentes	bentos	
		mamíferos marinos	
		pájaros marinos	
		ictiología	
		interacciones ecológicas	
Entorno Socioeconómico	Socioeconómico	fuentes de pesca	
		fuentes arqueológicas	
		socioeconómico	

### 3.6 Marco teórico

En esta sección se describen las ecuaciones que definen el funcionamiento del dispositivo OWC\_MDS, al igual que se describe la teoría lineal del oleaje presentando las ecuaciones que describen el movimiento de propagación del oleaje. También se describe la teoría para sistemas sumergidos en el océano que trabajan con oscilación de columna de agua (OWC). Y al final de la sección se presentan las ecuaciones que se utilizarán para la obtención del potencial teórico que el dispositivo es capaz de aprovechar.

#### 3.6.1 Teoría lineal del oleaje

Las ecuaciones que describen el movimiento del oleaje están basadas en la Teoría Lineal del Oleaje (TLO), como el dispositivo de interés denominado OWC-MDS trabaja con la oscilación de la columna de agua (OWC) producida por la variación de la superficie libre inducida por el oleaje, es necesario conocer algunos términos importantes sobre la física que describe el movimiento del oleaje. Así como la cantidad de energía disponible y teórica extraíble por el sistema.

Por esta razón, se enumeran a continuación las ecuaciones de movimiento del oleaje de pequeña amplitud.

#### 3.6.2 Ecuaciones de gobierno y condiciones de contorno.

La teoría lineal del oleaje emerge de la solución simplificada de la ecuación general de movimiento, en ella se analiza las características físicas del oleaje y las soluciones para el campo de velocidades y campo de presiones así como, ecuaciones para la descripción del oleaje en aguas profundas y aguas someras. En ella se describen parámetros característicos del oleaje como ola promedio, significativo y densidad de energía, el promedio de flujo de masa o volumen, momentum y energía causada por el movimiento lineal del oleaje. Explica la transformación del oleaje por cambios de profundidad, los fenómenos de difracción y refracción, el asomeramiento y la propagación del oleaje. Describe la física de estos fenómenos y las ecuaciones básicas de los modelos de propagación de oleaje modernos (Dean and Dalrymple 2000).

Como ya se mencionó para poder realizar el análisis físico de las características y comportamiento del oleaje, la TLO ha realizado suposiciones para la simplificación de la ecuación de movimiento y velocidad potencial, esto por medio del comportamiento de condiciones de contorno en el cual se desarrolla el fenómeno.

En las ecuaciones se considera al agua como un fluido homogéneo e incompresible con movimiento irrotacional. Por lo que puede ser descrito por la función potencial. Al intervenir estas consideraciones y aplicarlas a la ecuación de movimiento se tiene la ecuación de Bernoulli, que se expresa como

$$-\frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) + \frac{p}{\rho} + gy = f(t) \quad \text{Ecuación 3.6.1}$$

Donde el primer término expresa la inercia local, el segundo la inercia convectiva, los términos de presión y los términos de gravedad, respectivamente. Esta ecuación es la condición hidrodinámica válida en el fluido, donde  $f(t)$  es una función del tiempo.

La teoría de pequeña amplitud considera que los términos convectivos al ser muy pequeños son despreciados por lo que la Ecuación 3.6.1 puede ser linealizada lo que se reduce a:

$$-\frac{\partial\phi}{\partial t} + \frac{p}{\rho} + gy = f(t) \quad \text{Ecuación 3.6.2}$$

Aplicando las condiciones de frontera en la ecuación linealizada, las cuales se describen a continuación:

- a) condición de frontera de fondo. Basados en la teoría lineal, el fondo se sitúa a la profundidad  $y = -d$ ; es fijo, impermeable y horizontal. Aquí la velocidad es cero en cualquier instante, por lo que de acuerdo a la condición de irrotacionalidad ya establecida se tiene que:

$$v = -\frac{\partial\phi}{\partial y} = 0 \text{ y } u = -\frac{\partial\phi}{\partial x} = 0; \text{ para } y = -d \quad \text{Ecuación 3.6.3}$$

- b) Condición cinemática de superficie libre. La superficie libre está dada por la ecuación  $y = \eta(x, y, t)$ , donde la presión relativa es igual a cero, dada esta condición tenemos que la Ecuación 3.6.2 se reduce a:

$$\eta = \frac{1}{g} \left( \frac{\partial\phi}{\partial t} \right); \text{ para } y = \eta \text{ y para } y = 0 \quad \text{Ecuación 3.6.4}$$

La función potencial  $\phi$  satisface la ecuación de Laplace:  $\nabla^2\phi = 0$  en un flujo potencial. Las funciones que tienen derivadas continuas de segundo orden y satisfacen la ecuación de Laplace, se llaman funciones armónicas. La función potencial para una onda progresiva puede expresarse como:

$$\phi = \frac{ag \cosh k (d + y)}{\sigma \cosh kd} \cos(kx - \sigma t) \quad \text{Ecuación 3.6.5}$$

Después de conocer la función potencial  $\phi$  y sustituirla en la Ecuación 3.6.4 se obtiene la ecuación de la superficie libre de la onda:

$$\eta = \frac{1}{g} \left( \frac{\partial \phi}{\partial t} \right) = a \operatorname{sen} (kx - \sigma t) \quad \text{Ecuación 3.6.6}$$

Esta ecuación describe el movimiento sinusoidal del oleaje, donde **a** representa la amplitud de la onda o bien la mitad de la altura de ola con respecto a la superficie libre del mar.

### 3.6.3 Cambio de presiones bajo condiciones de oleaje

Una vez conocida la función potencial de velocidades ( $\Phi$ ), que en principio es lo único que conocemos del movimiento de la ola, podemos determinar el campo de velocidades completo, el movimiento de partícula y la variación de las presiones creadas por el desplazamiento de la ola. Esta información es necesaria debido a que el comportamiento del sistema OWC-MDS pretende trabajar con la variación de las presiones a lo largo de la columna de agua.

### 3.6.4 Campo de velocidades

Las componentes de la velocidad horizontal y vertical ( $u, w$ ) son determinadas directamente con la derivada parcial de la velocidad potencial con respecto a  $x$  y  $z$ . el resultado se puede escribir en diferentes formas, la cual se describe:

$$\phi = -\frac{Hc}{2} \frac{\cosh k (z + h)}{\sinh kh} \cos(\omega t - kx) \quad \text{Ecuación 3.6.7}$$

Para la componente en  $u$ :

$$u = \phi_x = c \frac{kH}{2} \frac{\cosh k (z + h)}{\sinh kh} \cos(\omega t - kx) \quad \text{Ecuación 3.6.8}$$

Y para  $w$ :

$$w = \phi_z = -c \frac{kH \cosh k(z+h)}{2 \sinh kh} \sin(\omega t - kx) \quad \text{Ecuación 3.6.9}$$

### 3.6.5 Variación del campo de presiones bajo una onda progresiva.

Casi siempre en problemas de flujo potencial, la presión puede ser determinada por la ecuación de Bernoulli. Despreciando los términos ( $H^2$ ) e introduciendo el valor para  $p=0$  y  $z=0$ , tenemos que la presión es:

$$gz + \frac{p}{\rho} + \phi_t = 0 \quad \text{Ecuación 3.6.10}$$

O bien despejando términos:

$$p = -\rho gz - \rho \phi_t \quad \text{Ecuación 3.6.11}$$

Esto considerando  $-\rho gz$  como la componente hidrostática y como la componente dinámica generada por el movimiento de las partículas de la onda  $-\rho \phi_t$ .

Como es conocido, la componente de la presión hidrostática no contribuye en ningún momento en el movimiento de la onda, por lo que es necesario definir la componente que describa este cambio de presiones, la presión dinámica ( $\rho_D$ ), la cual es la componente generada por el movimiento de las ondas.

$$\rho_D = \rho + p g z \quad \text{Ecuación 3.6.12}$$

Tenemos que la presión dinámica es igual a

$$\rho_D = -\rho \phi_t \quad \text{Ecuación 3.6.13}$$

Sustituyendo en la ecuación potencial tenemos que:

$$\rho_D = \rho g \frac{H \cosh k(z+h)}{2 \cosh kh} \cos(\omega t - kx) \quad \text{Ecuación 3.6.14}$$

La presión dinámica también se puede expresar como:

$$\rho_D = \rho g \eta \frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \quad \text{Ecuación 3.6.15}$$

La presión generada en un punto por el movimiento de la onda es proporcional a la elevación de la superficie en vertical de la onda encima de ese punto, por lo que el Nivel medio del mar puede ser:

$$\rho_D(z=0) = \rho g \eta \quad \text{Ecuación 3.6.16}$$

La presión en el nivel medio corresponde simplemente a la altura de ola. La presión dinámica es más grande en la superficie y decrece hacia abajo con el factor

$$\frac{\cosh k(z+h)}{\cosh kh} \text{ Que es } \leq 1 \text{ para todos los valores en } z.$$

En el fondo el valor de  $\rho_D$  es:

$$\rho_D = \frac{\rho g \eta}{\cosh kh}$$

### 3.6.6 Energía cinética y potencial del oleaje

La energía potencial contenida en el oleaje, es el resultado del desplazamiento de masa a su posición de equilibrio contra un campo gravitacional, es decir la energía de conservación contenida en el fluido. La energía potencial presente en el oleaje es la diferencia entre la energía potencial cuando existe oleaje y cuando no existe, por lo que se puede definir como:

$$PE = (PE)_{waves} = \frac{\rho g H^2}{16} \quad \text{Ecuación 3.6.17}$$

Donde  $\rho$  es el peso específico del agua,  $g$  la aceleración de la gravedad y  $H$  es la altura de la ola. La energía potencial del oleaje por unidad de área, depende únicamente de la altura de ola.

La energía cinética es debida al movimiento de las partículas de una masa de agua, por lo que se puede expresar como:

$$KE = \frac{\rho g H^2}{16} \quad \text{Ecuación 3.6.18}$$

Por lo que tenemos que la energía total del oleaje es la suma de la energía potencial y la energía cinética por unidad de superficie, entonces:

$$E = PE + KE = \frac{\rho g H^2}{16} + \frac{\rho g H^2}{16} = \frac{\rho g H^2}{8} \quad \text{Ecuación 3.6.19}$$

Para la energía por unidad de longitud la ecuación queda como:

$$E_L = \frac{\rho g H^2 L}{8} \quad \text{Ecuación 3.6.20}$$

Estas ecuaciones nos indican el total de la energía que pudiera ser extraída del oleaje. Realizando las sustituciones de los términos conocidos. Como el dispositivo OWC-MDS trabajara con oleaje, las ecuaciones antes descritas servirán para el cálculo de las variables necesarias y así determinar el funcionamiento del mismo.

### 3.7 Teoría de absorción sumergida usando la oscilación de la columna de agua (OWC)

Como se mencionó anteriormente, existen diferentes métodos de absorción de la energía del oleaje (apartado 3.4), así mismo existe un amplio registro de información bibliográfica, sin embargo, para los dispositivos sumergidos que trabajan con la oscilación de la columna de agua no se tiene tanta información, por lo cual, este trabajo se basará en la teoría elaborada por Seung Kwan Song y Jin Bae Park la cual fue desarrollada en el Departamento de electrónica y electricidad de la Universidad de Yonsei en Seúl, Corea. La descripción que a continuación se presenta es basada en el artículo científico publicado en 2015 (Song and Park 2015).

El dispositivo propuesto por Song y Park (Figura 3.7.1) consiste en un sistema cerrado con aire en su interior, conformado por una cámara superior (lid), un conducto (pipe) en el cual sucede la oscilación y al igual que la primera cámara servirá como contenedor de aire y por último un convertidor de energía que en el caso mostrado es una turbina denominada PTO (Power Take Off).

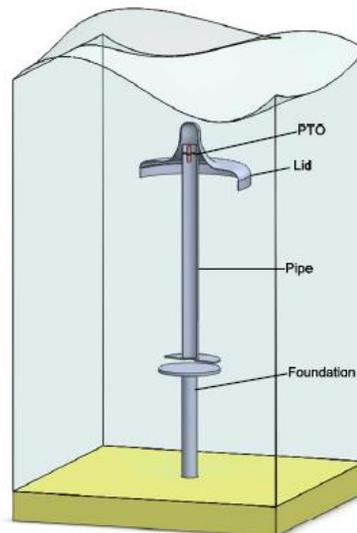


Figura 3.7.1. Esquema del prototipo de SPA-OWC de Song y Park

#### 3.7.1 Principio de oscilación del dispositivo SPA-OWC.

Para explicar el principio de operación del dispositivo es necesario indicar que el dispositivo se considera completamente sumergido y que no cuenta con piezas móviles excluyendo la turbina o sistema de transformación, lo único que se moverá en el sistema será la columna

de agua dentro del sistema. Al estar sumergido completamente en el mar, se formara una cámara hermética sellada con agua en el interior y aire en la parte superior, se permitirá el libre movimiento del agua dentro y fuera de la estructura. Sin embargo, las partes superiores de la tapa (lid) y el conducto (pipe) estarán llenas de aire y la presión en estas cámaras de aire oscilara directamente proporcional a la variación de los niveles de agua en el exterior.

Cuando la cresta de la ola pasa por encima del dispositivo la presión dinámica aumenta en las cámaras, este aumento generalmente se le conoce como fuerza de excitación. La presión dinámica en la columna de agua tiene diferentes magnitudes debido a que el movimiento circular de las partículas decrece exponencialmente con la profundidad como menciona la TLO, en consecuencia el incremento de la presión que actúa sobre la cámara (lid) es mayor que la que actúa sobre el conducto (pipe), el nivel de agua dentro del conducto resultará menor con el paso de la onda. Cuando la cresta de la ola se mueve fuera del dispositivo la presión hidráulica disminuirá y el nivel de agua dentro del conducto se moverá hacia arriba. De esta manera, al paso del oleaje sobre el dispositivo se producirá una oscilación de agua y aire.

Como complemento se asume que el aire contenido dentro de las cámaras es incompresible y se toma como referencia la ley de conservación de flujo, el desplazamiento y la velocidad del agua en el conducto serán amplificadas proporcionalmente de acuerdo a la relación de área transversal entre la cámara y el conducto, este flujo de aire se utilizará para impulsar una turbina eólica.

### 3.8 Ecuaciones del Dispositivo OWC-MDS

Basándonos en la teoría de la oscilación antes descrita, se describirá y analizará el sistema propuesto para obtener de manera experimental las diferentes variables que determinaran la eficiencia del dispositivo.

Un esquema del dispositivo propuesto denominado OWC-MDS, se muestra en la Figura 3.8.1. El dispositivo consta de 3 elementos 1) cámara de oscilación, la cual es una cámara de aire sellada herméticamente por el sello de agua que se forma al colocar la misma con la entrada de agua por la parte inferior, 2) cámara de resonancia, similar a la cámara de oscilación, la diferencia principal entre ellas, es que el área transversal de la cámara de oscilación es mayor que la cámara de resonancia, finalmente 3) conducto de aire.

La Figura 3.8.1 se presenta en dos partes, la primera a) representa el momento en el que la cresta de la onda incidente esta justo encima de la cámara de oscilación por lo tanto al aumentar el nivel superficial la presión dinámica aumenta y genera una fuerza hacia arriba que tiene que ser equilibrada por el cambio en el nivel de agua en la cámara de resonancia, la cámara de oscilación al tener mayor sección transversal tendrá un movimiento vertical menor ya que la fuerza vertical generada será mayor. Cuando el oleaje avanza y la cresta este encima de la cámara de resonancia b) sucede el mismo efecto de aumento de presión pero ahora afectara a la cámara de resonancia con lo cual la fuerza y el nivel será mayor en esta cámara, provocando la disminución del nivel en la cámara de oscilación. Los cambios internos del nivel de agua inducidos por el oleaje provocaran un flujo de aire en el interior del sistema, este flujo cambiara de dirección en función a la oscilación de las columnas de agua.

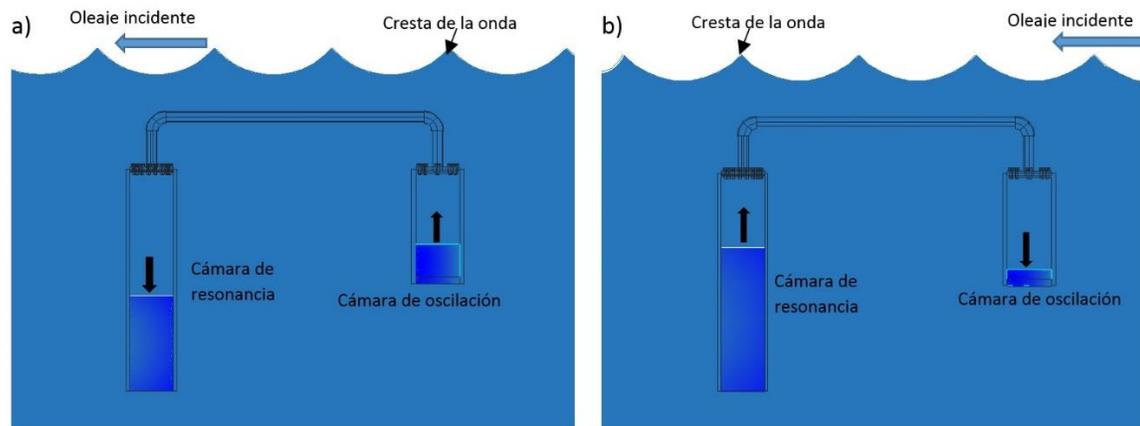


Figura 3.8.1. Diagrama de funcionamiento del dispositivo OWC-MDS.

Como se mencionó anteriormente, el equilibrio de fuerzas en el sistema al paso del oleaje genera una oscilación considerable, misma que genera un flujo de aire en un sistema cerrado y controlado que puede ser aprovechado. Siendo las áreas de las cámaras diferentes es necesario que las fuerzas de presión tiendan a equilibrarse para la conservación de energía y masa. Tomando en cuenta el diagrama de cuerpo libre del dispositivo (Figura 3.8.2) podemos observar las fuerzas y las variables de entorno que rigen el sistema.

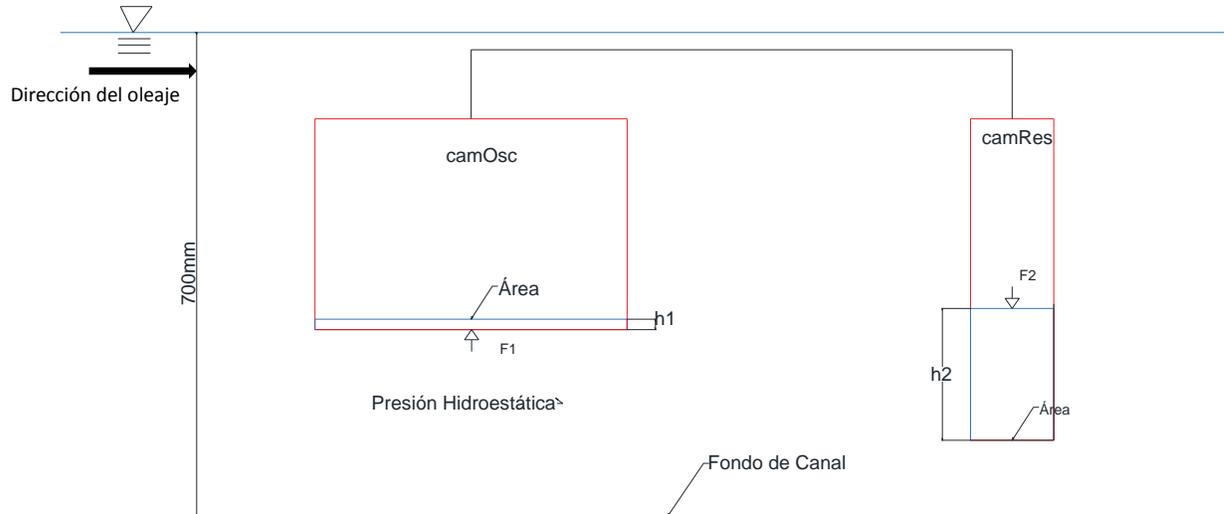


Figura 3.8.2 Diagrama de cuerpo libre del sistema propuesto.

Con esto podemos obtener la ecuación siguiente, la cual nos indica que

Si *Presión en cámara 1 = Presión en cámara 2*; entonces

$$P_1 = \rho h_1; P_2 = \rho h_2 \quad \text{Ecuación 3.8.1}$$

Donde  $P_1$  y  $P_2$ , Son la presión hidrostática en la cámara 1 y 2 respectivamente,  $\rho h_1$ ,  $\rho h_2$  es la altura del agua con respecto al fondo de la cámara multiplicado por la densidad del fluido.

Teniendo esta información y sabiendo que la presión es igual a una fuerza F aplicada sobre un área A, tenemos que:

$$\frac{F}{A_1} = \frac{F}{A_2}; \quad \text{Ecuación 3.8.2}$$

Utilizando la Ecuación 3.8.1 de la presión hidrostática dentro de cada una de las cámaras:

$$\frac{F}{A_1} = \rho h_1; \frac{F}{A_2} = \rho h_2 \quad \text{Ecuación 3.8.3}$$

Donde:

$$\rho h_1 \cdot A_1 = \rho h_2 \cdot A_2; \quad \text{Ecuación 3.8.4}$$

Sustituyendo y haciendo la reducción de términos obtenemos la ecuación que describe el sistema propuesto, la cual indica que:

$$\frac{(h_1 \cdot A_1)}{A_2} = h_2; \quad \text{Ecuación 3.8.5}$$

Por lo que la variación en la altura puede estar representada por la altura en la primera cámara multiplicada por el área de la cámara 1 y dividida por el área de la cámara 2.

Donde la variación de  $h_1$  corresponderá a la oscilación inducida por la onda incidente. Y  $h_2$  será la respuesta a el aumento en el nivel de  $h_1$

Con este análisis de fuerzas podremos determinar la geometría del dispositivo en relación a la altura de la ola esperada y de los niveles de agua dentro de cada una de las cámaras.

### 3.9 [Calculo de energía potencial extraíble del sistema OWC\\_MDS.](#)

Después de obtener la geometría del sistema y realizar los experimentos necesarios, es indispensable mencionar las ecuaciones que se utilizarán para determinar la energía potencial que el sistema absorberá.

Como primer punto se presenta las ecuaciones para el cálculo de las variables involucradas en la oscilación de la columna, como son: la velocidad, aceleración, cambio de volumen, energía cinética y energía potencial.

La ecuación para determinar el volumen ( $m^3$ ) de agua desplazada durante la oscilación es:

$$V_{agua} = \frac{\Delta h}{dt} * A \quad \text{Ecuación 3.9.1}$$

Donde  $\Delta h$  es la variación de nivel de agua al momento del paso del oleaje ( $h_2 - h_1$ ) en un paso de tiempo, multiplicado por el área de la superficie en la que se desplaza el líquido, que en su caso será el área de la sección transversal de la cámara que se esté analizando expresada en metros cuadrados.

A partir del cálculo del cambio de volumen, se determina la velocidad ( $\frac{m}{s}$ ) y aceleración ( $\frac{m}{s^2}$ ), en la que ocurre este cambio, por lo que:

$$v = \frac{\Delta h}{dt} \quad \text{Ecuación 3.9.2}$$

Y la aceleración está dada por la diferencia de la velocidad final con respecto a la velocidad inicial  $v_2 - v_1$  en el mismo paso de tiempo en la que se desplaza el fluido  $t_2 - t_1$ , dando como resultado:

$$a = \frac{\Delta v}{dt} \quad \text{Ecuación 3.9.3}$$

La energía cinética de la columna a partir de los cambios de volumen de agua en movimiento está dada por:

$$EC = \frac{1}{2}mv^2 \quad \text{Ecuación 3.9.4}$$

Donde la masa es igual a:

$$m = \rho \cdot V_{agua} \quad \text{Ecuación 3.9.5}$$

Y la velocidad está dada por la Ecuación 3.9.2.

Sustituyendo la Ecuación 3.9.5 y Ecuación 3.9.2 en la Ecuación 3.9.4 podemos obtener la energía cinética en el centro de gravedad del fluido en cada paso de tiempo (J= 1 Newton\*m). De esta manera:

$$EC = \frac{1}{2}\rho V_{agua}v^2 \quad \text{Ecuación 3.9.6}$$

El cálculo de la potencia se obtiene de la cantidad de trabajo (Julios) que se realiza en un determinado tiempo (s), también se puede definir como el trabajo neto efectuado sobre una partícula será igual al cambio de la energía cinética de esa partícula (Julios/s =Watts), por lo que:

$$EP = \frac{\Delta EC}{dt} \quad \text{Ecuación 3.9.7}$$

Donde  $\Delta EC$  es igual al cambio de la energía cinética en el punto final e inicial de cada paso de tiempo  $\Delta t$ .

Para determinar la energía potencial del flujo de aire dentro del sistema se plantea que el caudal o flujo de aire de una sección a otra es igual, los cambios en el área de cada una de las secciones obligan la conservación mediante los cambios en la velocidad, por lo que partiendo de la ecuación de Bernoulli se tiene la siguiente ecuación:

$$Q_1 = Q_2 = v_1 * A_1 = v_2 * A_2 \quad \text{Ecuación 3.9.8}$$

Donde,  $v_1$  es la velocidad del flujo de aire dentro de la cámara de resonancia la cual es influenciada por los cambios en la altura del nivel de agua,  $A_1$  es el área de la sección transversal de la cámara de resonancia y  $A_2$  es el área del conducto donde se instalará la turbina. Despejando de la Ecuación 3.9.8 y dejando la velocidad en términos de área se obtiene:

$$v_2 = \frac{v_1 * A_1}{A_2} \quad \text{Ecuación 3.9.9}$$

Donde  $v_2$  representa la velocidad del aire dentro del conducto que conecta las 2 cámaras.

Al igual que la energía que puede ser transferida de la columna de agua, es necesario calcular la energía potencial del flujo del aire que puede ser transformado, para ello se ha tomado en cuenta las eficiencias reportadas para las turbinas de flujo bidireccional. Diferentes autores reportan eficiencias del rango de 50% a 60 % con respecto al flujo de aire incidente (Cui and Hyun 2016; Halder and Samad 2016)

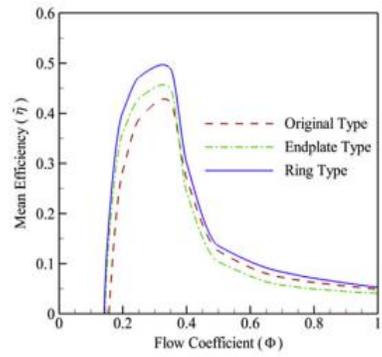
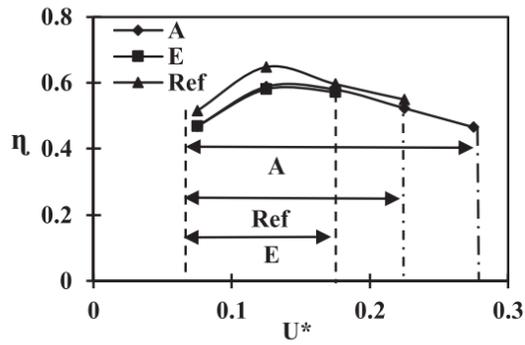


Figura 3.9.1. Eficiencia reportada para turbinas de flujo bidireccional, conformados por perfiles Naca. Obtenidas de (Cui and Hyun 2016; Halder and Samad 2016).

Por lo tanto se tiene un coeficiente que define la máxima cantidad de energía, para el cálculo de la energía potencial del flujo de aire se describe lo siguiente:

$$EP_{aire} = C_n \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad \text{Ecuación 3.9.10}$$

La energía potencial del aire  $EP_{aire}$  esta dada por un coeficiente de eficiencia  $C_n$  (para el caso de estudio se optó por usar un coeficiente del 60 %) multiplicado por la densidad del aire ( $\frac{kg}{m^3}$ ), por la superficie por la cual se desplaza el fluido ( $m^2$ ) y la velocidad del aire al cubo ( $\frac{m}{s}$ ).

## 4 Metodología

Este trabajo consiste en el modelado físico de un dispositivo de conversión de energía del oleaje por oscilación de la columna de agua (OWC). En este capítulo se describen las actividades realizadas para el diseño del dispositivo OWC-MDS, los experimentos realizados, y el análisis de las mediciones.

La metodología utilizada en este trabajo se puede dividir en tres etapas.

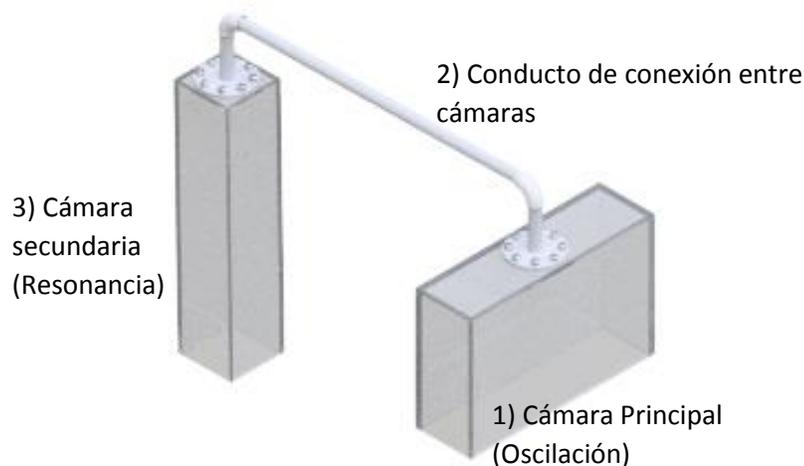
Etapa 1. Dimensionamiento del dispositivo propuesto a escala.

Etapa 2. Consistió en la construcción del modelo físico del dispositivo. Se describe los materiales utilizados y las herramientas empleadas para llevar a cabo la construcción.

Etapa 3. En ella se llevaron a cabo los ensayos en el modelo físico y el análisis de las mediciones sobre su desempeño.

### 4.1 Dimensionamiento del dispositivo.

El dispositivo propuesto para su análisis denominado OWC-MDS se muestra en la Figura 4.1.1. Este dispositivo consta de dos cámaras que contendrán el aire dentro del sistema, cada una de sección transversal diferente y por consiguiente volumen desigual. La conexión entre ellas se realiza a través de un conducto, lo cual permitirá el flujo de aire de una cámara a otra (ver sección 3.7.1). Por conveniencia se ha decidido que la cámara 1 sea nombrada como la cámara de oscilación y la segunda como la cámara de resonancia.



*Figura 4.1.1 Esquema del dispositivo OWC-MDS propuesto.*

Las dimensiones de los componentes del dispositivo OWC-MDS, se determinaron utilizando el equilibrio de fuerzas dinámicas ejercidas por la propagación del oleaje por encima del dispositivo, de acuerdo con la segunda ley de Newton.

Para esta propuesta se tomaron en cuenta las dimensiones del canal de oleaje del LIPC perteneciente al Instituto de Ingeniería UNAM (ver Figura 4.3.1), tales como el ancho, la capacidad de llenado y la capacidad de generación de oleaje, en el que fueron realizados los ensayos de laboratorio.

Considerando las fuerzas que rigen el sistema (ver sección 3.8), y utilizando la Ecuación 3.8.5 se pudo determinar la geometría del dispositivo.

$$\frac{(h_1 \cdot A_1)}{A_2} = h_2;$$

Donde  $h_1$  corresponde al nivel de agua dentro la cámara de oscilación,  $A_1$  y  $A_2$  son el área de la cámara de oscilación y resonancia respectivamente. La cámara de oscilación consistió una sección transversal de 120 mm de ancho y 450 mm de largo, con una altura de 305 mm, para adecuar las dimensiones al canal de olas. Para tener una referencia de las dimensiones que debería tener la cámara de resonancia se analizaron diferentes alturas de nivel en la cámara de oscilación. La oscilación propuesta se refiere a lo que se espera que la columna de agua alcance al momento del paso del oleaje y la respuesta esperada será el máximo del nivel de agua en la cámara de resonancia. Como se mencionó anteriormente, la cámara de resonancia deberá tener una sección menor para que existan diferencias de áreas y con ello producir la oscilación. En el presente trabajo se tomó una relación de uno a cuatro, es decir el área de la cámara de resonancia sería proporcional a una cuarta parte del área de la cámara de oscilación. Con las áreas propuestas, el siguiente paso fue determinar la altura de la cámara resonancia.

Tabla 4.1 Cálculo de los máximos de oscilación que podría alcanzar el sistema con la geometría de la cámara de oscilación propuesta.

Área ( $m^2$ )	CamOsc	Área ( $m^2$ )	CamRes	Propuesto		Respuesta Esperada
				Nivel (m)	CamOsc	Nivel CamRes (m)
0.054		0.0144		0.005		0.019
0.054		0.0144		0.010		0.038
0.054		0.0144		0.015		0.056
0.054		0.0144		0.020		0.075
0.054		0.0144		0.025		0.094
0.054		0.0144		0.030		0.113
0.054		0.0144		0.035		0.131
0.054		0.0144		0.040		0.150
0.054		0.0144		0.045		0.169
0.054		0.0144		0.050		0.188
0.054		0.0144		0.055		0.206
0.054		0.0144		0.060		0.225
0.054		0.0144		0.065		0.244
0.054		0.0144		0.070		0.263
0.054		0.0144		0.075		0.281
0.054		0.0144		0.080		0.300

La Tabla 4.1 muestra los resultados aplicando la Ecuación 3.8.5, en la primera columna se tiene el área de la cámara de oscilación igual a  $54 \text{ mm}^2$ , la segunda representa el área de la cámara de resonancia de  $14.4 \text{ mm}^2$ , en la tercera se tienen los máximos de variación de nivel de agua del oleaje incidente. Los valores fueron propuestos para estimar la altura de nivel de agua que se tendría con las áreas propuestas. En la última columna se tiene el resultado de los máximos niveles que el sistema puede alcanzar dependiendo de la oscilación propuesta.

Si en la cámara de oscilación el nivel de agua alcanza 80 mm, en la cámara de resonancia registrara una variación de 300 mm. Basado en estos resultados, se determinó la geometría de la cámara de resonancia, la cual resulto de 120 mm de ancho por 120 mm de largo y altura de 465 mm. Se optó por los 465 mm, debido a que se debe mantener un volumen de

aire dentro del sistema, por lo que si se tiene una oscilación de 300 mm se debe contemplar espacio para el volumen de aire y una distancia para que la oscilación suceda.

La Figura 4.1.2 representa la geometría del modelo propuesto para la experimentación en el canal de olas, donde la cámara de oscilación tiene las dimensiones de 120 mm x 450 mm x 305mm, y la cámara de resonancia es de 120 mm x 120 mm x 465 mm.

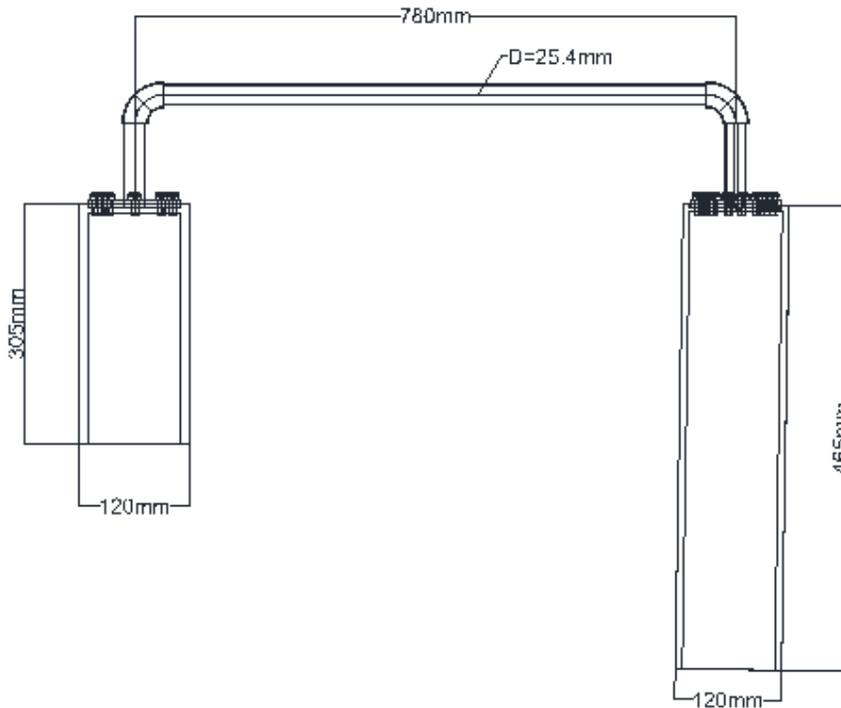


Figura 4.1.2 Esquema del diseño propuesto del dispositivo para la experimentación física.

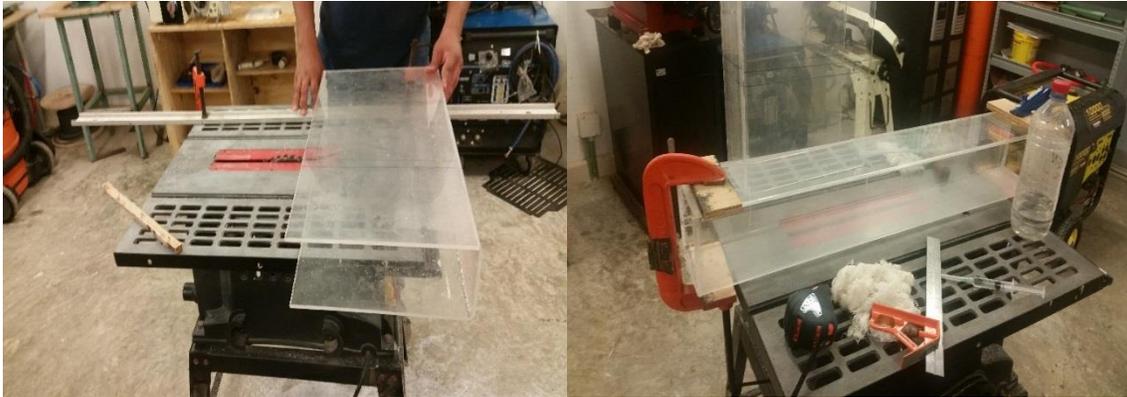
La separación de las cámaras se determinó a partir de la longitud de onda de 1.56 m correspondiente a un periodo de 1 s y una profundidad de 0.70 m. Para que la separación de la cámara de oscilación este justo en la cresta de la onda y en ese mismo momento la de resonancia en el valle, fueron separadas media longitud de onda. En este trabajo se optó por esa separación en el sistema pero puede ser cambiada para probar nuevas geometrías y condiciones de oleaje. Por otro lado, el conducto de unión tuvo una pulgada de diámetro, por conveniencia del transporte del flujo de aire.

## 4.2 Construcción del modelo físico

En esta etapa se describe la metodología de la construcción del modelo físico. Se explica cada una de las medidas tomadas para la ejecución del proyecto de construcción. También el tipo de material utilizado y las herramientas que fueron necesarias en el proceso.

El dispositivo OWC-MDS fue construido en acrílico transparente de 5mm de espesor, debido a la conveniencia de observar al interior de las cámaras la oscilación del agua. Asimismo las características de este material permitieron observar algunos problemas o deficiencias en la construcción al momento de experimentar y corregir oportunamente. El trabajo de construcción duró cuatro semanas, todos los trabajos se realizaron en el taller del Laboratorio de Ingeniería y Procesos Costeros (LIPC).

Para los cortes del material se utilizó una sierra circular de mesa, con la finalidad de obtener secciones precisas a 90° ya que se requería una estructura completamente hermética. Posteriormente, se unieron las piezas con un adhesivo polimerizable de máxima transparencia integrado por dos componentes principales (monómero de metil-metacrilato y catalizador dibutilftalato) que funciona como soldadura, ya que al hacer reacción química, las piezas a pegar terminan fundidas, para que de esta manera se forme una unión firme, resistente y hermética. En la Figura 4.2.1, se puede observar parte de la construcción de las cámaras, en la primera imagen (izquierda) se tiene la preparación con corte de la cámara de oscilación, la segunda imagen (derecha), muestra el proceso de unión de las partes de la cámara de resonancia, después de utilizar el pegamento se mantuvo la cámara con prensas para evitar los movimientos que pudiesen afectar en la hermeticidad de la cámara.



*Figura 4.2.1. Construcción del modelo físico, en la derecha se observa la preparación de la cámara de oscilación (corte con sierra de mesa) y en la izquierda la cámara de resonancia siendo pegada para lograr la hermeticidad.*

Una vez finalizada la construcción de las cámaras, se procedió a perforar en el centro de la parte superior de cada cámara donde fue colocado el conducto que las interconectaría. Para evitar fugas de aire en esas conexiones, se colocó un conector de PVC con una tuerca en el interior de la cámara y adicionalmente se cubrió con silicón de calidad industrial.

Para mantener la entrada de agua separada del fondo del canal, a cada a cada una de ellas, se le colocaron soportes de acrílico en la parte inferior. Para mantener a un mismo nivel la superficie de las cámaras, se colocaron soportes inferiores a las cámaras. En la Figura 4.2.2 se observa la configuración final de modelo OWC-MDS construido para las pruebas en el canal de oleaje.



*Figura 4.2.2. . Configuración final del dispositivo OWC-MDS. El cual consta de 2 cámaras de aire y un conducto por el cual pasara el flujo de aire.*

Con lo anterior se dio por concluido el proceso de construcción del modelo físico, para dar paso a la planeación y puesta en marcha de los experimentos en el canal de oleaje.

### 4.3 Modelado físico

En la etapa 3 se realizaron los ensayos del dispositivo. A continuación se explica cada una de las pruebas así como las consideraciones y montaje del experimento en el canal de oleaje. También se describen los sensores de medición que se utilizaron y la distribución de estos en el modelo.

Como se mencionó anteriormente este trabajo se enfocó en la experimentación del dispositivo OWC-MDS completamente sumergido. Por lo que fue necesario la implementación de una metodología para la realización de estos experimentos.

El desarrollo del experimento se llevó a cabo en el canal de oleaje del LIPC del Instituto de Ingeniería de la UNAM en la localidad de Sisal, Yucatán. El canal de oleaje tiene 40m de longitud, 0.80 metros de ancho y altura de 1 metro. El canal funciona con una pala mecánica instalada en un extremo del mismo, existe también una playa colocada a una distancia de 25.3 metros con respecto al pie de playa y cara de la pala mecánica.

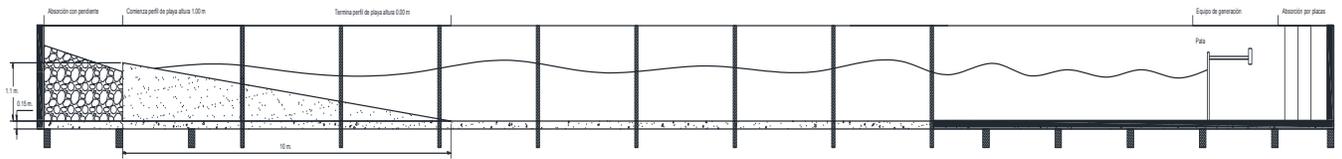
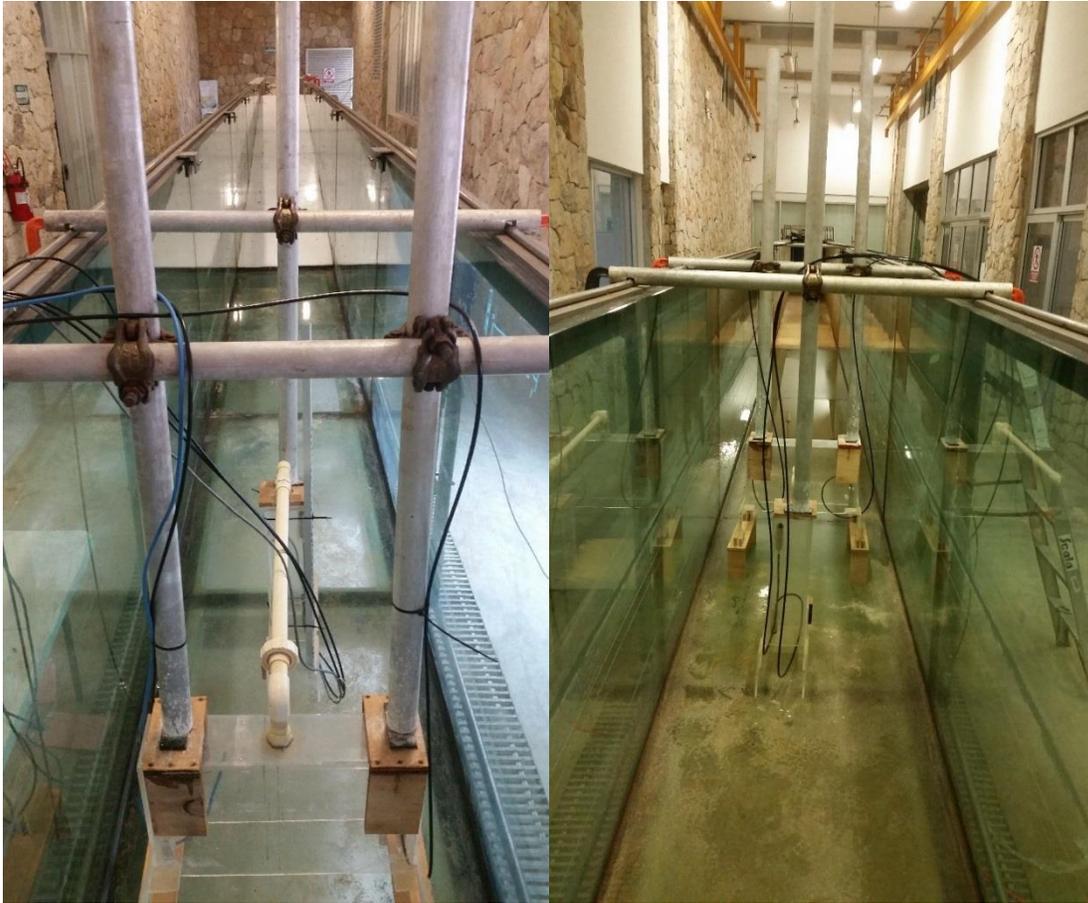


Figura 4.3.1. Esquema de la distribución del canal de oleaje del LIPC.

Para fines de los experimentos del dispositivo OWC-MDS, la máxima altura de agua en el canal de oleaje fue de 0.70 metros, esto con la finalidad de no sobrepasar el nivel máximo de llenado del canal.

#### 4.3.1.1 Instalación

El modelo experimental se instaló dentro del canal de oleaje con tubos de aluminio y abrazaderas de metal. Como se mencionó anteriormente, durante la construcción se colocaron soportes inferiores a cada una de las cámaras para mantener una separación respecto al fondo del canal. Los tubos se colocaron de manera vertical de arriba hacia abajo ejerciendo presión sobre las cámaras del dispositivo para vencer el empuje que generaba el aire contenido dentro de las mismas. (Figura 4.3.2)



*Figura 4.3.2 Colocación del modelo en el canal de olas, la sujeción del mismo es por medio de tubos de aluminio los cuales tan sujetos en los bordes del canal con prensas tipo "c".*

#### 4.3.1.2 Instrumentos de medición

Al concluir con la instalación del modelo en el canal, se colocaron sensores de presión S30X Keller®, los cuales trabajan de manera superficial y sumergida, en este caso dos sensores fueron instalados en la parte superior de las cámaras para medir la presión en el interior de la misma así como la variación durante las pruebas y dos más fueron instalados en la parte inferior por lo que estos permanecieron sumergidos; un sensor más fue instalado en el fondo del canal para medir la presión hidrostática. (Figura 4.3.4 )

En un principio, para registrar la oscilación dentro de las cámaras se colocó una regla graduada a un costado de las mismas con una resolución 0.5 centímetros y se instaló una cámara fotográfica fuera del canal para grabar la oscilación de la columna de agua, sin embargo, la calidad de la imagen no permitió obtener resultados precisos debido a que la claridad del agua no era adecuada, por lo cual, se decidió colocar sensores ultrasónicos de

nivel, los cuales, fueron construidos en el laboratorio con una tarjeta electrónica Arduino UNO.



*Figura 4.3.3 Graduación de la regla para la medición de la oscilación de la columna de agua. Sensor ultrasónico utilizado para medir la variación en la columna de agua*

En total se utilizaron cinco sensores de presión, de los cuales dos sirvieron para medir la presión del aire y otros dos para la presión del agua dentro de las cámaras, el último fue colocado fuera de la cámara para medir la variación de la presión hidrostática. Dos sensores ultrasónicos fueron colocados dentro de las cámaras para medir la oscilación de las columnas de agua y se utilizaron dos sensores de resistividad eléctrica para medir la variación de la superficie libre del oleaje incidente. En la Figura 4.3.4 se muestra la ubicación de cada uno de los sensores utilizados para el experimento.

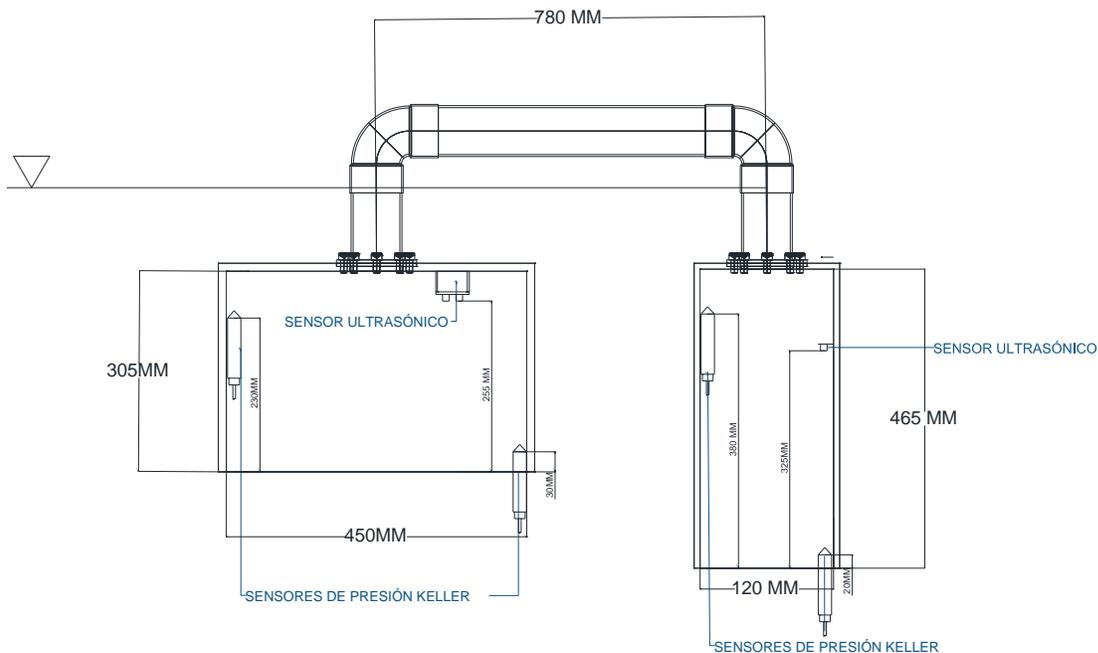


Figura 4.3.4. Distribución de los sensores utilizados en el modelo para la experimentación en el canal de olas.

La lectura de datos con los sensores de presión S30X se efectuó con el programa CCS30 (por su nombre en inglés “Control Center Serie 30”), proporcionado por el fabricante. En él se configuraron y se calibraron cada uno de los sensores, la calibración fue comprobada en un contenedor con profundidad de agua conocida de acuerdo a lo siguiente: La posición del sensor dentro del contenedor se reubicaba cada 10 cm y se comprobaba que los datos obtenidos fueran los esperados, este procedimiento fue hecho en cada uno de los sensores. Un problema que se detectó para este tipo de sensores durante la calibración, fue que al estar sumergidos con la membrana del sensor hacia abajo, se formaba una burbuja de aire la cual afectaba la correcta lectura de los datos; lo recomendable es manejarlos de manera vertical o en su caso inclinar el sensor 90° dentro del agua y después colocarlo en su posición final para expulsar la burbuja de aire (Figura 4.3.5). También es importante la revisión de los sensores para la calibración, ya que estos vienen calibrados de fábrica y puede variar según la orientación del sensor, es decir, si el sensor apunta hacia arriba o hacia abajo generan diferentes medidas, provocando datos erróneos. Los sensores tuvieron un interface por medio de un sistema de conexión de puertos múltiples. El rango de medición para este tipo de sensores va de 0.0 a 1000.0 mbar.



*Figura 4.3.5. Sensor de presión S30X Keller®, utilizado para la experimentación, se puede observar la membrana dentro del conducto del sensor, debido a eso es posible que se genere la burbuja de aire al estar sumergido.*

Con respecto a los sensores ultrasónicos para obtener datos de nivel se realizó la programación en la plataforma Arduino UNO. La distribución de los dos sensores, fue de tal manera que trabajaran en una misma tableta, de esta manera se obtuvo una serie de datos de variación de altura para cada una de las cámaras y el intervalo de tiempo. Este tipo de sensores trabajan con señales acústicas y constan de dos componentes, el primero emite una señal acústica y el segundo es el receptor, la manera en que calculan la distancia es a partir del tiempo de respuesta que tiene la señal emitida, y se mide el tiempo que tarda la señal emitida en llegar al receptor después de ser interrumpida por algún objeto, que en nuestro caso fue la columna de agua.



*Figura 4.3.6. Sistema Arduino utilizado para la captura de datos de nivel (derecha). Vista interior de la cámara de resonancia donde se puede observar la ubicación del sensor ultrasónico y los sensores de presión.*

De igual manera se utilizaron sensores de superficie libre, estos sensores son varillas de metal con una resistividad conocida, al estar sumergido dentro del agua su resistencia cambia directamente proporcional a la longitud sumergida, por lo cual si se conoce la intensidad y el voltaje, se puede calcular la resistencia que será la variación de la altura del agua. Para convertir la resistencia obtenida a nivel de agua, se llevó a cabo una calibración donde se incrementaba el nivel de agua y se registraban los valores, de esta manera los datos de la experimentación fueron multiplicados por el factor calculado. Se utilizaron 2 sensores de este tipo con los que se obtuvieron los registros para cada una de las pruebas realizadas Figura 4.3.7.



*Figura 4.3.7. Colocación de sensores de resistividad eléctrica para la obtención de datos de superficie libre.*

Teniendo el arreglo final del modelo ( Figura 4.3.8), la instalación en el canal de oleaje y la colocación de los sensores, se procedió a realizar cada una de las pruebas propuestas. Esto con el fin de obtener datos que se utilizaron para el análisis y la obtención de los resultados.



*Figura 4.3.8. Configuración final del modelo físico, se observa la instalación de los sensores de presión y ultrasónicos.*

#### *4.3.1.3 Casos simulados*

El experimento consistió en colocar el dispositivo dentro del canal de oleaje del LIPC, y llenar con un tirante de agua de 0.70 m para que las 2 cámaras estuvieran sumergidas (ver Figura 4.3.9). Cuando el dispositivo estuvo en posición, se realizaron pruebas con oleaje monocromático. Cada prueba consistió en someter al dispositivo a una condición de oleaje específico en altura y periodo. De estas condiciones se observó la capacidad de respuesta del dispositivo, lo cual se reflejó en la oscilación de las columnas de agua.

El dispositivo se instaló dentro del canal de oleaje con una separación del fondo de 100 mm para la cámara de resonancia y 270 mm de separación en la cámara de oscilación como se puede ver en la Figura 4.3.9, con estas cantidades se obtuvo un nivel de agua conveniente dentro de las cámaras. De esta manera al estar las cámaras completamente sumergidas y herméticas retienen un volumen de aire, susceptible a ser utilizado para extraer energía con la generación del flujo de aire dentro del sistema.

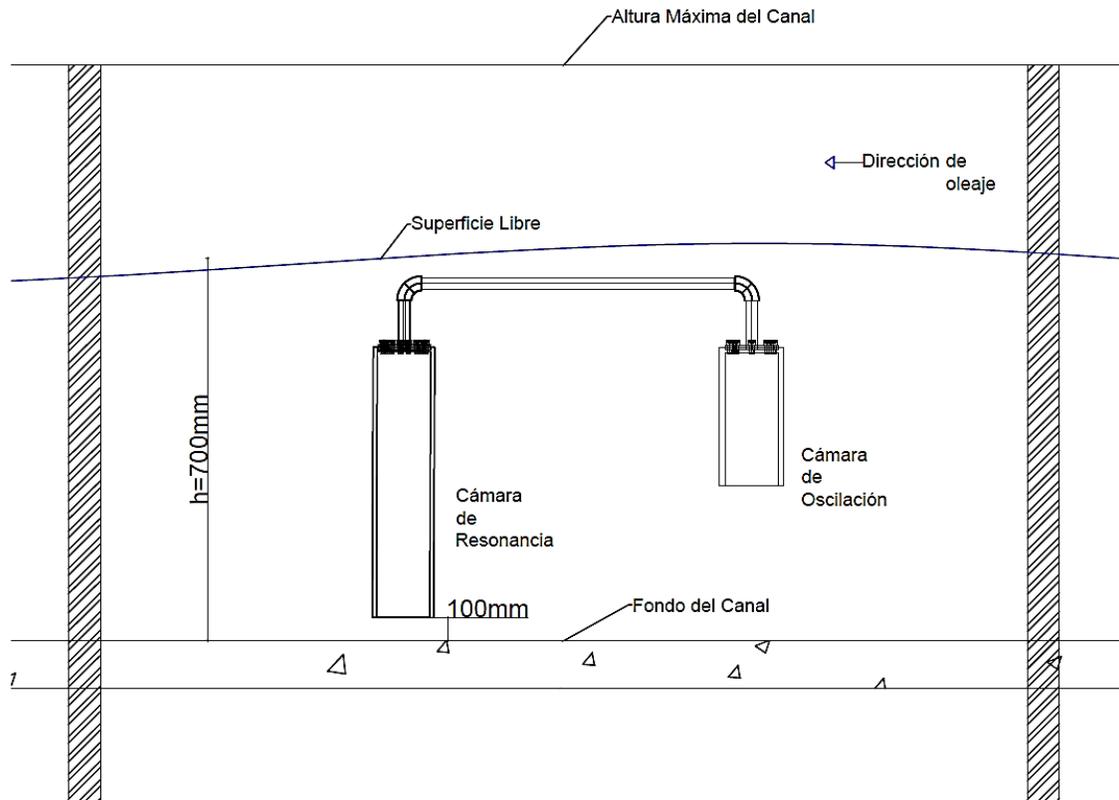


Figura 4.3.9. Diagrama de colocación del modelo en el canal de oleaje.

Los casos consistieron en modificar las características del oleaje (H y T) para determinar la altura de la columna de agua dentro de las cámaras de aire. Lo anterior permitió determinar la configuración ideal del dispositivo con relación a la altura de ola y periodo. Las diferentes configuraciones de oleaje para el experimento se muestran en la Tabla 4.2:

Tabla 4.2 Configuración de los experimentos realizados. La primera columna se representa las alturas de ola. La segunda los periodos del oleaje.

Alt de ola H(cm)	Periodo (s)	Nomenclatura
10	1, 1.5, 2, 3	t1-H10, t1.5-H10, t2-H10, t3-H10
15	1, 1.5, 2, 3	t1-H15, t1.5-H15, t2-H15, t3-H15
20	2, 3	t2-H20, t3-H20

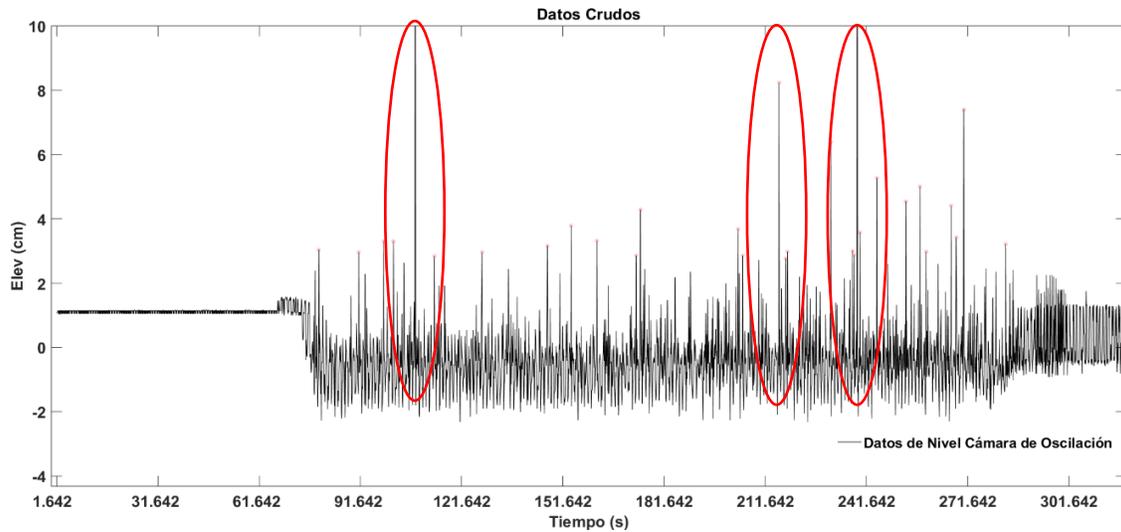
## 5 Resultados y Discusiones

Se presentan los resultados de la experimentación así como el análisis de la información obtenida en cada una de las pruebas realizadas, también se comparan los resultados de las pruebas y se destaca cuál de todas ellas presentó los mejores resultados. Se hace la comparación de las alturas de oscilación alcanzadas y la energía potencial teórica aprovechable.

### 5.1 Experimentación en el canal de oleaje

Como resultado de la experimentación en el canal de oleaje, se obtuvieron para cada evento la serie de datos correspondientes a los cinco sensores de presión y los dos sensores de nivel. Para obtener la suficiente confiabilidad en las pruebas y los datos tomados, se realizaron tres sesiones de oleaje, es decir se tiene para un mismo caso tres series de datos para cada uno de los sensores utilizados.

Lo primero que se observó en la captura de los datos, fue que en algunos de los experimentos, en la señal existían picos en la elevación de la columna de agua. La Figura 5.1.1 muestra los datos obtenidos de los sensores de nivel ultrasónico. Los círculos marcados en rojo, exponen picos que representan ruido en la señal. Esto es claro, debido a que se tenían elevaciones entre los rangos de los 2 centímetros y los sensores registraron picos de hasta 10 centímetros por encima del promedio de los datos.



*Figura 5.1.1. Datos crudos obtenidos por el sensor de nivel ultrasónico. Se observa en las regiones marcadas con los círculos rojos los picos de elevación derivados de la turbulencia en la superficie del agua dentro de las cámaras.*

Dado lo anterior, se realizó una limpieza a la señal de los datos obtenidos con los sensores ultrasónicos. Dicha limpieza consistió en reducir los picos en la señal medida aplicando funciones de suavizado y reducción de picos, adicionalmente se calculó una señal teórica la cual se ajustó a la señal medida.

Este ajuste se realizó para cada una de las series de datos obtenidas en cada prueba. La Figura 5.1.2 se presenta como ejemplo de la señal ajustada comparada con la señal medida para una de las pruebas, la señal de ajuste o curva teórica fue diferente para cada una de las pruebas ya que se utilizó como base una función sinusoidal en la cual se modificó la amplitud y el periodo dependiendo a la señal que se registró en cada prueba. En la mayoría de los casos, la señal con más datos erróneo (ruido) fue la registrada en la cámara de oscilación, al generarse el movimiento del agua, se formaba una especie de turbulencia por el movimiento de la columna de agua, provocando ruido en los sensores acústicos y mediciones con elevaciones por encima del valor real.

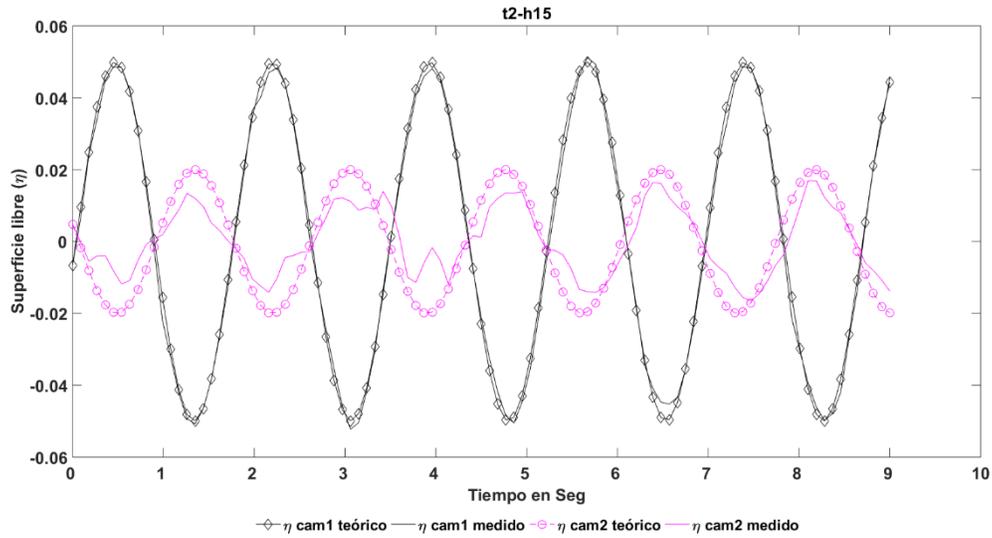


Figura 5.1.2. Serie de datos medidos comparados con los datos de ajuste, después de haber realizado la limpieza y la reducción de picos de sobreelevación.

Una vez se limpió la señal de la oscilación y se ajustó se tomaron todos los datos de las series de oscilación que correspondían al mismo caso y se obtuvo el promedio para cada caso.

A partir de lo anterior se logró identificar los casos en los que el dispositivo presenta un mejor rendimiento. De igual manera se obtuvieron los valores de las mayores oscilaciones relacionados con las alturas de ola incidente y periodo, así como los cambios en las presiones de aire dentro de las cámaras.

Con la información obtenida en la experimentación se logró cuantificar la energía potencial que el dispositivo es capaz de aprovechar. Los resultados que a continuación se presentan, fueron obtenidos aplicando las ecuaciones descritas anteriormente, sustituyendo las variables de cada una de las pruebas realizadas.

## 5.2 Resultados del modelado físico

Como ejemplo de lo realizado en cada experimento se muestra la Figura 5.2.1 donde se tiene el dispositivo OWC-MDS instalado en el canal de oleaje, en el panel superior izquierdo se observa el momento en que la cresta de la onda esta encima de la cámara de oscilación. En el panel superior derecho y panel inferior izquierdo muestra el traslado de la onda hacia la cámara de resonancia. Finalmente en el panel inferior derecho se observa la cresta de la onda cuando pasa justo encima de la cámara de resonancia y el valle de la onda en la cámara de oscilación, así mismo se observan los cambios en los niveles internos de agua o la oscilación de la columna de agua dentro de las cámaras. El experimento mostrado en la Figura 5.2.1 corresponde a un oleaje de 10 centímetros y periodo de 1 segundo.

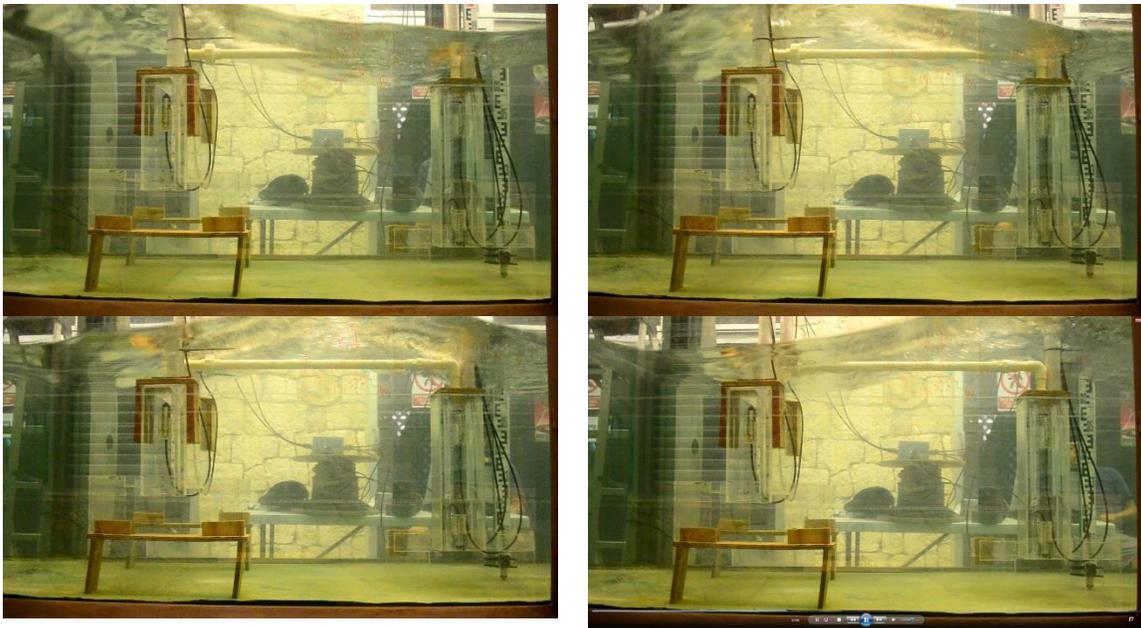


Figura 5.2.1 Experimento desarrollado en el canal de olas. Se observa el comportamiento del dispositivo OWC-MDS.

### 5.2.1 Datos de Presión

La experimentación y captura de datos inicia con el llenado del canal de olas. De los datos de presión se observa que al ir aumentando el nivel del agua durante el llenado, la presión en los sensores que se encontraban dentro de las cámaras correspondían a la presión atmosférica la cual se mantenía constante hasta que el agua alcanzó el límite inferior de las cámaras y la presión empezó a aumentar de manera gradual con la profundidad de llenado. En la Figura 5.2.2 se observa que la presión de aire en las dos cámaras aumenta en la misma proporción, siendo esto importante ya que indicó que el modelo estaba

adecuadamente instalado y que las presiones se mantendrían iguales hasta que algún elemento (convertidor o turbina) los cambie de fase e intensidad.

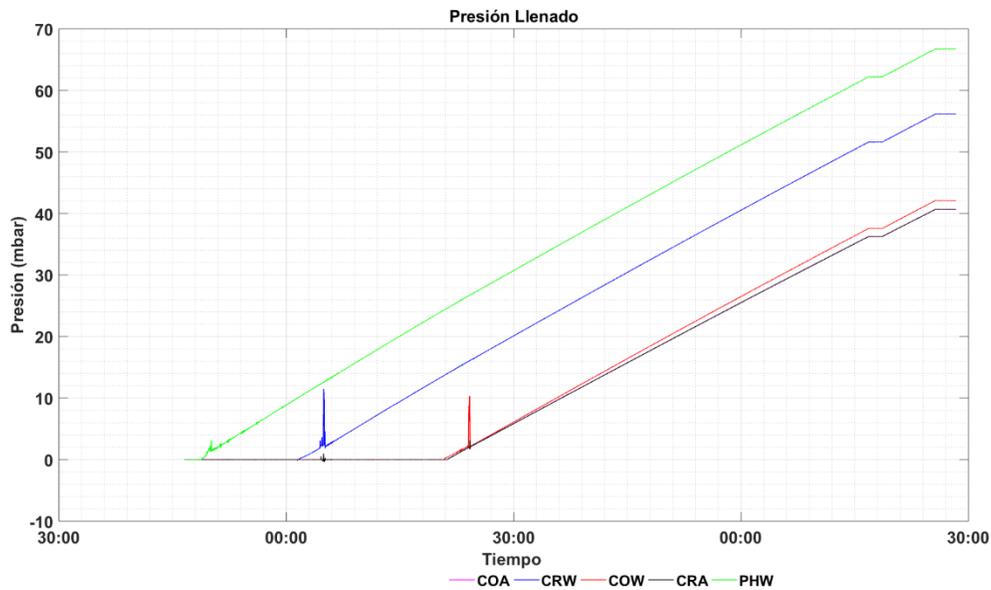


Figura 5.2.2 Variación de las presiones del dispositivo medida con los sensores Keller durante el llenado del canal de oleaje.

Como ejemplo del análisis de los datos de presión se muestra la Figura 5.2.3, que corresponde a los datos de cada uno de los sensores del experimento con periodo de 2 segundos y altura de 15 centímetros. La línea magenta representa la variación de presión por el paso del oleaje o bien por los cambios en el nivel de la superficie libre (PHW), la línea azul la variación de presión a causa de los cambios del nivel de agua dentro la cámara de resonancia (CRW), la verde los cambios de presión dentro de la cámara de oscilación (COW), la roja y la negra (COA y CRA) representan la variación de presión dentro de la cámara de oscilación y resonancia con aire respectivamente (ver Tabla 5.1). Con esta información se encontró que para la cámara de oscilación y resonancia la amplitud y la fase de las presiones de aire se conservan, demostrando de esta manera el comportamiento y la conservación de la energía en el sistema.

Tabla 5.1.- Tabla de Nomenclatura de los sensores, para la interpretación de las gráficas de presiones.

Sensor	Símbolo	Color	Descripción
PHW	-°-	Magenta	Presión Hidráulica de la columna de agua total.
CRW	-☆-	Azul	Presión de agua en el interior de la Cámara de Resonancia
COW	-+-	Verde	Presión de agua en el interior de la Cámara de Oscilación
COA	-*-	Roja	Presión de Aire en el interior de la Cámara de Oscilación
CRA	-◇-	Negra	Presión de Aire en el interior de la Cámara de Resonancia

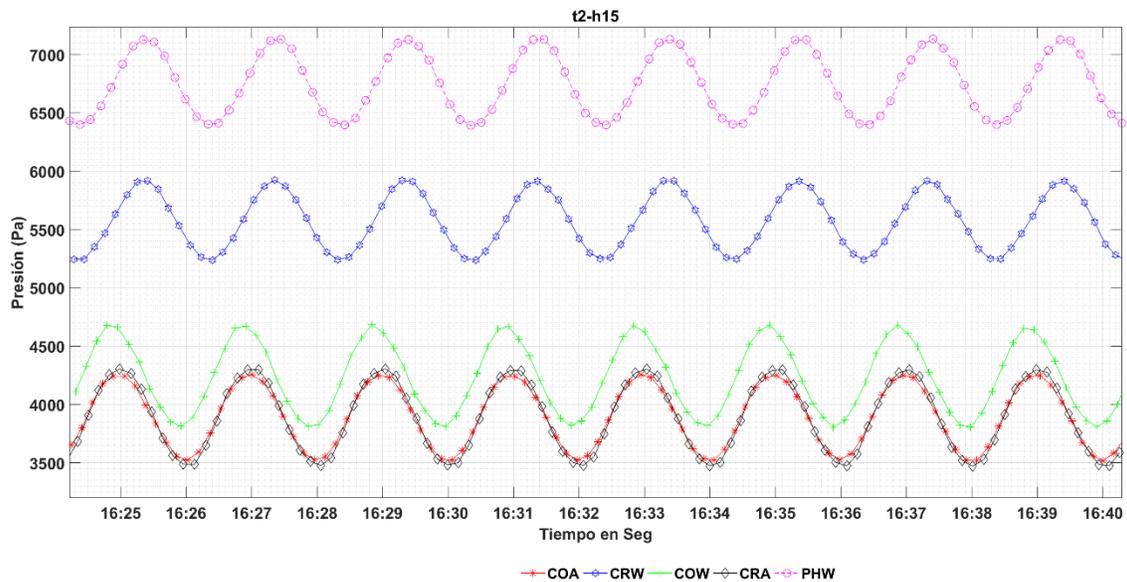


Figura 5.2.3. Datos de presión para la prueba correspondiente a 2 segundos de periodo y 15 centímetros de altura de ola.

Un problema que se presentó en la experimentación fue la resolución o tiempo de respuesta de los sensores ya que para las pruebas de periodos cortos (1 y 1.5s), la frecuencia de muestro (10 ms) fue muy corta con respecto a la frecuencia de respuesta del dispositivo. Un ejemplo de esto se muestra en la Figura 5.2.4, donde oleaje de 1 segundo y altura de 10 centímetros distorsionan las mediciones de la presión de aire (COA y CRA). Se observa que los datos para la presión de aire se desfasa y los datos se ven afectados para la

velocidad de la respuesta del sistema y la frecuencia del muestro de los sensores. Sin embargo, estos resultados son un buen ejemplo gráfico del funcionamiento del sistema, y por lo tanto son útiles para definir la eficiencia del dispositivo para oleaje de periodos cortos.

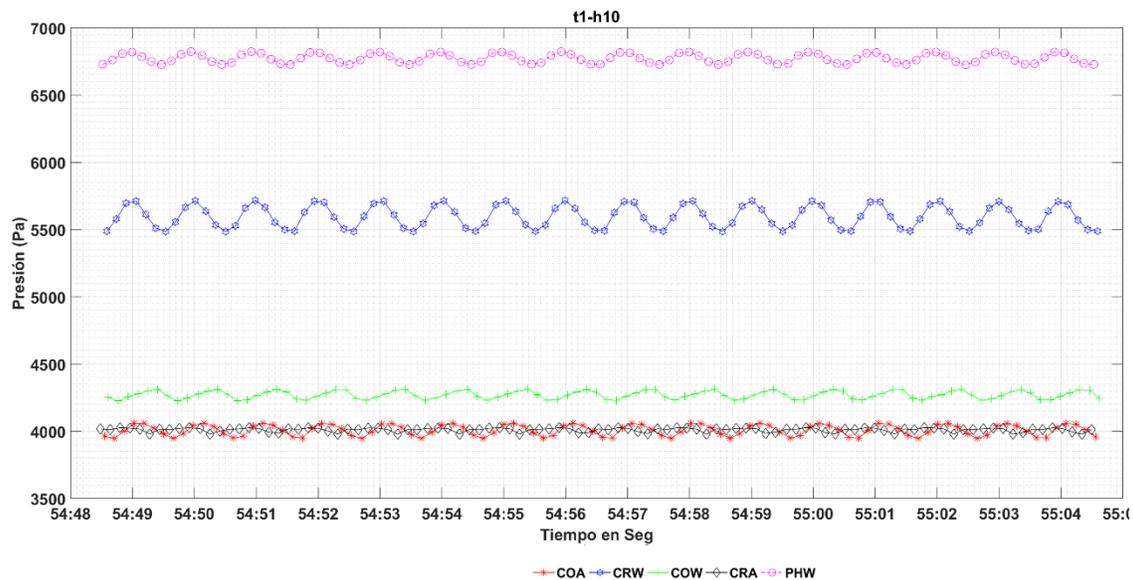


Figura 5.2.4 Datos de presión experimento con periodo de 1 segundo y altura de 10 cm.

### 5.2.2 Variación de nivel de agua

La variación del nivel de agua de las columnas oscilantes, fueron registrados con los sensores ultrasónicos dentro de cada una de las cámaras.

Como se mencionó anteriormente, algunos de los datos resultaron con cierto ruido por lo que fue necesario una revisión y limpieza de los mismos en cada prueba, de esta manera, se obtuvo una curva sinusoidal de ajuste. En la Figura 5.2.5 se muestra como ejemplo el ajuste realizado a los datos de la prueba correspondiente a  $H=10$  cm y periodo de 1 s, las líneas continuas representan los datos de la señal registrada con los sensores ultrasónicos y la señal con marcadores representan los datos teóricos a los cuales se ajustó cada señal. Con respecto a los colores, el negro representa a la cámara de resonancia y el magenta representa los datos de la cámara de oscilación.

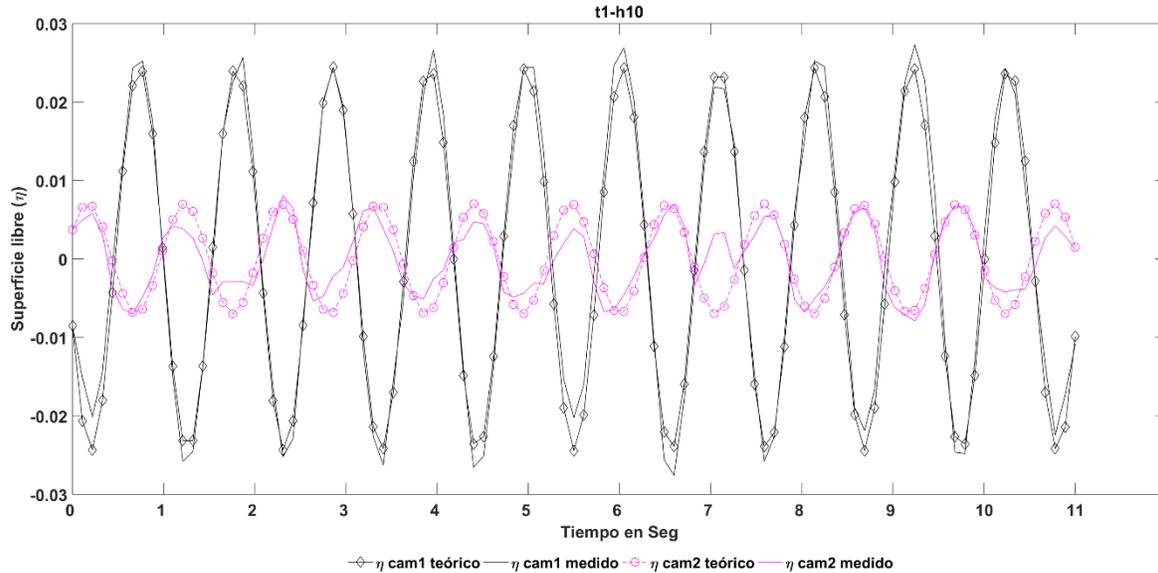


Figura 5.2.5 Datos y ajuste realizado a la señal de variación del nivel de agua, experimento ( $t=1$ ,  $H=10$ ).

Una vez que se eliminó el ruido, se ajustó y posteriormente se obtuvo el máximo de oscilación para cada una de las pruebas lo cual es el dato buscado para el análisis de eficiencia del dispositivo.

En resumen, los sensores ultrasónicos fueron una opción efectiva ya que se obtuvieron registros valiosos para completar el análisis del funcionamiento del dispositivo y la eficiencia del mismo. Por lo que es una herramienta recomendable tomando en cuenta las consideraciones antes mencionadas.

### 5.3 Máximos de oscilación

Como resultado de la experimentación se presenta la Figura 5.3.1 donde se muestran las variaciones del nivel de agua dentro de cada una de las cámaras, en esta figura se puede observar y comparar visualmente los máximos de oscilación alcanzados en la cámara de resonancia para los distintos experimentos.

Como se puede observar, el experimento que tuvo la mayor respuesta de oscilación corresponde a la prueba del ensayo con periodo de 2 s y 20 centímetros de altura de ola. Se observa que el máximo de oscilación en promedio fue de aproximadamente 13 centímetros, es decir, la columna de agua tuvo una amplitud de 6.5 centímetros en relación a su nivel estático. Este desplazamiento de la columna de agua ocurrió en respuesta a los cambios de presión y de nivel producido por la ola incidente. Estos resultados permiten

decidir cuál de las configuraciones puede ser de mayor importancia o con cual se puede lograr el mayor aprovechamiento de energía del sistema.

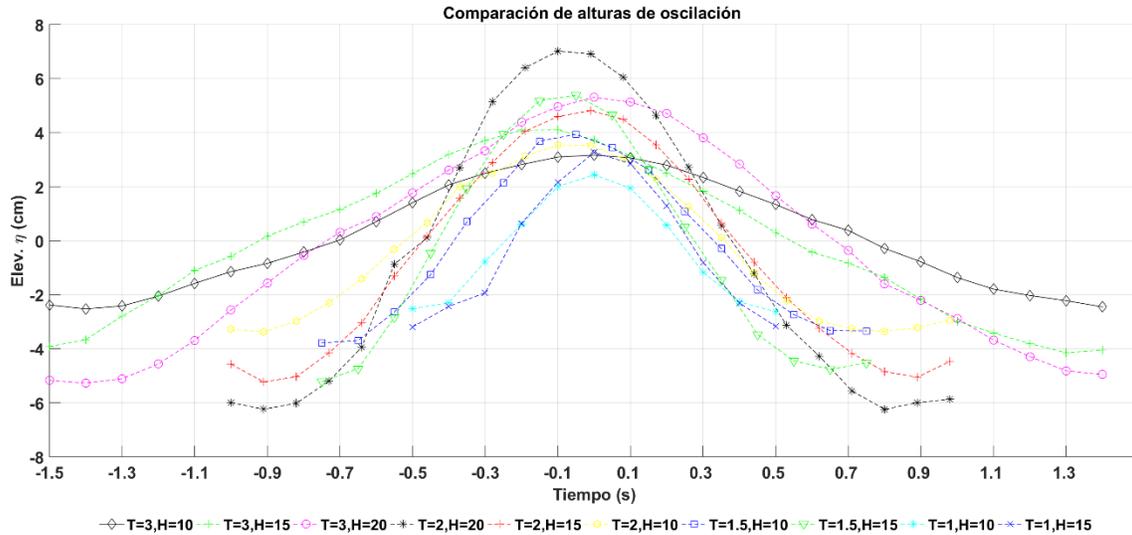
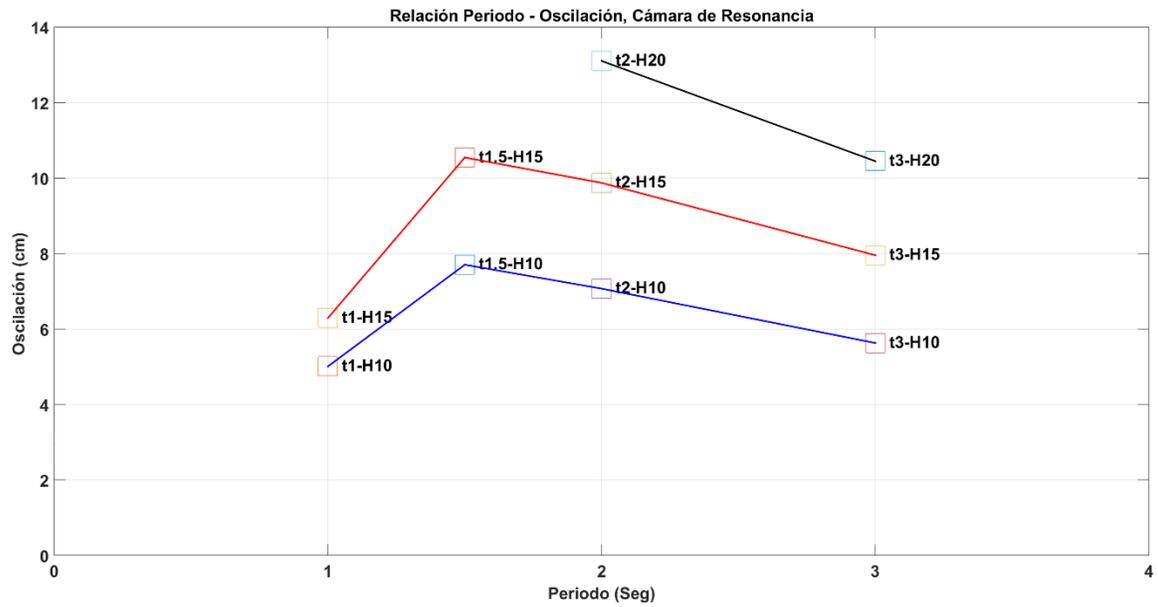


Figura 5.3.1 Variación máxima de oscilación en cada uno de los ensayos.

Con la finalidad de conocer la relación de la oscilación en las cámaras con respecto al periodo y altura de ola se obtuvo el máximo de oscilación de cada experimento y se realizó una gráfica (Figura 5.3.2) donde se dibujó una curva para una misma altura de ola y se relacionaron los máximos de oscilación con el periodo de ola. En el panel (a) se muestran los resultados de la cámara de resonancia donde se observa una tendencia a incrementarse la oscilación conforme se aumenta el periodo y la altura de ola, sin embargo la tendencia alcanza el máximo para periodos entre 1.5 y 2 segundos y desciende en las pruebas de 3 segundos. En el panel b) se muestra la relación de la oscilación con la altura de ola en función del periodo, nuevamente se observa una tendencia en alcanzar los máximos de oscilación en las pruebas con periodo de 1.5 segundos. Tomando como referencia los datos obtenidos en laboratorio y expresados gráficamente, se realizó el cálculo del periodo de máxima resonancia en base a la metodología explicada por Michael McCormick (McCormick 2007), dando como resultado que el periodo de oscilación natural del dispositivo es de 1.49 segundos (ver anexo 7.1), que comparado con los resultados de la experimentación, la mayoría de los casos cumplen con esa tendencia de máximos en periodos de 1.5 segundos.

a)



b)

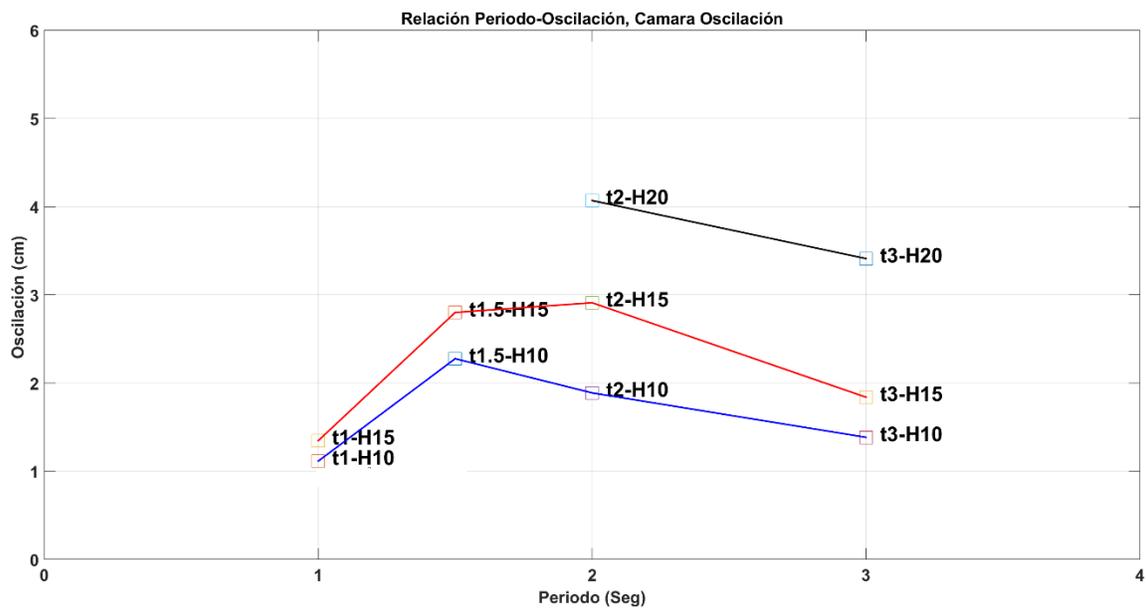


Figura 5.3.2. Panel a) Relación de máximos de oscilación, período y altura de ola (cámara de resonancia). Panel b) Relación de máximos de oscilación, período y altura de ola (cámara de oscilación).

## 5.4 Dinámica y energía de la columna de agua en las cámaras de oscilación

Para determinar la eficiencia del dispositivo se analizaron los datos registrados de oscilación en cada una de las cámaras del dispositivo. Para ello se presentan los resultados de los experimentos donde se obtuvieron las máximas oscilaciones (T2-H20, T3-H20 y T1.5-H15) donde se calculó la variación de volumen, velocidad, aceleración.

En primer lugar se calculó la variación del volumen con respecto al tiempo (Ecuación 3.9.1), posteriormente se determinó la velocidad y aceleración de desplazamiento tomando en cuenta la posición del nivel de agua en cada paso de tiempo (Ecuación 3.9.2 y Ecuación 3.9.3) y finalmente el cálculo de la energía cinética y energía potencial (Ecuación 3.9.6 y Ecuación 3.9.7).

### 5.4.1 Experimento T2-H20

En la Figura 5.4.1, panel a) se presentan los datos de la variación de la superficie libre dentro de la cámara de oscilación, para el experimento con oleaje de  $H=20$  cm y  $T=2$  s el máximo registrado fue de 1.9 cm de amplitud. En el panel b) se muestra el volumen de agua desplazada, el cual es obtenido a partir de la variación del nivel en cada paso de tiempo y el área transversal de las cámaras, dando como resultado un volumen de aproximadamente 2 l. En el panel c) se muestra la velocidad de desplazamiento del fluido a consecuencia del paso del oleaje siendo de  $0.21 \frac{m}{s}$ , y finalmente en el panel d) La aceleración, en la cual se puede observar que la máxima fue de  $0.74 \frac{m}{s^2}$ .

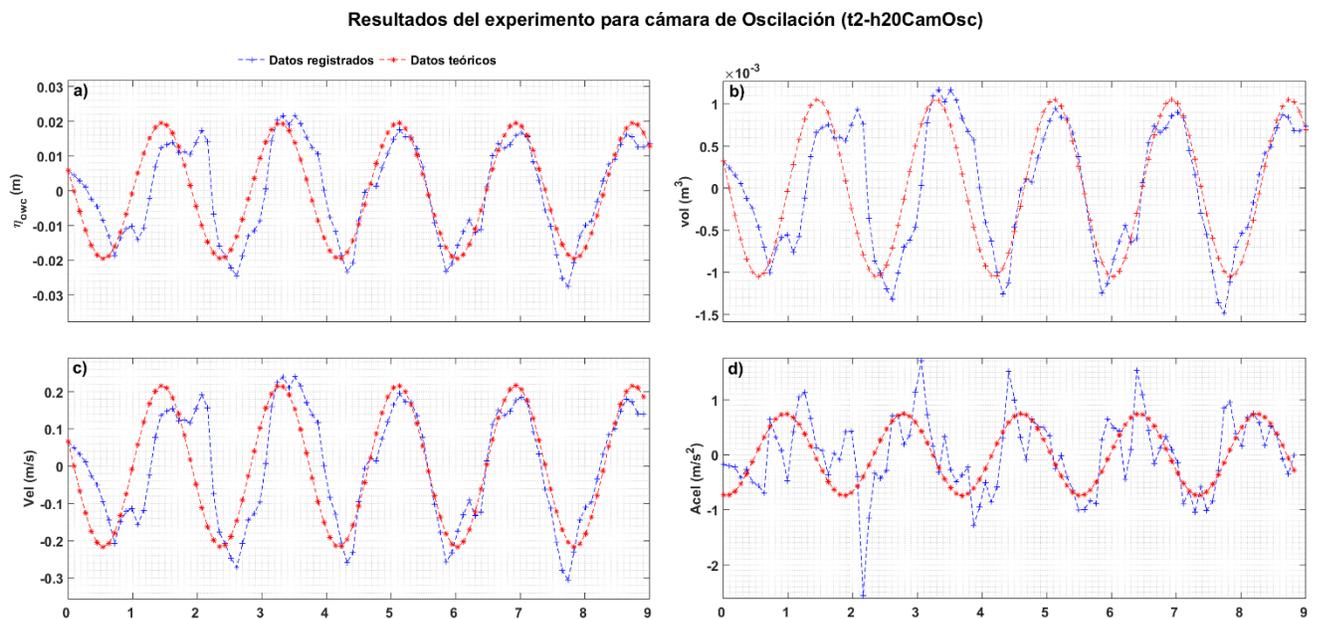


Figura 5.4.1 Resultados del experimento  $H_s=20$ ,  $T=2$  s, para la cámara de oscilación.

En la Figura 5.4.2 se muestran las mismas graficas descritas anteriormente solo que corresponden a la cámara de resonancia. Panel a) variación del nivel de agua (6.2 cm máximo de amplitud). Panel b) Volumen desplazado (1.8 lts), panel c) velocidad de desplazamiento siendo esta de  $0.69 \frac{m}{s}$  y finalmente, panel d) aceleración ( $2.3 \frac{m}{s^2}$  máxima)

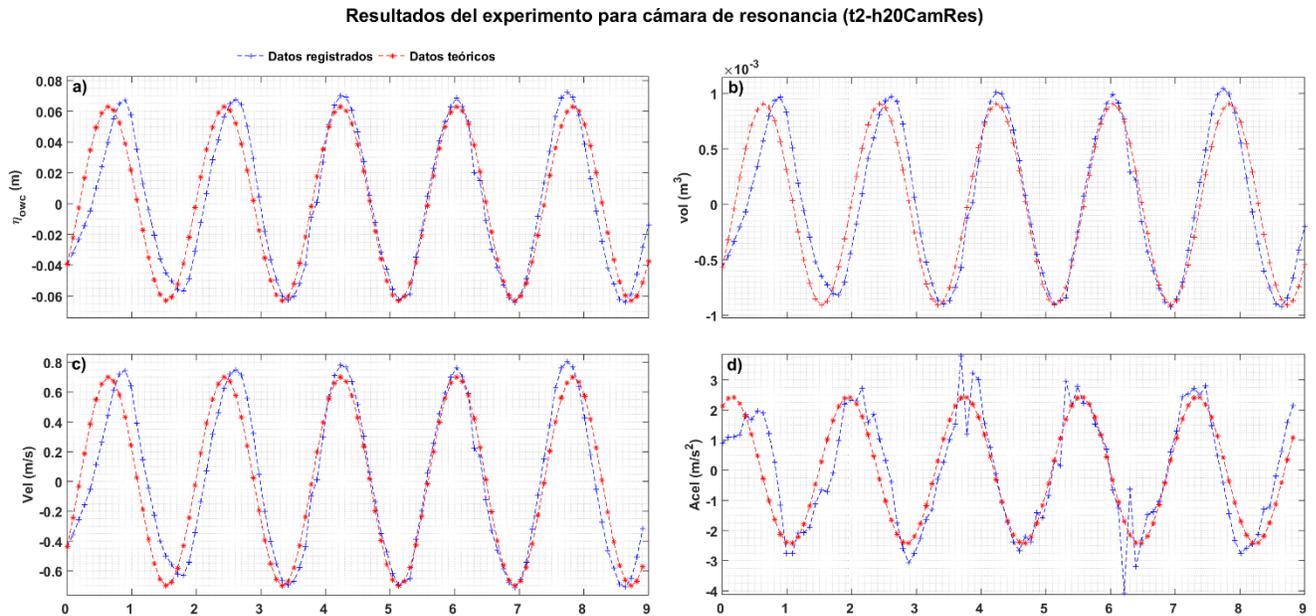


Figura 5.4.2. Resultados de la oscilación de agua para el experimento  $H_s=20$  cm y  $T=2$  s.

#### 5.4.2 Experimento T3-H20

De igual manera que la gráfica anterior la Figura 5.4.3 presentan los datos de la prueba T3-H20 en la cámara de oscilación, panel a) oscilación de la columna de agua (2 cm de amplitud), panel b) volumen de agua desplazada (2.16 lts), panel c) la velocidad de desplazamiento (máximo de  $0.18 \frac{m}{s}$ ) y finalmente panel d) aceleración de  $0.36 \frac{m}{s^2}$ .

Resultados del experimento para cámara de Oscilación (t3-h20CamOsc)

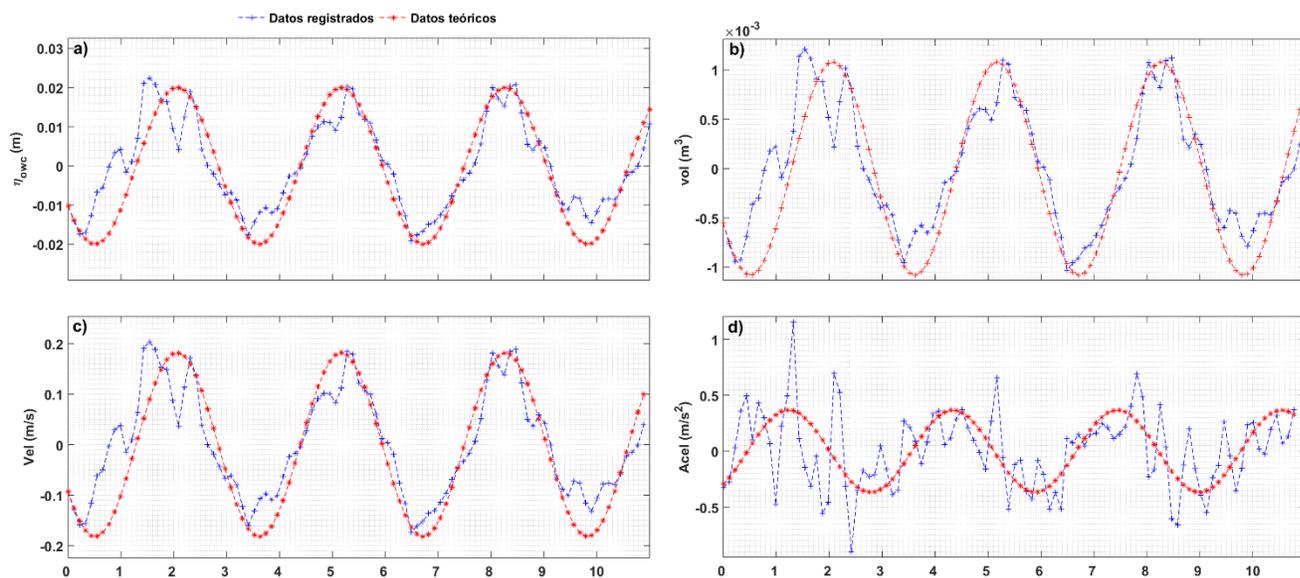


Figura 5.4.3 Resultados para la cámara de oscilación registrados y calculados durante el experimento  $H_s=20$  y  $T=3s$ .

Los resultados en la cámara de resonancia se muestran en la Figura 5.4.4, el panel a) variación de la columna de agua (4.9 cm de amplitud), panel b) volumen de agua (1.4 lts), panel c) velocidad ( $0.45 \frac{m}{s}$ ) y por ultimo panel d) aceleración ( $0.89 \frac{m}{s^2}$ ).

Resultados del experimento para cámara de resonancia (t3-h20CamRes)

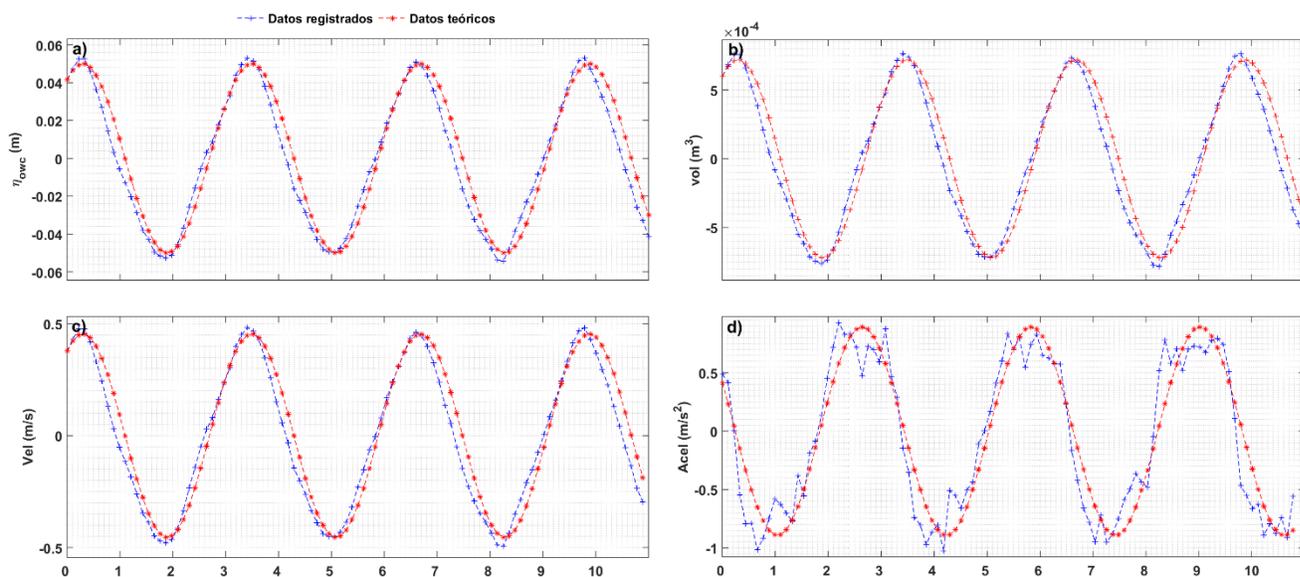


Figura 5.4.4. Resultados para la cámara de resonancia para el experimento correspondiente a  $H_s=20cm$  y  $T=3s$ .

### 5.4.3 Experimento T1.5-H15

Finalmente, el último ejemplo corresponde a la prueba T1.5-H15. Panel a) oscilación de la columna (1.7 cm), panel b) volumen de agua (1.9 lts), panel c) velocidad ( $0.16 \frac{m}{s}$ ) y panel d) aceleración ( $0.6 \frac{m}{s^2}$ ).

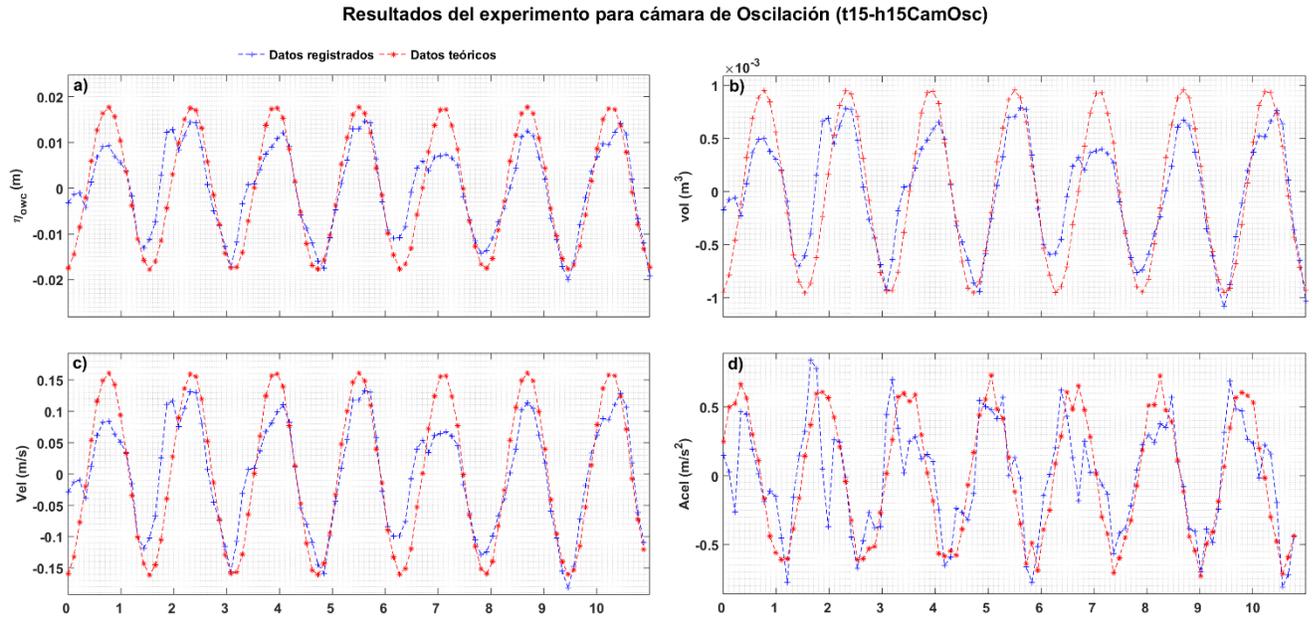


Figura 5.4.5 Resultados registrados y calculados del experimento correspondiente a  $H_s=15$  y  $T=1.5s$ , para la cámara de oscilación.

Para la cámara de resonancia se presenta la Figura 5.4.6, panel a) variación de nivel (5.8 cm), panel b) volumen (1.6 lts), panel c) velocidad ( $0.52 \frac{m}{s}$ ) y panel d) aceleración ( $2.2 \frac{m}{s^2}$ ).

Resultados del experimento para cámara de resonancia (t15-h15CamRes)

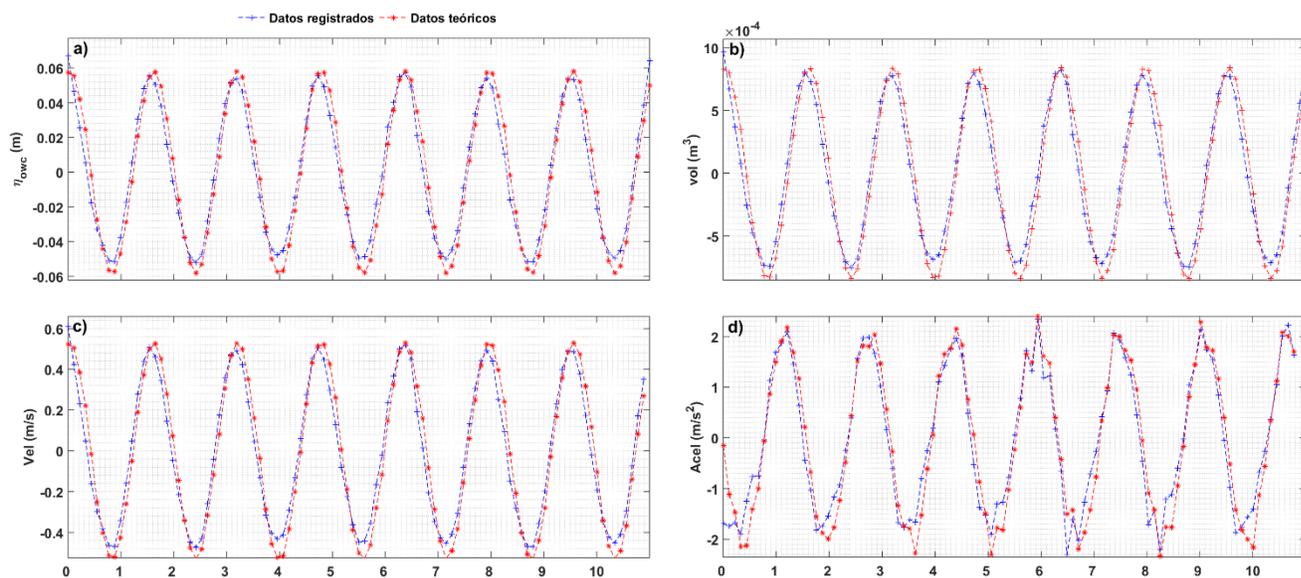


Figura 5.4.6. Resultados del experimento correspondiente a  $H_s=15$  y  $T= 1.5s$ , registrados en la cámara de resonancia.

Como resumen se presenta la Tabla 5.2 con la información obtenida de las gráficas antes mencionadas

Tabla 5.2. Concentrado de los resultados de la dinámica de las oscilaciones en los experimentos.

Prueba		Cámara de oscilación			
Altura de ola (H), en cm	Periodo (T), en seg	Elevación (cm)	Volumen (Lts)	Velocidad ( $\frac{m}{s}$ )	Aceleración ( $\frac{m}{s^2}$ )
15	1.5	1.7	1.9	0.16	0.6
20	2	1.9	2	0.21	0.74
	3	2	2.16	0.18	0.36
Prueba		Cámara de Resonancia			
15	1.5	5.8	1.6	0.52	2.2
20	2	6.2	1.8	0.69	2.3
	3	4.9	1.4	0.45	0.89

El potencial energético teórico del oleaje que el dispositivo puede absorber y aprovechar mediante la oscilación de la columna de agua se presenta en la Figura 5.4.7 donde se tienen los máximos de energía aprovechable para cada uno de los experimentos realizados, en la prueba correspondiente a 2 s de periodo y 20 cm de altura de ola se observa la mayor cantidad de energía por oscilación de columna de agua y utilizando las ecuaciones descritas en capítulos anteriores se determinó que la potencia máxima teórica del dispositivo es de 2.5 W aproximadamente.

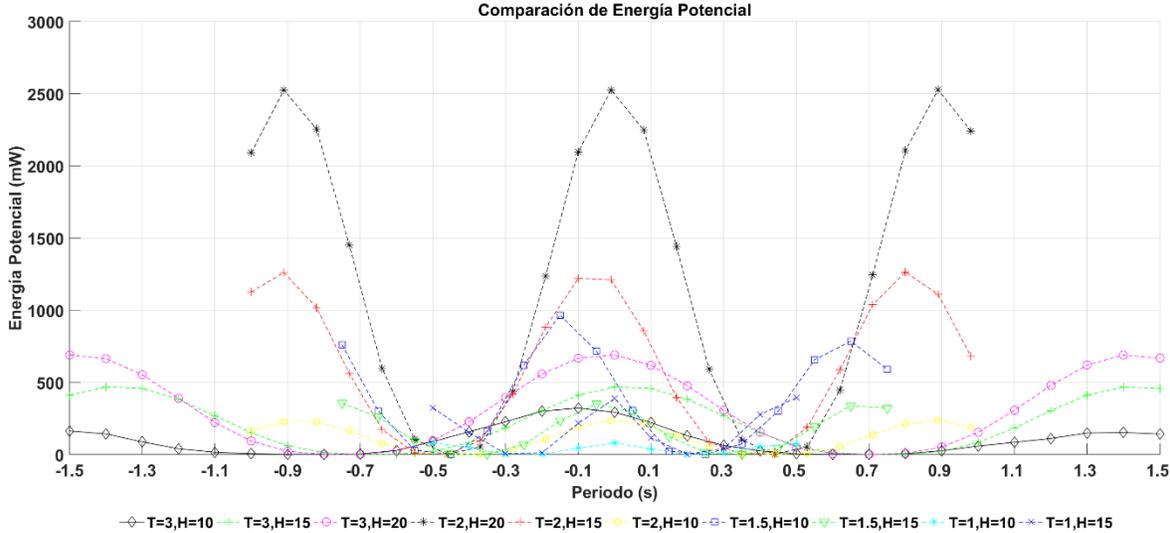


Figura 5.4.7 Concentrado de la energía potencial teórica calculada a partir de los registros de oscilación de agua.

Para tener un panorama general de la potencia y eficiencia del dispositivo con los experimentos ejecutados, en la Tabla 5.3 se presenta la elevación de la columna de agua y la energía potencial teórica. Las celdas marcadas en color verde representan las condiciones de oleaje con la que el dispositivo tuvo una mayor respuesta.

Tabla 5.3 Valores de energía potencial teórica extraíble por el sistema expresada en mili Watts.

Prueba		Cámara de Resonancia	
Altura de ola (H), en cm	Periodo (T), en seg	Elevación (cm)	Energía Potencial max (mWatts)
10	1	4.4	80
	1.5	7.8	650
	2	6.5	250
	3	5.2	150
15	1	6	500
	1.5	10.2	1100
	2	9.8	1250
	3	8	350
20	2	13.2	2500
	3	10.2	750

### 5.5 Energía del flujo de aire

Como se mencionó anteriormente, el principio de operación del dispositivo OWC, es generar un flujo de aire mediante la oscilación de la columna de agua. Ese flujo de aire puede ser aprovechado con turbinas de flujos bidireccionales. Para conocer las características del flujo de aire (velocidad, dirección, aceleración y potencial energético) se analizó la variación de presión de aire dentro de las cámaras.

Para determinar el potencial energético teórico aprovechable se tomó en cuenta la variación de las velocidades del flujo de aire (Ecuación 3.9.9). Una vez conocidas todas las variables que resuelven la Ecuación 3.9.10 se calculó la energía cinética del flujo de aire del dispositivo propuesto y con ello se obtuvieron los valores de potencial energético de cada uno de los experimentos.

De igual manera a lo descrito en el apartado 5.4, se presenta los datos de las pruebas donde se obtuvo el mayor cambio en la presión (T1-H15, T1.5-H15, T2-H20), de las cuales se muestra y explica a continuación cada una de ellas.

### 5.5.1 Experimento T2-H2O

La variación de la presión de aire para esta prueba fue de aproximadamente 1130 Pa, en la Figura 5.5.1 se puede observar la presión en la cámara de oscilación (rojo) y la cámara de resonancia (azul), donde la media de presión alcanzada por efecto de la oscilación del agua es de 4078 Pa, alcanzando un máximo de 4628 Pa y un mínimo de 3513 Pa para este experimento. Los cambios en el flujo de aire lograron generar un flujo potencial con un máximo de 8 watts.

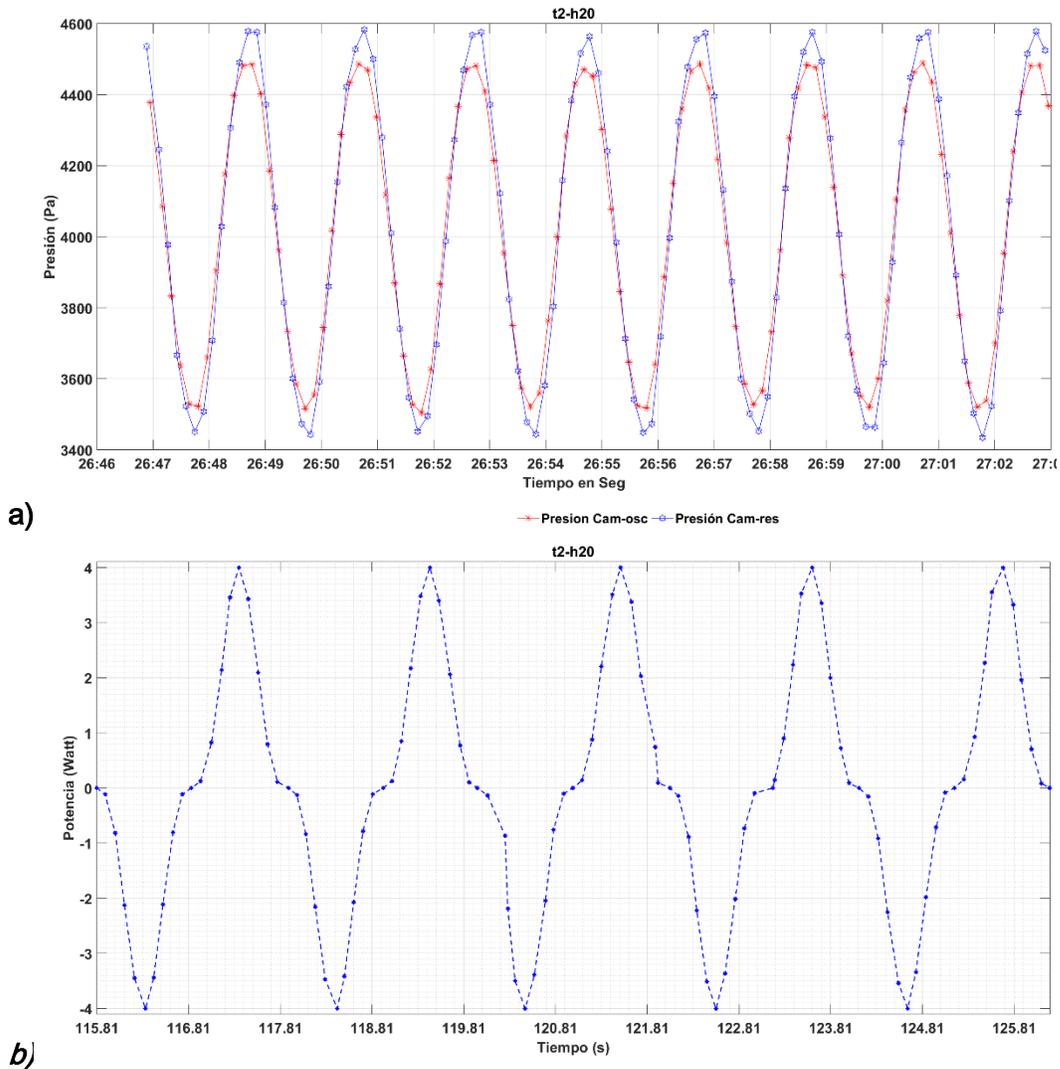
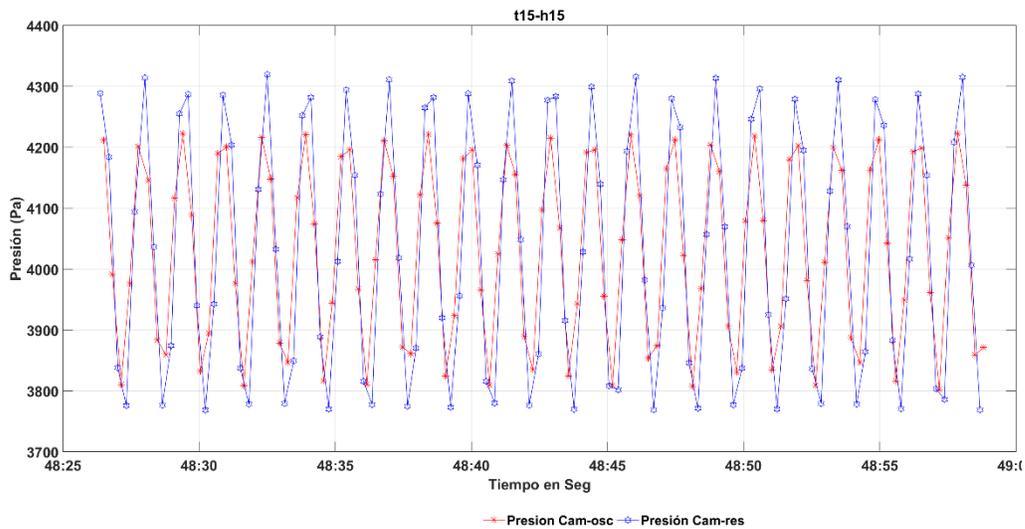


Figura 5.5.1 a) Gráficos de la presión para las pruebas con mayor variación, elaborados a partir de los datos obtenidos a través de los sensores Keller durante los experimentos de laboratorio, b) Potencia obtenida de los datos de laboratorio.

### 5.5.2 Experimento T1.5-H15

Para este experimento, la presión registró una variación de aproximadamente de 500 Pa los cuales se ven gráficamente en la Figura 5.5.2, donde el máximo es de 4300 Pa y un mínimo de 3780 Pa. La potencia teórica extraíble para este experimento con base en los datos registrados es de aproximadamente 5 watts

a)



b)

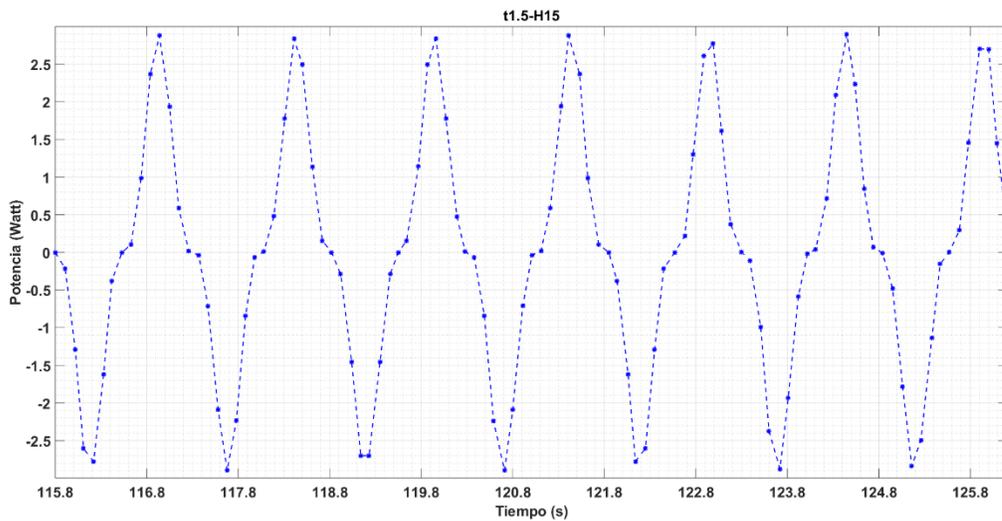
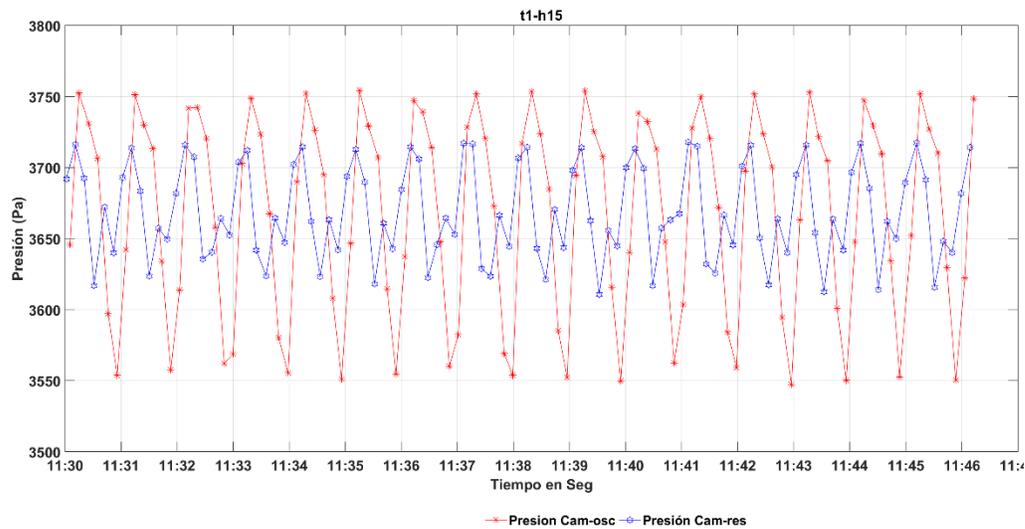


Figura 5.5.2.-a) Gráfica de presiones para prueba T3-H15, b) Gráfica de Potencial teórico extraíble del flujo de aire.

### 5.5.3 Experimento T3-H2O

Finalmente se muestran los datos del experimento que presento la mayor variación de la presión con aproximadamente 200 Pa, como se observa en la Figura 5.5.3 la máxima presión registrada fue de 3750Pa y la mínimo de 3550 Pa. Estos cambios provocaron un flujo con un potencial extraíble de aproximadamente 7.8 watts.

a)



b)

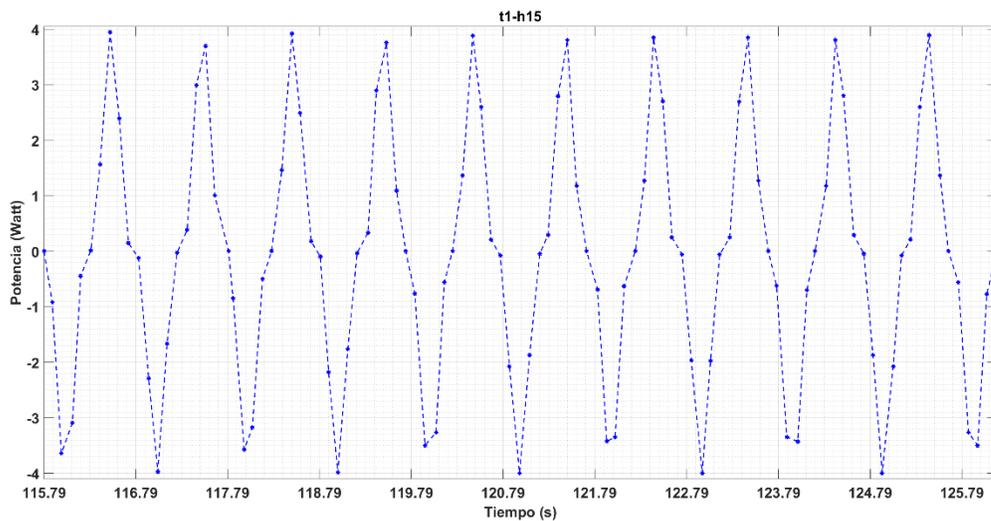


Figura 5.5.3.- a) Gráfica de presiones (Pa), b) Gráfica de Potencial teórico extraíble (watt), para experimento T3-H2O

Para finalizar se muestra la Figura 5.5.4 donde se presentan los máximos de energía potencial teórico para el dispositivo OWC-MDS, en esta grafica el eje de las x representa el

periodo del oleaje para los distintos experimentos al que fue sometido el dispositivo, y el eje de las y, representa la potencia en miliwatts (mwatt) con una distribución logarítmica en base 10 para fines de mejorar la representación de los resultados. El máximo potencial obtenido del flujo de aire se tiene en el oleaje de periodos cercanos al natural de oscilación del dispositivo (1, 1.5 y 2) y altura de ola de 15 cm y 20 cm, dando como resultado un potencial de entre 2 y 8 watts disponibles para la conversión por cada paso de onda.

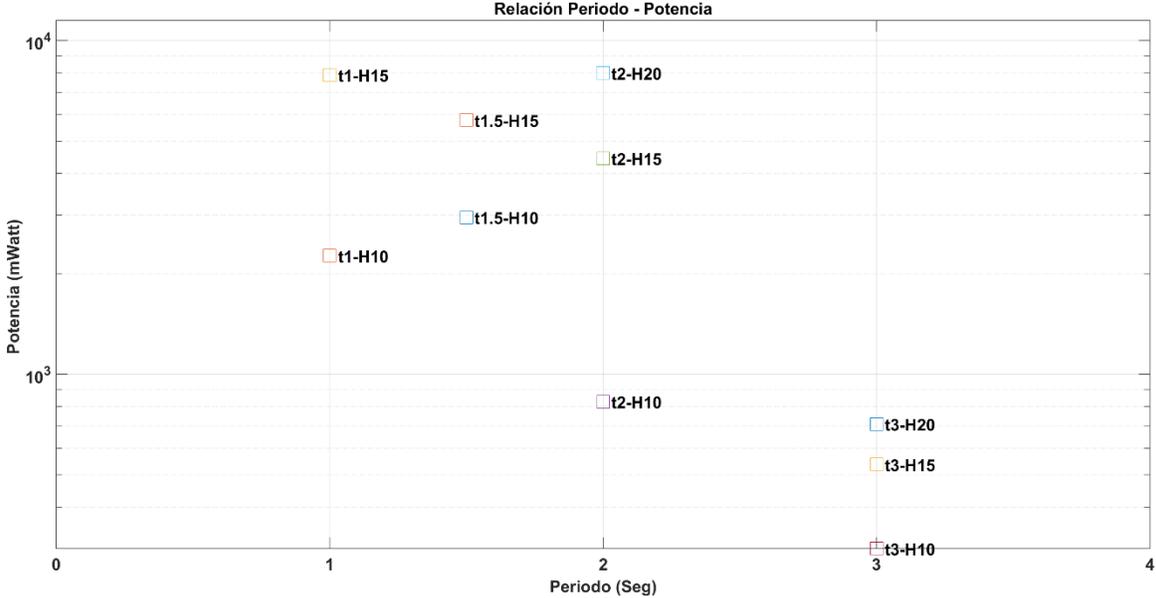


Figura 5.5.4 Distribución de la energía potencial del flujo de aire generado por el dispositivo OWC-MDS.

Con los resultados obtenidos de los datos extraídos en cada experimento se demostró el potencial energético que puede ser transformado por el dispositivo OWC-MDS. Se tiene que tanto para la energía contenida en la oscilación de la columna de agua como para la energía del flujo de aire, los rangos van de 2 y 8 Watts (Tabla 5.4).

Tabla 5.4. Concentrado de la energía potencial del flujo de aire.

Prueba		Flujo de aire	
Altura de ola (H), en cm	Periodo (T), en seg	Elevación (cm)	Energía Potencial Max (mWatts)
10	1	4.4	2260
	1.5	7.8	2900
	2	6.5	800
	3	5.2	300
15	1	6	7800
	1.5	10.2	5800
	2	9.8	4400
	3	8	600
20	2	13.2	8000
	3	10.2	800

Se observó que la tendencia de los máximos de oscilación corresponde al periodo natural de resonancia del sistema. Dependiendo de la geometría se puede pensar en recrear los experimentos en condiciones reales, tomando en cuenta el clima marítimo de la zona donde se pretenda desplegar el dispositivo.

## 6 Conclusiones

Los resultados experimentales demostraron que la configuración del dispositivo puede servir como herramienta para la conversión de la energía para diferentes condiciones de oleaje. Sin embargo el máximo potencial se alcanzará cuando el periodo de las olas incidentes coincida con el periodo natural de oscilación del sistema.

Se observó que los oleajes de 1.5 y 2 segundos mostraron los mejores resultados en cuanto a oscilación de la columna de agua. En comparación con los oleajes de 1 segundo cuya frecuencia de respuesta fue alta, afectando su altura de oscilación; para los de 3 segundos al ser más prolongado el paso del oleaje el sistema registraba una mejor respuesta pero no mayor a los oleajes antes mencionados. Para este tipo de oleaje el dispositivo podría generar entre 1 y 3 Watts de potencia tomando en cuenta la oscilación de la columna de agua.

Para la oscilación del flujo de aire, se notó que oleaje con periodos de 1.5 y 2s, mostraron un cambio de aproximadamente 1400 pascales en la presión. Para este tipo de oleaje (1.5 y 2 segundos) la variación de la presión del aire, así como la velocidad de oscilación dentro la cámara de resonancia nos permitió determinar la velocidad del flujo en el conducto y con ello el potencial energético teórico, el cual oscila entre 2 y 8 Watts para posible extracción (sin aplicar el factor de eficiencia).

Se comprobó en función de los datos adquiridos que utilizando la oscilación de la columna de agua o el flujo de aire generado por la oscilación es posible la extracción de energía del oleaje por medio del dispositivo OWC-MDS. El potencial teórico energético considerando la eficiencia de las turbinas de flujo bidireccional (aproximadamente 60%) se obtiene un máximo de extracción de entre 2 y 5 Watts por cada paso de onda.

Los resultados obtenidos en las pruebas de laboratorio en complemento con los cálculos teóricos, demostraron que el dispositivo puede obtener una eficiencia de entre 50% al 70% esto comparando la energía contenida en el oleaje de experimentación y la energía potencial teórica que el dispositivo absorbe, esto para oleaje de 15 y 20 cm de altura con periodos de 1.5s y 2s, aprovechando el flujo de aire.

Este dispositivo es una herramienta para realizar la conversión de la energía del oleaje en corriente eléctrica mediante el aprovechamiento del flujo de aire generado por la oscilación de columnas de agua, por lo que puede ser objeto de estudio para la implementación en condiciones reales. Los resultados sugieren que un dispositivo a escala prototipo, tomando en cuenta las condiciones de oleaje en la costa de Yucatán ( $H_s = .65$  m,  $T_p = 5.4$ s,  $h = 6$ m) sería capaz de generar 22 MWh/año o bien 7.7 kW/h. Sin embargo, la viabilidad técnica para la construcción requiere mayor investigación.

## 6.1 Consideraciones del modelo físico

Al realizar la modelación física en el canal de oleaje, se pudo observar algunas deficiencias del modelo construido, por lo que es necesario tomar algunas consideraciones para experimentos posteriores o para el diseño del dispositivo a otras escalas.

La primera modificación que se sugiere hacer, es sumergir más la cámara de oscilación o construirla con una mayor altura, ya que como se observa en la Figura 6.1.1, el nivel que alcanza el agua después de sumergirlo a 70 cm es de apenas 1.52 cm, razón por la que al momento de generarse la oscilación se produce turbulencia debido al efecto de la altura de agua contenida.

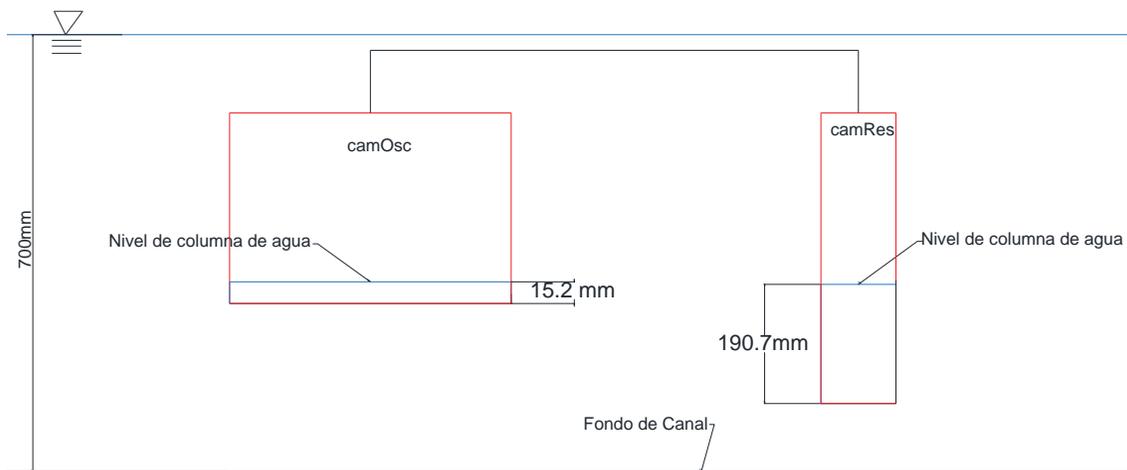


Figura 6.1.1. Esquema de la configuración del dispositivo completamente sumergido.

La segunda consideración que se debe tomar en cuenta es la hermeticidad del dispositivo, en las pruebas iniciales al no verificar este punto, el sistema no funcionó como se esperaba debido a la pérdida de presión de aire dentro de las cámaras por fugas relacionadas a la deficiencia en la hermeticidad del elemento. Se pudo observar durante las pruebas la pérdida de presión gracias a los sensores colocados en el interior. Otra manera de identificar la pérdida de presión es el aumento de los niveles de agua en las cámaras. Este problema fue resuelto aplicando una nueva capa de pegamento en cada una de las uniones del dispositivo.

En relación a la ubicación de los sensores, se sugiere colocar los sensores de voltaje a una distancia aproximada a la longitud de onda después del primero, esto debido a que al colocarlos cerca del dispositivo (después del dispositivo con relación a la dirección de la ola incidente) los datos que se obtienen no pueden ser usados para comparar cuánta energía

se pierde en el sistema. Al colocar los sensores muy juntos se observó que las alturas de superficie libre en vez de disminuir en algunos casos aumentaba, esto se puede relacionar a que se medía el asomeramiento que producía el dispositivo. Entonces como recomendación es necesario alejar los sensores de voltaje del dispositivo.

## 6.2 Futuros trabajos y líneas de investigación

El dispositivo de conversión propuesto aún es un prototipo en desarrollo por lo que sigue sujeto a estudio y optimización, esto genera que existan diferentes líneas de investigación con respecto al sistema.

En primer lugar de debe seleccionar y colocar las turbinas, así como el sistema de conversión, para realizar el análisis y determinar el método de extracción que presente mejores resultados para el dispositivo.

Existe un campo de oportunidad en optimizar la geometría basados en los experimentos realizados a través de modelos numéricos y con ello hacer los estudios necesarios para el aumento de la eficiencia.

Dimensionar y construir un prototipo a mayor escala para ser probado en condiciones reales en algún lugar de la costa tomando en cuenta las condiciones de oleaje del sitio para dimensionar el dispositivo.

## 7 Anexos

### 7.1 Cálculo del periodo natural de oscilación del dispositivo OWC-MDS

Para el cálculo del periodo de resonancia se tomó en cuenta la geometría del dispositivo propuesto y las condiciones de oleaje a las que estaba sometido. Siguiendo la metodología propuesta por (McCormick 2007) tenemos que el primer paso fue identificar las variables geométricas de acuerdo a la Figura 7.1.2.

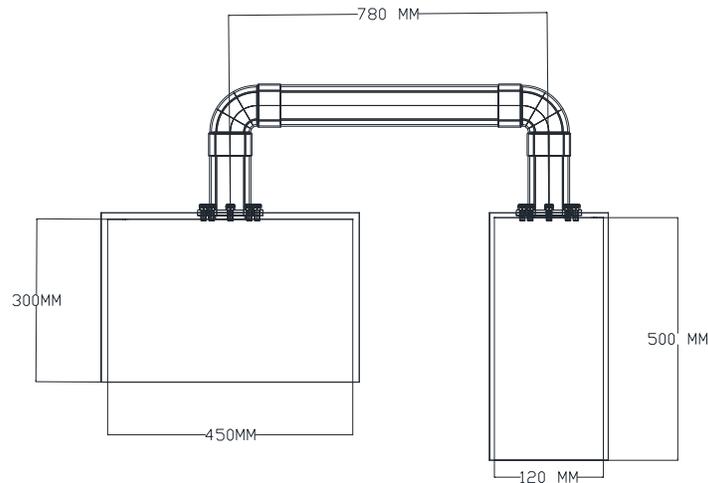


Figura 7.1.1 geometría del dispositivo propuesto para el cálculo del periodo de resonancia o periodo óptimo de oscilación.

Recordando la geometría para el dispositivo propuesto tenemos que:

$$l_1 = 0.45m ; l_2 = 0.12 m ; z = 0.305m$$

$$\frac{l_1}{z} = \frac{0.45}{0.35} = 1.47;$$

Tomando el valor del resultado de la división de la geometría obtenemos que los valores correspondientes son:

$$m_w = 0.38\pi\rho l_1^2 l_2$$

$$I_w = 0.0146\pi\rho l_1^4 l_2$$

El paso siguiente es el cálculo del periodo natural de resonancia por lo que se tiene la fórmula:

$$T_z = 2\pi \sqrt{\frac{m + m_w}{\rho g A_w}};$$

Donde

$$m = \rho L B d = 1025 \frac{kg}{m^3} * 0.45m * 0.12m * 0.02m = 1.107kg$$

L= longitud del elemento; B=ancho del elemento; d=Superficie mojada del elemento o nivel de agua

$$A_w = LB = 0.45m * 0.12m = 0.054m^2$$

Y

$$m_w = 0.38\pi\rho l_1^2 l_2 = 0.38 * 3.1416 * 1025 \frac{kg}{m^3} * (0.45m)^2 * 0.12m = 29.734kg$$

Conociendo los valores se sustituyen en la formula

$$T_z = 2\pi \sqrt{\frac{1.107 kg + 29.734 kg}{1025 \frac{kg}{m^3} * 9.81 \frac{m}{s^2} * 0.054 m^2}} = 1.49 seg.$$

Por lo que se obtiene que el periodo natural de resonancia del dispositivo es de 1.5 segundos y comparando con la Figura 5.3.2 podemos observar que la tendencia de la curva en los máximos de oscilación tienen como pico máximo los valores situados en los periodos de 1.5 segundos.

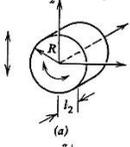
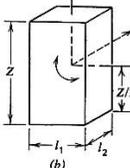
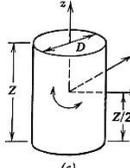
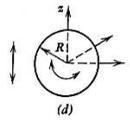
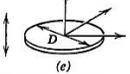
	Shape	$M_w$	$I_w$
	Horizontal circular cylinder ( $l_2 \gg R$ )	$\pi \rho R^2 l_2$	0
	$l_1/Z = 0.1$ $l_1/Z = 0.2$ $l_1/Z = 0.5$ $l_1/Z = 1.0$ $l_1/Z = 2.0$ $l_1/Z = 5.0$ $l_1/Z = 10.0$ $l_1/Z = \infty$ $(l_2 \gg l_1)$	$0.558\pi\rho l_2^3$ $0.495\pi\rho l_2^3$ $0.425\pi\rho l_2^3$ $0.378\pi\rho l_2^3$ $0.340\pi\rho l_2^3$ $0.302\pi\rho l_2^3$ $0.285\pi\rho l_2^3$ $0.250\pi\rho l_2^3$	$0.0092\pi\rho Z^4 l_2$ $0.0094\pi\rho Z^4 l_2$ $0.0094\pi\rho Z^4 l_2$ $0.0146\pi\rho l_2^4 l_2$ $0.0094\pi\rho l_2^4 l_2$ $0.0094\pi\rho l_2^4 l_2$ $0.0092\pi\rho l_2^4 l_2$ $0.0078\pi\rho l_2^4 l_2$
	Vertical circular cylinder ( $Z \gg D$ )	$0.333\rho D^3$	$0.0208\pi\rho D^2 Z^3$
	Sphere	$0.667\pi\rho R^3$	0
	Circular disk	$0.333\rho D^3$	—

Figura 7.1.2. Tabla de valores para el cálculo de masa agregada ( $m_w$ ) y momento de inercia ( $I_w$ ), para cuerpos completamente sumergidos, tomado de (McCormick 2007)

## 8 Referencias bibliográficas

- Appendini, Christian M., Claudia P. Urbano-Latorre, Bernardo Figueroa, Claudia J. Dagua-Paz, Alec Torres-Freyermuth, and Paulo Salles. 2015. "Wave Energy Potential Assessment in the Caribbean Low Level Jet Using Wave Hindcast Information." *Applied Energy* 137: 375–84. doi:10.1016/j.apenergy.2014.10.038.
- Arinaga, Randi A., and Kwok Fai Cheung. 2012. "Atlas of Global Wave Energy from 10 Years of Reanalysis and Hindcast Data." *Renewable Energy* 39 (1). Elsevier Ltd: 49–64. doi:10.1016/j.renene.2011.06.039.
- Azzellino, A, D Conley, D Vicinanza, and J P Kofoed. 2013. "Marine Renewable Energies: Perspectives and Implications for Marine Ecosystems." *ScientificWorldJournal* 2013: 547563. doi:10.1155/2013/547563.
- Bahaj, A.S, and L.E Myers. 2003. "Fundamentals Applicable to the Utilisation of Marine Current Turbines for Energy Production." *Renewable Energy* 28 (14): 2205–11. doi:10.1016/S0960-1481(03)00103-4.
- Bald, Juan, Andrea Campo, and Javier Franco. 2010. "Protocol to Develop an Environmental Impact Study of Wave Energy Converters," no. June 2017.
- Charlier, Roger H. 2003. "A 'sleeper' Awakes: Tidal Current Power." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 7 (6): 515–29. doi:10.1016/S1364-0321(03)00079-0.
- Cornett, Andrew M. 2008. "A Global Wave Energy Resource Assessment." *The Eighteenth International Offshore and Polar Engineering Conference*, no. July 2008: 1–9.
- Cruz, João. 2008. *Ocean Wave Energy. Green Energy and Technology*. doi:10.1007/978-3-540-74895-3.
- Cui, Ying, and Beom-Soo Hyun. 2016. "Numerical Study on Wells Turbine with Penetrating Blade Tip Treatments for Wave Energy Conversion." *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 8 (5): 456–65. doi:10.1016/j.ijnaoe.2016.05.009.
- Dean, Robert, and Robert Dalrymple. 2000. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*.
- Drew, B, A R Plummer, and M N Sahinkaya. 2009. "A Review of Wave Energy Converter Technology" 223: 887–902. doi:10.1243/09576509JPE782.

- EIA, U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. 2017. "Crude Oil Prices Increased in 2017, and Brent-WTI Spread Widened - Today in Energy - U.S. Energy Information Administration (EIA)." <https://www.eia.gov/todayinenergy/detail.php?id=34372>.
- Fairhurst, Jason, and Johannes L Van Niekerk. 2016. "Modelling, Simulation and Testing of a Submerged Oscillating Water Column." *International Journal of Marine Energy* 16: 181–95.
- Falcao, Antonio. 2014. "Modelling of Wave Energy Conversion." *Renewable Energy*, 1–38.
- Falcão, António F. de O. 2010. "Wave Energy Utilization: A Review of the Technologies." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14 (3): 899–918. doi:10.1016/j.rser.2009.11.003.
- Falnes, Johannes. 2007. "A Review of Wave-Energy Extraction." *Marine Structures* 20 (4): 185–201. doi:10.1016/j.marstruc.2007.09.001.
- Fernandes, Antonio Carlos, and Rostami Ali Bakhshandeh. 2015. "Hydrokinetic Energy Harvesting by an Innovative Vertical Axis Current Turbine." *Renewable Energy* 81 (September): 694–706. doi:10.1016/j.renene.2015.03.084.
- Foley, Todd, Kane Thornton, Rainer Hinrichs-rahlfes, Steve Sawyer, Marietta Sander, Richard Taylor, Sven Teske, Harry Lehmann, Marcel Alers, and David Hales. 2015. "Renewables 2015 Global Status Report." *Renewable Energy Policy Network Secretariat for the 21st Century*.
- Halder, Paresh, and Abdus Samad. 2016. "Optimal Wells Turbine Speeds at Different Wave Conditions." *International Journal of Marine Energy* 16: 133–49. doi:10.1016/j.ijome.2016.05.008.
- Henderson, Ross. 2006. "Design, Simulation, and Testing of a Novel Hydraulic Power Take-off System for the Pelamis Wave Energy Converter." *Renewable Energy* 31 (2): 271–83. doi:10.1016/j.renene.2005.08.021.
- Instituto de Ingenieria, UNAM. 2016. "Centro Mexicano de Innovación En Energías Del Océano.," 2014–17.
- Kristin Seyboth, Freyr Sverrisson, Fabiani Appavou, Adam Brown, Bärbel Epp, Anna

- Leidreiter, Christine Lins, et al. 2016. *Renewables 2016 Global Status Report. Global Status Report*. <http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/>.
- López, Iraide, Jon Andreu, Salvador Ceballos, Iñigo Martínez de Alegría, and Iñigo Kortabarria. 2013. "Review of Wave Energy Technologies and the Necessary Power-Equipment." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 27: 413–34. doi:10.1016/j.rser.2013.07.009.
- López González, José., Rodolfo. Silva Casarín, and Edgar. Mendoza Baldwin. 2011. "Aprovechamiento de La Energía de Las Corrientes Con El Hidrogenerador IMPULSA."
- McCormick, Michael E. 2007. *Ocean Wave Energy Conversion*. Dover Publications.
- Mendoza, Edgar, Xavier Chávez, Juan Carlos Alcérreca-Huerta, and Rodolfo Silva. 2015. "Hydrodynamic Behavior of a New Wave Energy Converter: The Blow-Jet." *Ocean Engineering* 106 (September): 252–60. doi:10.1016/j.oceaneng.2015.06.036.
- Michel, Jacqueline. 2017. "Study Title : Worldwide Synthesis and Analysis of Existing Information Regarding Environmental Effects of Alternative ...," no. June.
- Ocean Power Technologies. 2017. "Ocean Power Technologies." <http://www.oceanpowertechnologies.com/>.
- ONU, Organización Mundial de las Naciones Unidas. 1998. "Protocolo de Kyoto de La Convención Marco de Las Naciones Unidas Sobre El Cambio Climático" 61702.
- Panwar, N.L., S.C. Kaushik, and Surendra Kothari. 2011. "Role of Renewable Energy Sources in Environmental Protection: A Review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (3): 1513–24. doi:10.1016/j.rser.2010.11.037.
- Pelamis Wave Power. 2017. "Pelamis Wave Power." 2017. <https://www.pelamiswave.com/>.
- Polinder, Henk, and Mattia Scutto. 2005. "Wave Energy Converters and Their Impact on Power Systems." *Future Power Systems, 2005 ...*, no. May 2014: 1–9. doi:10.1109/FPS.2005.204210.
- Quééré, C Le, R Moriarty, R M Andrew, J G Canadell, S Sitch, and J I Korsbakken. 2015. "Global Carbon Budget 2015." *Earth Syst. Sci. Data*, 7, 349–396, 2015, 349–96.

doi:10.5194/essd-7-349-2015.

- Riefolo, Luigia, Caterina Lanfredi, Arianna Azzellino, and Diego Vicinanza. 2015. "Environmental Impact Assessment Of Wave Energy Converters : A Review." *International Conference on Applied Coastal Research SCACR*, no. September.
- Sabzehgar, R, and M Moallem. 2009. "A Review of Ocean Wave Energy Conversion Systems." In *IEEE Electrical Power & Energy Conference*. IEEE Electrical Power & Energy Conference.
- Song, Seung Kwan, and Jin Bae Park. 2015. "Apparatus and Theory of a Submerged Point Absorber Using Oscillating Water Column." *Proceedings of the Oceans 2013*, 1–5.
- Tiron, Roxana, Fionn Mallon, Frédéric Dias, and Emmanuel G. Reynaud. 2015. "The Challenging Life of Wave Energy Devices at Sea: A Few Points to Consider." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43 (March): 1263–72.  
doi:10.1016/j.rser.2014.11.105.
- U.S. Energy. 2014. "2014 Water Power Program Peer Review: Marine and Hydrokinetics Technology Overview." *Energy for Sustainable Development*.  
<http://www.nrel.gov/docs/fy14osti/61854.pdf>.
- Villate, J. 2010. "Situación Actual de Las Energías Marinas Y Perspectivas de Futuro." In *Seminario Anual de Automática, Electrónica e Instrumentación (SAAEI)*.
- WavePlane. 2017. "WavePlane." 2017. <http://www.waveplane.com/>.