



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CAMPECHE

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

**NOMBRE DE LA TESIS**

**“SIMULACIÓN FÍSICA DE UNA CÁMARA DE OSCILACIÓN DEL  
OLEAJE”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADO COMO:  
LICENCIADO EN INGENIERÍA CIVIL Y ADMINISTRACIÓN**

**AUTOR**

**IZAMAR PALAFOX CONTRERAS**

San Francisco de Campeche, Campeche, México, Mayo 2022



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CAMPECHE

---

---

FACULTAD DE INGENIERÍA

**NOMBRE DE LA TESIS**

**“SIMULACIÓN FÍSICA DE UNA CÁMARA DE OSCILACIÓN DEL  
OLEAJE”**

**PARA OBTENER EL TÍTULO DE LICENCIADO COMO:  
LICENCIADO EN INGENIERÍA CIVIL Y ADMINISTRACIÓN**

**AUTOR**

**IZAMAR PALAFOX CONTRERAS**

**DIRECTOR DE TESIS**

**Dr. GREGORIO POSADA VANEGAS**

San Francisco de Campeche, Campeche, México, Mayo, 2022



Facultad de Ingeniería

Oficio No. 939-FDI-2022  
Expediente: 01/ICA/21-22  
ÁREA: Coordinación de ICA  
Asunto: Aprobación de Tesis

San Francisco de Campeche, Camp., a 6 de mayo de 2022.

**C. IZAMAR PALAFOX CONTRERAS**

Pasante de la Licenciatura como Ingeniero  
Civil y Administración.

P R E S E N T E.

Por medio del presente me permito informarle que el Trabajo sobre Tesis Profesional denominada "SIMULACIÓN FÍSICA DE UNA CÁMARA DE OSCILACIÓN DEL OLEAJE", que usted nos entregó para su revisión y así poder presentar su Examen Profesional en opción al Título de Licenciado como Ingeniero Civil y Administración, ha sido aprobada según dictamen que rindió la comisión revisora asignada por esta Dirección.

Por tanto, habiendo cumplido con lo establecido en el artículo No. 75 fracción I del Reglamento General de Alumnos, podrá proceder a la impresión de dicha Tesis, teniendo en cuenta que deberá entregar a esta Facultad nueve ejemplares y dos cd.

Terminada la impresión de su Tesis Profesional, deberá dirigirse al H. Consejo Universitario solicitando la autorización correspondiente para poder presentar su Examen Profesional, anexando a dicha solicitud un ejemplar de su Trabajo impreso, cinco se proporcionan al Jurado Examinador y tres para la Biblioteca.

Atentamente.  
"DEL ENIGMA SIN ALBAS, A TRIÁNGULOS DE LUZ"

Mtro. Francisco Javier Barrera Lao  
Director Académico



FACULTAD DE INGENIERIA  
DIRECCION  
SAN FRANCISCO DE  
CAMPECHE, CAMP. MEX.

c.c.p. Dr. Héctor Manuel Quej Cosgaya.- Secretario Académico de la Facultad de Ingeniería.- Presente  
c.c.p. MAC, Gabriela Patricia Aldana Narváez. - Coordinadora de la Licenciatura de ICA.- Presente.  
c.c.p. Archivo

FJBL/GPAN/csps

Predio s/n por Av. Humberto Lanz Cárdenas y Unidad Habitacional Ecológica Ambiental  
Siglo XXIII, Col. Ex -Hacienda Kalá C.P. 24085  
San Francisco de Campeche, Campeche, México

T. (981) 811 9800 Ext. 3030123  
[www.fi-coica@uacam.mx](mailto:fi-coica@uacam.mx)



## AGRADECIMIENTOS

Dedico este trabajo a mi hermano mayor Maciel Palafox Contreras, del cual he aprendido mucho y valoro todas y cada una de sus palabras, quien desde mis primeros años ha cuidado de mí, brindado su apoyo, consejos, tiempo y buenas conversaciones para motivarme y seguir adelante, quien supo llamarme la atención en su momento y así corregir mis errores. Agradezco a mi madre, una gran mujer que me dio las bases de mi educación, valores y principios que a diario pongo en práctica y me esfuerzo por mejorar.

Al Dr. Gregorio Posada Vanegas por ser mi tutor, por apoyarme con su tiempo, conocimiento y paciencia, siendo claro con sus observaciones, notas y consejos para el desarrollo y término de este trabajo.

A mis compañeros del instituto, que en su momento me apoyaron, aconsejaron compartiendo su conocimiento y experiencias, a quienes hoy puedo llamar amigos.

Le ofrezco mi gratitud al instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del golfo de México, por brindarme la oportunidad de realizar este trabajo.

Al Proyecto del CEMIE-Océano por la beca otorgada para los estudios durante el periodo de tiempo del desarrollo de la tesis.

# ÍNDICE

## Contenido

1. Justificación.....	8
2. Objetivos.....	8
2.1. Objetivos Generales.....	8
2.2. Objetivos Específicos.....	8
3. Estado del arte.....	9
4. Construcción de una cámara de oscilación para pruebas en laboratorio.....	20
5. Pruebas de laboratorio para la cámara de oscilación del oleaje.....	31
6. Análisis de resultados.....	40
Conclusiones.....	45
BIBLIOGRAFÍA.....	47

## Lista de Figuras

Figura 1. OWC integrada al rompeolas del puerto de Mutriku, España .....	20
Figura 2. Corte transversal de la planta OWC de Mutriku, España .....	22
Figura 3. Esquema de funcionamiento para una OWC .....	22
Figura 4. Medidas OWC a escala 1:20 .....	23
Figura 5. OWC a escala 1:100.....	23
Figura 6. Piezas de la OWC impresas en PLA.....	24
Figura 7. OWC conformada por piezas impresas en PLA .....	24
Figura 8. Piezas de Acrílico para OWC, espesor 12 mm .....	25
Figura 9. Perforación de las “L” de acrílico. ....	25
Figura 10. Colocación y nivelación de piezas .....	26
Figura 11. Sellado de perforaciones con silicón. ....	27
Figura 12. Cámara OWC armada.....	27
Figura 13. Presentación de la Cámara OWC en tanque .....	28
Figura 14. Tapa de madera para la sección de la Cámara .....	29
Figura 15. Presentación del sensor ubicado en la parte central del área de influencia en la Cámara OWC .....	30
Figura 16. Ubicación de sensores de nivel 1 a 3.....	31
Figura 17. Equipo WG-8CH. 8 módulos de altura de ola (WG-1CH-E), y cable receptor del sensor de nivel. ....	35
Figura 18. Conector coaxial BNC macho. ....	36
Figura 19. Conector coaxial conectado (Figura 19a) a cable LEMO (Figura 19b) Imc CANSAS	36
Figura 20. imc BUSDAQ.....	37
Figura 21. Medición con sensor de nivel.....	37
Figura 22. Sensores de nivel 1 y 2 ubicados al frente de la cámara.....	38
Figura 23. Variación del nivel de agua dentro de la Cámara. ....	38
Figura 24. Pantalla del programa WaveLab.....	41
Figura 25. Altura de ola significativa en función del periodo .....	42
Figura 26. Relación de altura de ola entre sensores 3 y 1, en función del periodo .....	43
Figura 27. Potencia de energía al interior de la OWC en función del periodo .....	44

## Lista de Tablas

Tabla 1. Características de los ensayos con oleaje regular.....	32
Tabla 2. Resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio. ....	42

## INTRODUCCIÓN

La ingeniería civil se define como la rama de la ingeniería que aplica los conocimientos de la Física, Química, Matemática y Geología, para la elaboración del diseño, construcción y mantenimiento de diversas obras, tales como: Edificaciones, carreteras, ferrocarriles, puentes, aeropuertos, hidráulicas, entre otras.

Como tal las obras hidráulicas son fundamentales en el desarrollo y crecimiento de las sociedades, todas ellas cumplen papeles importantes, las obras costeras por su parte ayudan a la economía de una sociedad, mediante puertos, muelles, plataformas petroleras, muros de protección (rompeolas). Siendo que las aguas de los mares proporcionan oportunidades para la comunicación, pesca e incluso la obtención de energía asociada al oleaje. Para ello se requieren de obras especiales y dispositivos que sean capaces de soportar las condiciones de oleaje, marea y tormentas, los cuales deben ser dimensionados y construidos de acuerdo con las condiciones de cada zona.

Una parte importante durante para el desarrollo de obras hidráulicas para obtención de energía o de cualquier tipo, es la generación de modelos a escala, todo esto debe realizarse previamente a la construcción a escala real, los modelos y dispositivos a escala tienen la ventaja de probarse en laboratorios mediante simulaciones, tanto físicas como numéricas. Como tal en este trabajo se construyó un modelo a escala de un dispositivo de generación de energía a partir del oleaje, una Cámara de Oscilación del Oleaje OWC (*Oscillating wáter column*).

## 1. Justificación

El uso de energías no renovables como aquellas que se producen por la quema de combustibles fósiles y carbón mineral, generan gran cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub>, los cuales contribuyen al cambio climático generando gases de efecto invernadero en la atmósfera.

La energía undimotriz promete un acceso continuo de energía cinética, la cual puede ser aprovechada por dispositivos OWC (*Oscillating Water Column*), teniendo así un suministro constante de energía eléctrica. Mismos dispositivos pueden ser integrados a estructuras costeras para reducir costos.

Construir dispositivos OWC puede generar áreas de veda, lo cual es puede ser altamente benéfico para el crecimiento de la vida marina.

## 2. Objetivos

### 2.1. Objetivos Generales.

Caracterizar el funcionamiento físico de una cámara de oscilación del oleaje bajo condiciones controladas en laboratorio

### 2.2. Objetivos Específicos.

- Generar el estado del arte relacionado con los dispositivos OWC y su aplicación en la costa.
- Construir una cámara de oscilación que pueda probarse en el laboratorio de oleaje espectral de la Universidad Autónoma Campeche.
- Generar recomendaciones para el ensayo de dispositivos OWC en el laboratorio de oleaje.



### 3. Estado del arte

En 1990, se instaló con éxito por primera vez en el puerto de Sakata, Japón, un dispositivo OWC integrado a un rompeolas con espacio especial para acomodar el dispositivo y demás equipos. Por otro lado, los primeros convertidores OWC desplegados en el mar fueron dispositivos flotantes desarrollados en Japón en las décadas de 1960 y 1970. Al ser flotantes, quedan a la voluntad de las olas durante ciclones y tormentas.

Sundar et al 2010 las construcciones de rompeolas pueden estar sumergidas o flotantes. Los rompeolas tradicionales se clasifican generalmente como rompeolas de montículo o rompeolas verticales. Los flotantes se utilizan como soluciones temporales cuando la protección contra mares agitados no es crucial. El concepto de rompeolas de las cortinas de burbujas de aire puede ser impulsado por un OWC que bombee aire a la turbina. Los costos operativos pueden reducirse.

Combinar OWC's y rompeolas brinda costos compartidos y pueden ser una oportunidad para el desarrollo comercial. Los OWC tienen la ventaja de que la turbina de aire es la única parte móvil y está protegida dentro de una construcción rígida y no en contacto directo con el agua.

Una de las soluciones propuestas para reducir la erosión costera, es el uso de rompeolas desprendidos en alta mar. Los WEC integrados con estas construcciones podrían afectar de manera eficiente la potencia de las olas incidentes en la costa.

Falcao et al 2010. en el desarrollo y diseño de un convertidor de energía de las olas, la absorción de energía puede estudiarse teóricamente / numéricamente, o probando un modelo físico en una cuenca de olas o un canal de olas. Los primeros estudios teóricos sobre convertidores de cuerpo oscilante y OWC revelaron que, para que el dispositivo sea un absorbente eficiente, su propia frecuencia de oscilación debería coincidir con la frecuencia de las ondas entrantes, es decir, debería funcionar en condiciones cercanas a la resonancia. para un cuerpo oscilante monomodo en ondas regulares, la resonancia (y la máxima absorción de energía) ocurre cuando la velocidad del cuerpo está en fase con la fuerza de excitación (en lugar de con la fuerza total sobre la superficie mojada).

El accionamiento directo de los OWC tiene la ventaja de no requerir una interfaz mecánica y evitar las pérdidas nada despreciables que se producen en las máquinas mecánicas. Por otra

parte, los generadores eléctricos lineales para aplicaciones de energía undimotriz están sujetos a condiciones mucho más exigentes que los rotativos de alta velocidad, la mayoría se encuentra en fase de desarrollo.

Heath et al 2012 el atractivo del concepto OWC con turbina de aire proviene de su simplicidad. A nivel práctico hay pocas partes móviles; no hay partes móviles en el agua; se puede utilizar en una variedad de formas de colectores situados en la costa, región cercana a la costa o flotando en el mar; el uso de una turbina de aire elimina la necesidad de cajas de cambios; es confiable; fácil mantenimiento; y utiliza el espacio marino de manera eficiente.

En 1947 cuando Masuda, en Japón, diseñó e instaló el primer OWC que impulsaba una turbina de impulso para producir electricidad. La unidad estaba ubicada en la bahía de Osaka y la electricidad generaba luces de navegación alimentadas. La seguridad de funcionamiento fue proporcionada por baterías recargables que tomaban su energía de la turbina / generador en tiempos de abundancia.

Es importante señalar que el éxito del sistema dependerá de un buen diseño de la turbina, una estrategia de control eficaz y la adaptación de la turbina a el colector OWC. Es de notar que el tamaño de una turbina a menudo estará determinado por el requisito de coincidencia del colector más que por la capacidad de la máquina para absorber la energía. Junto con la Universidad de *Cranfield*, *Dresser-Rand* ha desarrollado una turbina de radio variable para su uso y ha probado la unidad en el flujo alterno.

En 2012, el mayor dispositivo de integración de OWC y el primer dispositivo WEC en el mar mediterráneo, se instaló con éxito en el puerto de Civitavecchia, Italia. Con una producción anual de 2800 MWh, a base de 136 cámaras.

El tipo más común de unidad de turbina de aire para los OWC, es la turbina Wells, debido a su capacidad para proporcionar rotación en una dirección tanto para efectos de succión como de soplado.

Delmonte et al 2015 Las cámaras oscilantes funcionan como un convertidor neumático para un flujo de aire de alta velocidad a través de la turbina de aire mediante el lento movimiento interno del agua superficial libre. Los OWC flotantes están diseñados para operar en una amplia variedad de sitios cercanos a la costa y en alta mar donde se dispone de mayor energía de las olas.

La primera planta de energía undimotriz rompeolas construida en el mundo se puso en servicio en 2011 en la costa atlántica española en Mutriku. Consta de 16 OWC de cámara única, cada uno con una turbina Wells y la potencia de salida nominal total es de alrededor de 300 kW. La central eléctrica de Mutriku se ha operado con éxito desde su apertura y actualmente es la única central eléctrica operada comercialmente por un OWC en el mundo.

Las estrategias de control pueden aumentar la complejidad de las partes mecánicas y eléctricas de un OWC. En consecuencia, la aplicación de una estrategia no solo afectará a la eficiencia de la conversión de energía, sino también a otros requisitos como la robustez, la supervivencia, el mantenimiento y, en última instancia, el costo de la electricidad producida por las olas del mar.

En los OWC, el control tiene que cumplir una serie de requisitos, como el rango permitido de velocidad de rotación, la calidad de la energía eléctrica y las fluctuaciones aceptables en la energía suministrada a la red. Por el contrario, la velocidad de rotación de la turbina debe coincidir con las condiciones del mar tanto como sea posible para lograr una conversión eficiente de las olas del mar. Entonces. Los enfoques para maximizar la extracción de energía de las olas y satisfacer las reglas de conexión a la red pueden ser diferentes.

En el caso de OWC monocámara el flujo de viento bidireccional implicó la elección de una tecnología de turbina específica, es decir, la turbina de Wells. La turbina Wells es la solución más extendida para OWC. Sin embargo, presenta el grave problema del fenómeno de pérdida. que sucede cuando la relación entre la velocidad del viento y la velocidad de la punta de la pala excede un umbral específico, entonces es necesario diseñar el control para evitarlo. Para prevenir esta condición, debe asegurarse que el coeficiente de flujo de aire esté entre los límites especificados.

Ashlin et al 2016 En el diseño de OWC, existe la suposición oculta de que su rendimiento depende principalmente de la excitación de la presión y la frecuencia natural de la cámara. De acuerdo con esto, las dimensiones se fijan para aprovechar la máxima eficiencia. Los parámetros clave de OWC es la profundidad de la pared de su labio frontal sumergida en el agua. largo, ancho de la cámara y óptima amortiguación de aire al sistema

La investigación experimental se llevó a cabo en un canal de olas de 72,5 m de largo, 2 m de ancho y 2,5 m de profundidad en el Instituto Indio de Tecnología de Madrás, India. Cuatro dispositivos diferentes de escala 1:12 de OWC (caracterizados por cuatro perfiles de fondo

diferentes: fondo plano. Fondo de curva circular de radio 300 mm, fondo con una pendiente de 1: 1 y 1: 5)) se sometieron a la acción de las olas. Para la prueba simultánea de estos cuatro modelos OWC y para evitar los fenómenos de interacción debido a las ondas de radiación, el canal se dividió en cuatro partes equivalentes y los divisores se extendieron a 15 m de cada uno del modelo hacia la dirección del creador de olas. Uno de los parámetros más importantes es el tamaño del respiradero, así mismo los parámetros estructurales, perfil de fondo, y dimensiones de la cámara. Una mayor ampliación de onda conduce a un mayor volumen de compresión de aire, lo que eventualmente producirá una alta potencia de salida.

La entrada suave que ofrece la pendiente circular y de 1 en 5 disminuye la reflexión del OWC. El coeficiente de reflexión es alto a alta frecuencia debido a la mínima absorción de energía de las olas, es decir, la mayor parte de la energía se refleja. En  $d / L = 0.131$  y  $d / L_p = 0.1223$ , hay una reducción en la energía reflejada debido a una mayor absorción de ondas, lo que provoca la máxima eficiencia.

Ning et al 2016 Las pruebas del modelo físico se llevaron a cabo en el canal de corriente de las olas en el Laboratorio Estatal Clave de Ingeniería Costera y *Offshore* de la Universidad Tecnológica de Dalian, China. El canal ondulado con paredes de vidrio tiene 69 m de largo. 2 m de ancho y 1.8 m de profundidad.

Se llevaron a cabo cinco conjuntos de experimentos para investigar los efectos de la amplitud de la onda incidente, el ancho de la cámara, el calado de la pared frontal, el diámetro del orificio y la pendiente del fondo en el rendimiento hidrodinámico del OWC.

Para investigar la variación espacial de la superficie libre, se utilizaron cuatro medidores de ondas para medir las elevaciones de las olas en ubicaciones. El movimiento de la superficie libre en la cámara es bastante complicado y está fuertemente influenciado por la geometría de la cámara y la onda incidente.

La amplitud de la onda incidente tiene poca influencia sobre la frecuencia de resonancia y la eficiencia hidrodinámica. Sin embargo, la eficiencia hidrodinámica aumenta primero a un valor pico y luego disminuye con el aumento de la amplitud de la onda incidente. La eficiencia hidrodinámica disminuye rápidamente después del valor pico al aumentar la amplitud de la onda incidente a la frecuencia resonante. Los resultados muestran que la eficiencia hidrodinámica óptima se produce en la relación de apertura & -0,66%. En el rango de  $0 \leq 30^\circ$ ,

la pendiente del fondo tiene poca influencia en la frecuencia de resonancia, pero la eficiencia óptima aumenta con el aumento de la pendiente del fondo. Una pendiente de fondo adecuada puede proporcionar un espacio de trabajo en la cámara OWC casi independiente de las condiciones de las olas del mar.

Mustapa et al 2017 la integración de dispositivos WEC con otras instalaciones marinas cercanas a la costa, ofrece beneficios de costos compartidos, incluyendo construcción, instalación y mantenimiento. Proporcionan tanto extracción de energía como protección a la costa.

Rezanejad et al 2017 El modelo para la línea de costa fija OWC se construyó con el factor de escala 1:25 ( $e = 1/25$ ) para llevar a cabo la campaña experimental. La comarca de A Guarda ubicada en el Noroeste de España sería una de las ubicaciones adecuadas para instalar el prototipo del OWC examinado en el estudio. Como el modelo se diseñó de tal manera que ocupaba todo el ancho del canal de oleaje, los resultados obtenidos de la campaña experimental se reconocerían como un caso 2D.

Los siguientes tres valores adimensionales principales tienen una influencia dominante en el rendimiento primario de los dispositivos OWC: número de Froude ( $Fr$ ), número de Reynolds ( $Re$ ) y presión adimensional, las similitudes de Froude y Reynolds no pueden satisfacerse simultáneamente.

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo en el canal de oleaje de la Universidad de Santiago de Compostela, de 20 m de largo, 0,65 m de ancho y 0,95 de alto.

El dispositivo OWC se probó en condiciones de olas tanto regulares como irregulares. Se aplicaron dos condiciones de amortiguación diferentes (amortiguación alta y baja) al modelo cambiando el ancho de la ranura en la tapa del modelo. El ancho de la ranura para las condiciones de alta y baja amortiguación se ajustó a 1 y 2,5 mm, respectivamente. En la profundidad del agua se fijó en 0,42 m y se mantuvo constante durante todos los experimentos.

Como se puede esperar, el modelo OWC tiene un rendimiento más alto en condiciones de alta amortiguación que en el caso de baja amortiguación y la eficiencia máxima no es la unidad para ambas condiciones de amortiguación. La eficiencia máxima de las condiciones de amortiguación alta y baja ocurre casi en el mismo período del pico de la curva de eficiencia máxima, lo que demuestra que el período durante el cual tiene lugar el primer mecanismo de

resonancia no depende de la condición de amortiguación, y se determina principalmente por la frecuencia natural de la columna de agua.

Ashlin et al 2018 Los dispositivos OWC combinados con ODBW minimizarán el costo de su construcción con doble propósito: dispositivos de extracción de energía y protección de la costa de la erosión. Los dispositivos OWC en una matriz son más efectivos. La eficiencia por ondas incidentes oblicuas se reduce debido a la reducción en el ancho de captura, se informó que la salida de potencia máxima podría aumentar para los dispositivos OWC en una fila. Una serie de cinco dispositivos exhibió un mejor rendimiento que el número infinito de dispositivos.

La configuración del modelo con tres veces el ancho del espaciado del modelo, exhibe una mejor eficiencia que los otros espaciados considerados. El rendimiento del dispositivo OWC está muy influenciado por el periodo de las olas seguido de la altura de las olas.

El porcentaje de reflexión de la onda del sistema OWCBW está determinado por el coeficiente de reflexión de la onda ( $K$ ).  $K_1$ , se define como la relación entre la altura de ola reflejada y la altura de ola incidente.

Félix et al 2019 concluyeron que con energía undimotriz es viable obtener energía sustentable y poco contaminante, pero que se ve afectada por los altos costos de los dispositivos y el mantenimiento que se requiere. El grado de éxito en la extracción de este tipo de energía depende de la disponibilidad a largo plazo de la fuente de energía y de la idoneidad de los sitios elegidos para el despliegue de dispositivos, si bien, el mayor potencial de energía de las olas se encuentra en los trópicos.

Para la costa corta y erosionada de Puducherry (12 N, 80 ° E), India, con una potencia de las olas de -10,5 kW / m, se recomendó acoplar las estructuras de defensa costera con dispositivos de columna de agua oscilante (OWC).

Los desafíos más urgentes para la extracción de energía undimotriz se tienen en los aspectos técnicos como su implementación (colocación, operación, mantenimiento, etc.) y ecológicos. La instalación de WEC podría generar beneficios ambientales, como la implementación de zonas de exclusión pesquera.

Falcao et al 2020 enuncian que en 1993 y 1995 se firmaron contratos con la Comisión Europea (programa JOULE) para los estudios básicos, diseño y construcción de una planta piloto en la isla de Pico. Se realizaron pruebas del modelo de tanque de olas para encontrar una

configuración adecuada para la estructura, así como para brindar información sobre las especificaciones de diseño óptimas para el equipo de toma de fuerza y una estimación de la cantidad de energía eléctrica producida y su variabilidad. Se realizó un primer conjunto de pruebas a escala 1:35 en una cuenca de olas en Lisboa (en el Laboratorio Nacional de Ingeniería Civil). La planta iba a estar equipada con una turbina Wells de eje horizontal que accionaba un generador eléctrico. Se dejó espacio para instalar un segundo grupo generador-turbina. El diseño estructural de la estructura de concreto armado fue realizado por Profabril SA.

El diseño estructural de las paredes tuvo en cuenta todas las combinaciones de cargas, incluidas las cargas hidrostáticas, la presión del aire dentro de la cámara y especialmente las cargas dinámicas resultantes de la rotura de las olas en la pared frontal. se completó en septiembre de 1998.

La construcción de la planta de Pico marcó un hito en el desarrollo de las energías renovables marinas. Fue la primera planta de energía undimotriz diseñada para suministrar energía eléctrica de forma permanente a una red. La planta operó por primera vez en 1999, y todavía estaba suministrando energía a la red de la isla de Pico a principios de 2018.

Medina et al 2020 examino la interacción hidrodinámica bidimensional de las olas del océano con un dispositivo OWC. Empleando la teoría de ondas lineales para una profundidad constante del mar y se desprecian los efectos viscosos y la compresibilidad no lineal del aire. Para dicho estudio eligió el sistema de coordenadas cartesianas, con el eje x correspondiente a la dirección opuesta a la propagación de la onda y el eje z correspondiente a la dirección ascendente. El origen del sistema de coordenadas se encuentra en la superficie libre no perturbada y la pared vertical izquierda dentro de la cámara.

La superficie libre dentro de la cámara OWC se caracteriza por un modo resonante similar a un pistón y se satisface la optimización de la amortiguación PTO. Para permanecer en esta condición, la tasa de extracción de energía debe ser igual a la tasa de amortiguamiento de la radiación, mientras que la superficie libre interna debe permanecer en un estado de resonancia. Físicamente, esto requiere que las ondas radiadas, resultantes del movimiento oscilatorio de la superficie libre interna, se superpongan y cancelen las ondas incidente y dispersada; para tal caso, el dispositivo ha capturado toda la energía de las olas incidente.

Como resultado de los análisis al aumentar el coeficiente de conductancia de radiación  $v$ , con respecto al coeficiente de susceptancia de radiación  $u$ , se puede lograr un aumento en la capacidad de extracción de energía del dispositivo.

También la resonancia máxima se vuelve más prominente cuanto más se sumerge la barrera. Con un calado grande, las condiciones son similares a las de un tanque cerrado con lados paralelos, donde ocurre un segundo mecanismo de resonancia cuando la frecuencia de la onda incidente es tal que el fluido dentro de la cámara se excita en un modo de chapoteo antisimétrico

Medina R et al 2021 Supuso que el fluido no era viscoso e incompresible, y consideró que el movimiento ondulatorio estaba representado adecuadamente por la teoría ondulatoria linealizada, sin tener en cuenta los efectos de la tensión superficial como condiciones para el análisis de interacción.

Realizó un análisis de convergencia tanto para EEM como para BEM. dando los resultados obtenidos por el EEM emparejado para la máxima eficiencia hidrodinámica, máxima susceptancia de radiación y conductancia de radiación  $v$  para diferentes valores de la frecuencia adimensional.

Cuanto mayor es el ángulo de incidencia, menor es el periodo de onda entrante en el que resuena la OWC. Con un aumento de  $\theta$  se incrementa el ancho de banda de las curvas de eficiencia. Este aspecto de las curvas de eficiencia puede ser beneficioso al seleccionar la ubicación de un sistema integrado de rompeolas OWC. En la práctica, un dispositivo OWC con un rango de ancho de banda de frecuencia que coincida con el período y la dirección de las olas más predominantes de una ubicación en particular puede hacer un mejor uso de la energía de las olas disponible.

Se puede diseñar un sistema integrado de rompeolas OWC para que coincida con el clima de olas predominante de una ubicación particular y optimizar así el uso del recurso energético undimotriz disponible.

Para una incidencia normal, la frecuencia natural de estas grandes oscilaciones puede estimarse razonablemente para valores pequeños de  $b/h$ , por lo que el agua contenida en el interior de la cámara puede considerarse como un cuerpo sólido.



Medina R et al 2022 El ancho de captura (CW), que considera la potencia total absorbida por un WEC, es la cantidad fundamental utilizada para evaluar el rendimiento de los sistemas OWC en los análisis de modelos 3D. El CW se define como la relación entre la potencia de onda media absorbida por el dispositivo y la potencia de onda media por unidad de longitud de cresta de la onda incidente ( $P_w$ )

La eficiencia hidrodinámica, a veces denominada ancho de captura relativo, es el CW normalizado con la dimensión representativa del dispositivo. Para un sistema OWC fijo en tierra que se utiliza como WEC de tipo terminador, esta dimensión representativa es el ancho de la cámara tdi. Una expresión para la máxima eficiencia hidrodinámica

La solución se realizó por el método de elementos de contornos con la ecuación integral de frontera de Laplace.

$$\left( \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \phi = 0,$$

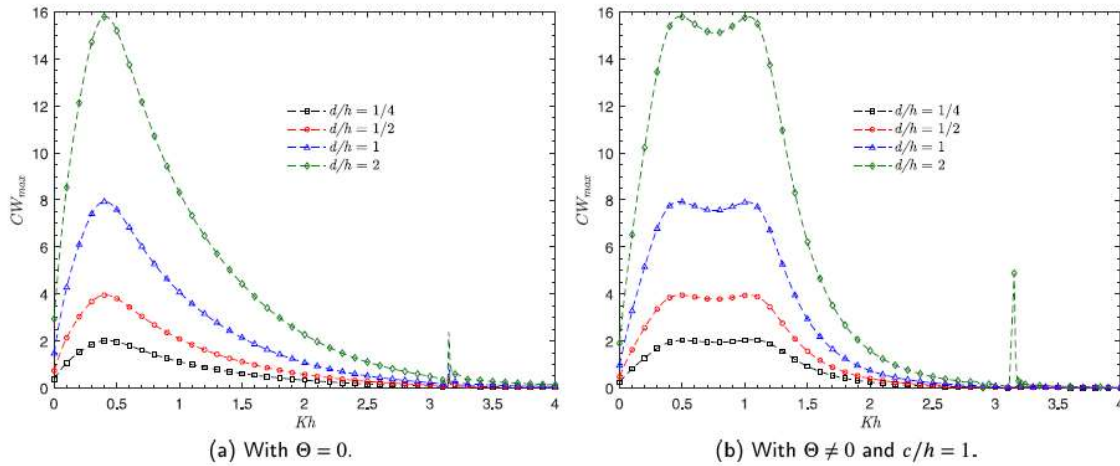
Y discretización, para ello se discretizaron las superficies límites de las dos regiones en una serie de elementos sobre los cuales se escribe el potencial y el flujo en términos de sus valores en una serie de puntos nodales. Para ello se eligieron elementos de tipo cuadrilátero para discretizar el dominio, empleando una discretización de segundo orden con una ecuación cuadrática de nueve nodos.

$$\phi(\xi, \eta) = [v_1(\xi, \eta), v_2(\xi, \eta) \dots v_9(\xi, \eta)] \cdot \begin{Bmatrix} \phi^1 \\ \phi^2 \\ \vdots \\ \phi^9 \end{Bmatrix} = Y \phi^J,$$

el rendimiento calculado no depende de la amplitud de onda en el enfoque numérico, ya que se implementó la teoría de onda lineal al formular el problema.

Los resultados numéricos se basan en la suposición de un fluido ideal, por lo que los efectos viscosos y la separación del flujo debido a la pared frontal pueden contribuir a la discrepancia entre los resultados y dar lugar a una sobreestimación del rendimiento hidrodinámico. Además,

la tasa de extracción de energía modelada por el sistema PTO, así como la pérdida de energía a través de él por disipación viscosa durante las pruebas, también podrían influir en los resultados.



Las gráficas (a) y (b) muestran los resultados numéricos para la frecuencia no dimensional de  $CW Kh$  para varias relaciones de ancho de cámara a máx contra la profundidad del agua  $d/h$  ( $= 1/4, 1/2, 1$  y  $2$ ). Puede verse que el área efectiva del  $CW_{max}$  bajo las curvas aumenta cuando aumenta la relación de ancho de cámara  $d/h$ . Esto se debe a que el ancho de captura indica que se espera que el dispositivo extraiga la potencia de un ancho de onda incidente igual a la dimensión representativa del dispositivo OWC ( $d = 1,975, 3,95, 7,90$  y  $15,8$  m). Además, se muestra que las curvas de máxima anchura de captura aumentan hasta un máximo y luego decrecen. Este pico se debe a los grandes movimientos de agua dentro de la cámara que ocurren cuando la columna de agua interna es excitada por la onda incidente en un movimiento resonante tipo pistón. El dispositivo OWC depende en gran medida de la frecuencia de la onda y funciona bien cuando interactúa con ondas que están más cerca de la frecuencia de resonancia natural de la estructura. Por lo tanto, se requiere una comprensión clara de la banda de frecuencia de onda disponible en un sitio potencial dado para una planta OWC. Si el ancho de banda de rendimiento de OWC es amplio, implica que el dispositivo será eficiente en un rango más amplio de frecuencias.

El efecto de la compresibilidad del aire cuando la altura de la columna de aire atrapado es igual a la profundidad del agua. Comparando, la gráfica (b) se ve que se amplía el ancho de banda del ancho de captura, mientras que el valor de la frecuencia pico resonante aumenta ligeramente.

Así, para el volumen de la cámara de aire considerado en este caso, se absorbe más energía de las olas para valores de  $Kh$  superiores a la frecuencia de resonancia. En la gráfica (a), esta resonancia ocurre en  $Kh$  0.4396, mientras que en la gráfica (b) ocurre en  $Kh=0.5205$ .

#### 4. Construcción de una cámara de oscilación para pruebas en laboratorio

El objetivo principal de la tesis es analizar el comportamiento físico de una OWC bajo condiciones controladas, para cumplir lo anterior se construirá, con acrílico de 12 mm, una OWC similar a la cámara de Mutriku Bahía de Viscaya, España, Figura 1 la escala será 1:20, lo anterior está sustentado en que esta cámara actualmente se encuentra en operación y sus administradores permiten realizar ensayos a escala real, por lo que los datos que se obtengan de esta tesis permitirán, en trabajos complementarios, realizar comparaciones directas entre modelo y prototipo.



*Figura 1. OWC integrada al rompeolas del puerto de Mutriku, España*

En la Figura 2 se observa el corte transversal de la planta OWC de Mutriku, en la Figura 3 se presenta el esquema de funcionamiento de la planta, en el cual se indica la forma en que el oleaje entra por la parte inferior de la OWC y genera la oscilación de la columna de aire dentro de la cámara de resonancia, en la Figura 4 se presentan las dimensiones del modelo a escala 1:20

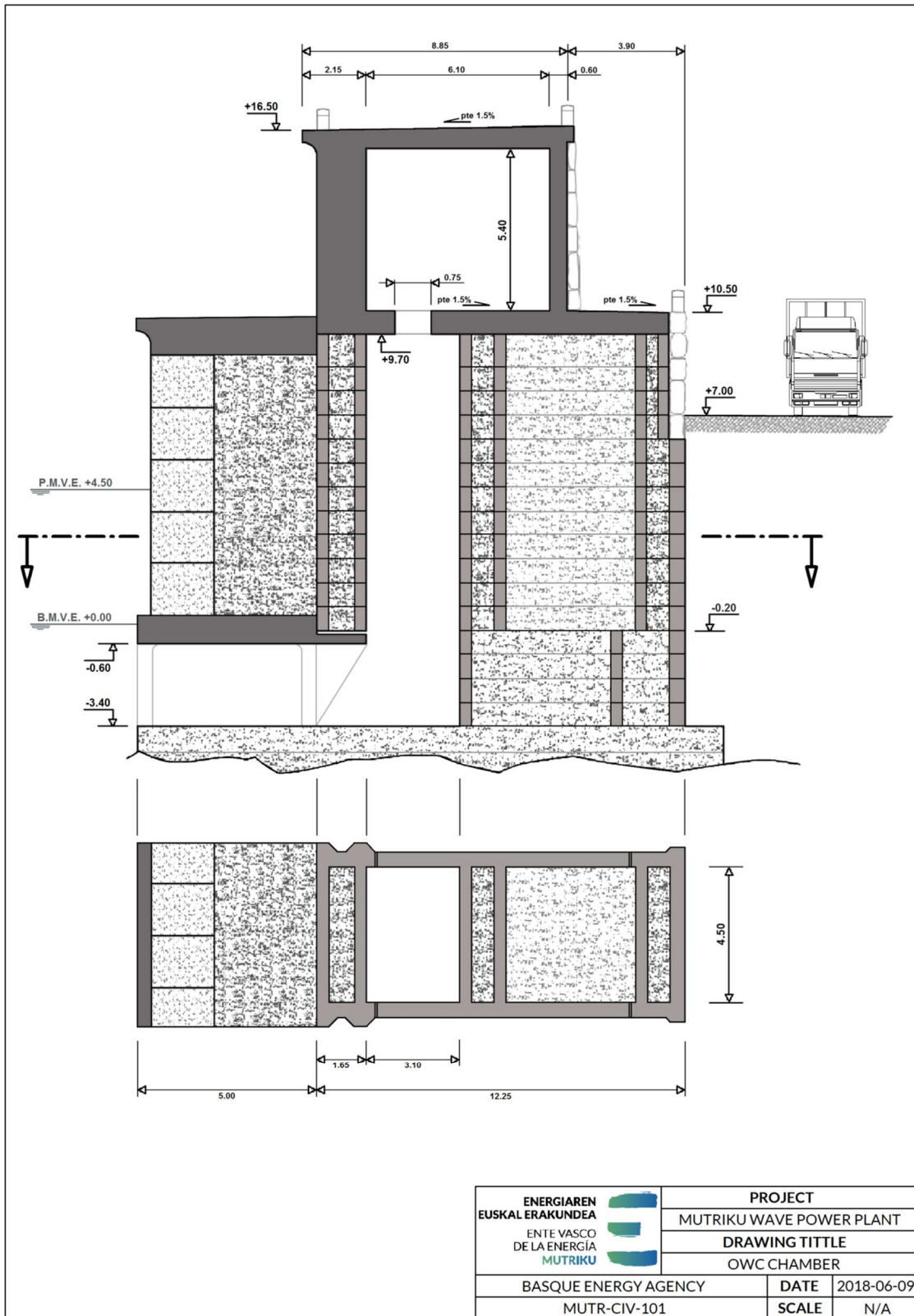


Figura 2. Corte transversal de la planta OWC de Mutriku, España

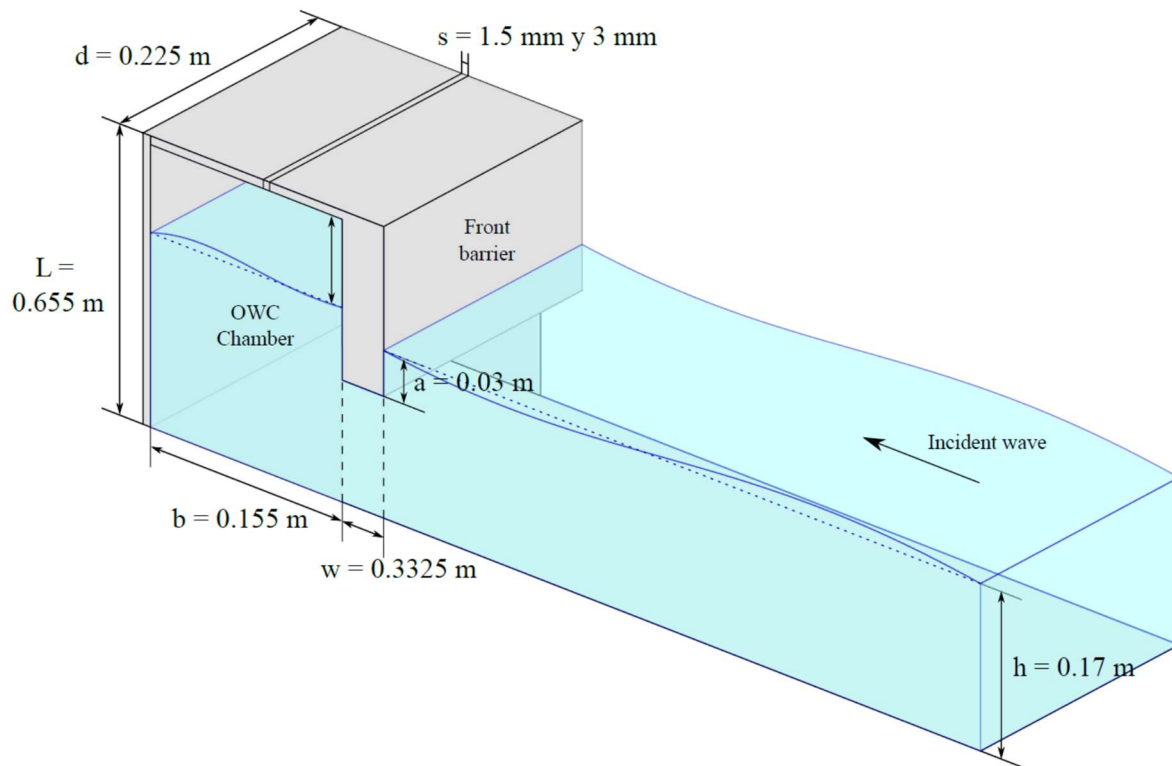


Figura 3. Esquema de funcionamiento para una OWC

Los pasos seguidos para la fabricación y ensamblaje de la OWC fueron:

- Obtención de medidas, a escala 1:20, en la Figura 4. se detallan las dimensiones de la OWC

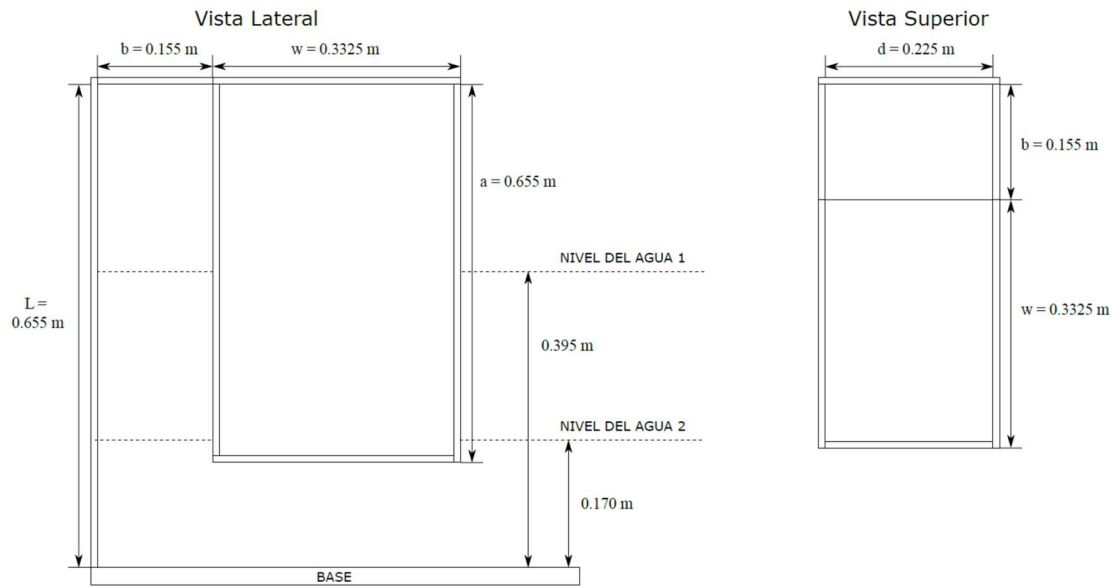


Figura 4. Medidas OWC a escala 1:20

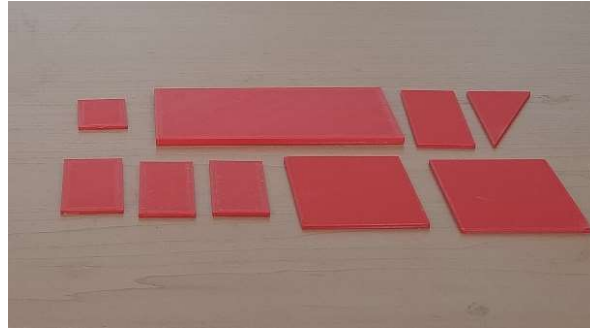
- Armado a escala 1:100 de la OWC en cartón para verificar que las dimensiones de la cámara son correctas, en la Figura 5 se presenta esta primera aproximación



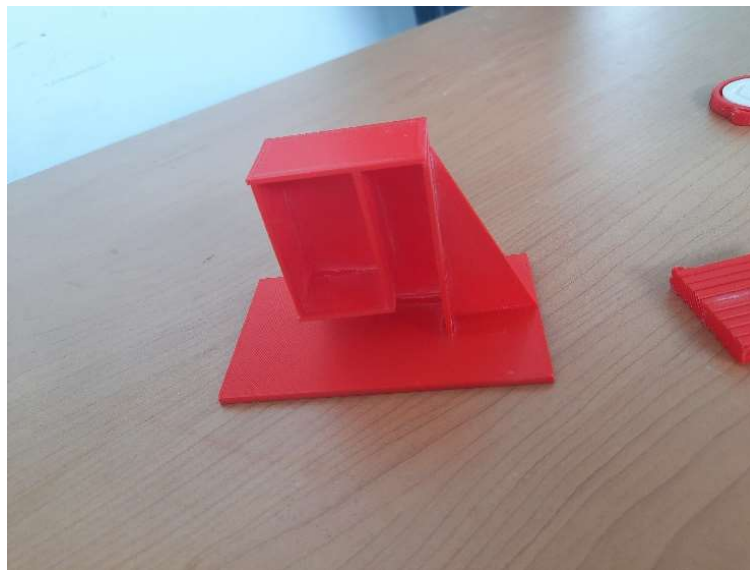
Figura 5. OWC a escala 1:100

- Construcción de la OWC por medio de impresión en PLA, una vez corroboradas las dimensiones se generaron las piezas que componen la OWC a escala 1:20 por medio de

impresión en 3D, las cuales fueron ensambladas para verificar el correcto ajuste entre todas las piezas, se presenta el diseño de la OWC por medio de RAISE3D, en la Figura 6 se presenta las piezas impresas en PLA, en la Figura 7 se muestra la OWC ensamblada



*Figura 6. Piezas de la OWC impresas en PLA*



*Figura 7. OWC conformada por piezas impresas en PLA*

Una vez se corroboró que las dimensiones de las piezas eran correctas se procedió a realizar, por medio de un proveedor externo a la Universidad Autónoma de Campeche, la OWC en acrílico de 12 mm, Figura 8





*Figura 8. Piezas de Acrílico para OWC, espesor 12 mm*

Para ensamblar las piezas de acrílico se realizaron perforaciones, de  $\frac{1}{4}$ " en los soportes tipo "L" de acrílico para que el anclaje se realizara por medio de tornillos de acero inoxidable.

Para poder realizar las perforaciones, fue necesario elaborar una base, para colocar las eles "L" con firmeza y poder realizar las perforaciones. Para ellos se utilizaron piezas de madera y un sargento de tal manera que la pieza de acrílico no tuviese movimiento al momento de realizar la perforación con la broca y así evitar que esta se agriete y/o rompa, Figura 9



*Figura 9. Perforación de las "L" de acrílico.*

Para colocar las piezas “L” y unir cada una de las secciones de la OWC de acrílico, fue necesario la utilización de una llave para sujetar y ajustar el tornillo en el extremo interno donde se colocó una tuerca con rondana de presión. Por el otro extremo se sujetó dicho tornillo con un desarmador plano, se utilizó un nivel de mano para nivelar la pieza como se muestra en la figura 10, con esto se mejoró el acoplamiento de cada una de las secciones evitando que quedasen aberturas lo cual afectaría el desempeño de la cámara OWC.



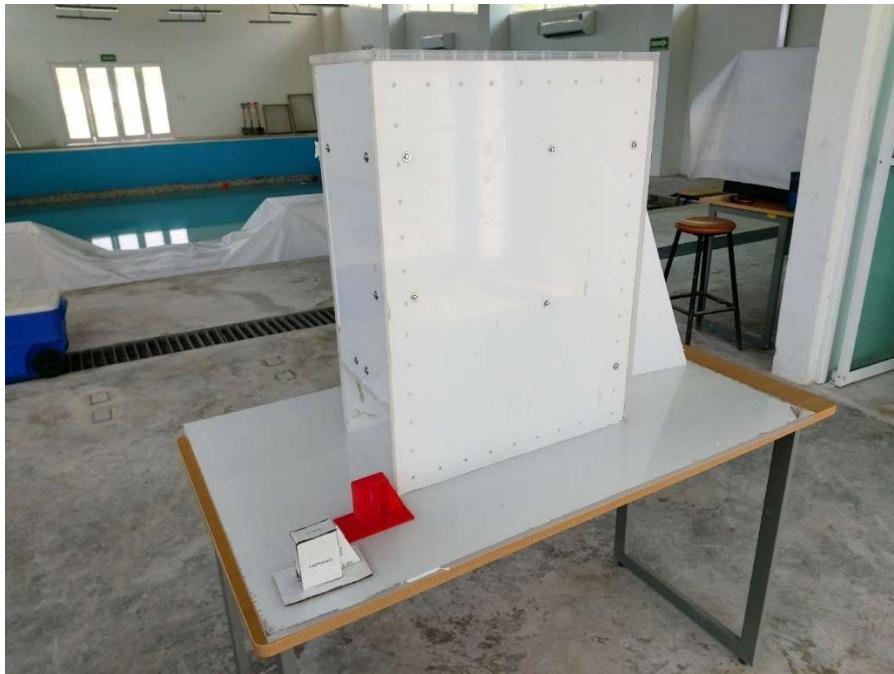
*Figura 10. Colocación y nivelación de piezas*

El paso siguiente fue realizar el sellado de las perforaciones que no se utilizaron en cada placa, esto se realizó con silicón transparente para evitar el ingreso del agua, Figura 11



*Figura 11. Sellado de perforaciones con silicón.*

Finalmente se armó toda la estructura, en la Figura 12 se observa la OWC terminada, al igual que los modelos en papel y en PLA



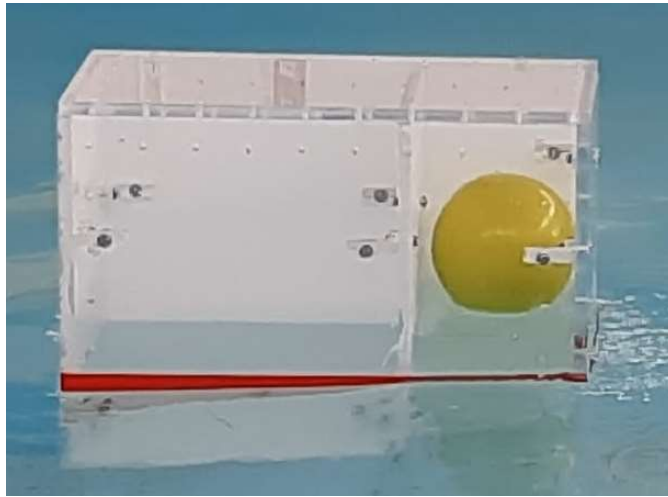
*Figura 12. Cámara OWC armada.*

Una vez terminada se le colocó una marca a 0.40 m con cinta de color rojo para indicar el nivel de agua al que se realizarían los ensayos. Esto con el propósito de visualizar de manera física el comportamiento de la columna de agua en la parte interna de la cámara al momento de la realización de los ensayos, Figura 13



*Figura 13. Presentación de la Cámara OWC en tanque*

En la Figura 13, se probó el comportamiento de la cámara mediante un ensayo con oleaje regular de 0.05 m, en la parte interna donde se genera la columna de agua, se colocó una pelota, con la cual fue posible identificar de manera visual el aumento del nivel de agua al interior de la cámara, de este ensayo se observó que era necesario aumentar el peso de la OWC para que no se desplazara por la acción del oleaje, para esto se construyó en madera la base de la Figura 14 sobre la que se pusieron plomos con peso unitario de 10 kg, en la Figura 15 se presenta la OWC final, ya con la adaptación del sensor de nivel que se utilizará para medir la variación de la superficie libre al interior de la cámara de oscilación



*Figura 13. Primer ensayo de la cámara OWC.*



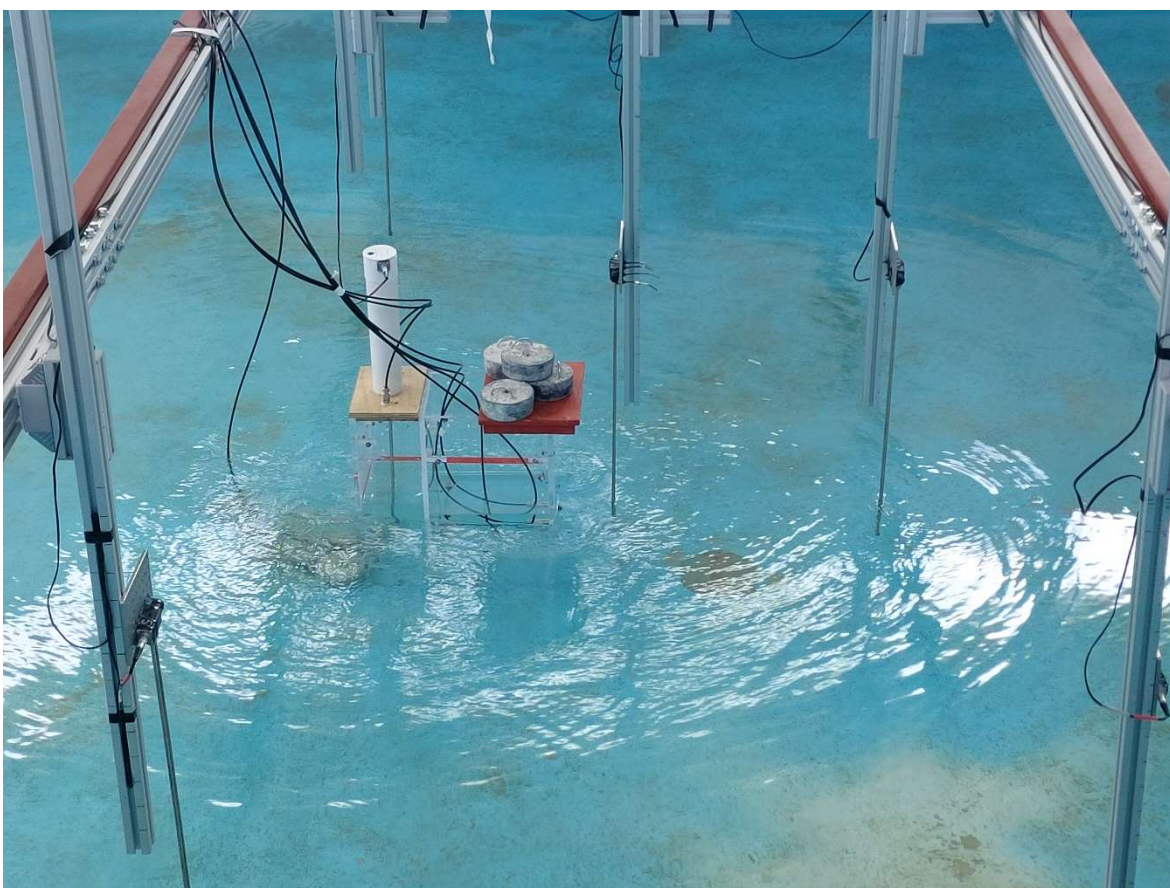
*Figura 14. Tapa de madera para la sección de la Cámara*



*Figura 15. Presentación del sensor ubicado en la parte central del área de influencia en la Cámara OWC*

## 5. Pruebas de laboratorio para la cámara de oscilación del oleaje

Para este apartado se realizarán pruebas con oleaje regular de 0.02, 0.04, 0.06, 0.08 y 0.10 m y periodos de 1.0 a 3.0 s, con una profundidad de propagación de 0.40 m, para estos se obtuvo variación de la superficie libre en 3 sensores de nivel, dos ubicados en la parte exterior de la cámara (sensor 1 a una distancia de la cámara de 85 cm y sensor 2 a 10 cm de la cámara) y otro, sensor 3, directamente en la parte interna de la cámara para evaluar el nivel de incremento del oleaje.



*Figura 16. Ubicación de sensores de nivel 1 a 3*

Se realizaron pruebas en el laboratorio con oleaje de  $0^\circ$  de acuerdo con las condiciones elegidas. Se procesaron los datos del sensor número 3, el cual se encuentra en la parte interna de la cámara, en el área de influencia de las olas.

En la tabla 1 se muestra las consideraciones para el diseño del oleaje en los ensayos de laboratorio, todas con una duración de 180 segundos.

*Tabla 1. Características de los ensayos con oleaje regular*

<b>No</b>	<b>h (m)</b>	<b>H (m)</b>	<b>t (s)</b>	<b>Dirección n (°)</b>	<b>Duración n (s)</b>	<b>H prot (m)</b>	<b>t prot (s)</b>
1	0.40	0.020	1.0	0.0	300	0.40	4.47
2	0.40	0.020	1.2	0.0	300	0.40	5.37
3	0.40	0.020	1.4	0.0	300	0.40	6.26
4	0.40	0.020	1.6	0.0	300	0.40	7.16
5	0.40	0.020	1.8	0.0	300	0.40	8.05
6	0.40	0.020	2.0	0.0	300	0.40	8.94
7	0.40	0.020	2.2	0.0	300	0.40	9.84
8	0.40	0.020	2.4	0.0	300	0.40	10.73
9	0.40	0.020	2.6	0.0	300	0.40	11.63
10	0.40	0.020	2.8	0.0	300	0.40	12.52
11	0.40	0.020	3.0	0.0	300	0.40	13.42
12	0.40	0.040	1.0	0.0	300	0.80	4.47
13	0.40	0.040	1.2	0.0	300	0.80	5.37
14	0.40	0.040	1.4	0.0	300	0.80	6.26
15	0.40	0.040	1.6	0.0	300	0.80	7.16
16	0.40	0.040	1.8	0.0	300	0.80	8.05
17	0.40	0.040	2.0	0.0	300	0.80	8.94
18	0.40	0.040	2.2	0.0	300	0.80	9.84
19	0.40	0.040	2.4	0.0	300	0.80	10.73
20	0.40	0.040	2.6	0.0	300	0.80	11.63
21	0.40	0.040	2.8	0.0	300	0.80	12.52
22	0.40	0.040	3.0	0.0	300	0.80	13.42
23	0.40	0.060	1.0	0.0	300	1.20	4.47
24	0.40	0.060	1.2	0.0	300	1.20	5.37
25	0.40	0.060	1.4	0.0	300	1.20	6.26
26	0.40	0.060	1.6	0.0	300	1.20	7.16



Simulación física de una cámara de oscilación del oleaje

27	0.40	0.060	1.8	0.0	300	1.20	8.05
28	0.40	0.060	2.0	0.0	300	1.20	8.94
29	0.40	0.060	2.2	0.0	300	1.20	9.84
30	0.40	0.060	2.4	0.0	300	1.20	10.73
31	0.40	0.060	2.6	0.0	300	1.20	11.63
32	0.40	0.060	2.8	0.0	300	1.20	12.52
33	0.40	0.060	3.0	0.0	300	1.20	13.42
34	0.40	0.080	1.0	0.0	300	1.60	4.47
35	0.40	0.080	1.2	0.0	300	1.60	5.37
36	0.40	0.080	1.4	0.0	300	1.60	6.26
37	0.40	0.080	1.6	0.0	300	1.60	7.16
38	0.40	0.080	1.8	0.0	300	1.60	8.05
39	0.40	0.080	2.0	0.0	300	1.60	8.94
40	0.40	0.080	2.2	0.0	300	1.60	9.84
41	0.40	0.080	2.4	0.0	300	1.60	10.73
42	0.40	0.080	2.6	0.0	300	1.60	11.63
43	0.40	0.080	2.8	0.0	300	1.60	12.52
44	0.40	0.080	3.0	0.0	300	1.60	13.42
45	0.40	0.100	1.0	0.0	300	2.00	4.47
46	0.40	0.100	1.2	0.0	300	2.00	5.37
47	0.40	0.100	1.4	0.0	300	2.00	6.26
48	0.40	0.100	1.6	0.0	300	2.00	7.16
49	0.40	0.100	1.8	0.0	300	2.00	8.05
50	0.40	0.100	2.0	0.0	300	2.00	8.94
51	0.40	0.100	2.2	0.0	300	2.00	9.84
52	0.40	0.100	2.4	0.0	300	2.00	10.73
53	0.40	0.100	2.6	0.0	300	2.00	11.63
54	0.40	0.100	2.8	0.0	300	2.00	12.52
55	0.40	0.100	3.0	0.0	300	2.00	13.42



Figura 17. Sensor de nivel de VTI

Para ello se utilizó un programa, el IMC Estudio el cual captura los datos de los sensores de nivel, figura 17, el programa cuenta con una lista de configuración de canales organizados como se muestra en la figura 18, lo que facilita la medición y observación de los datos y almacenamiento.

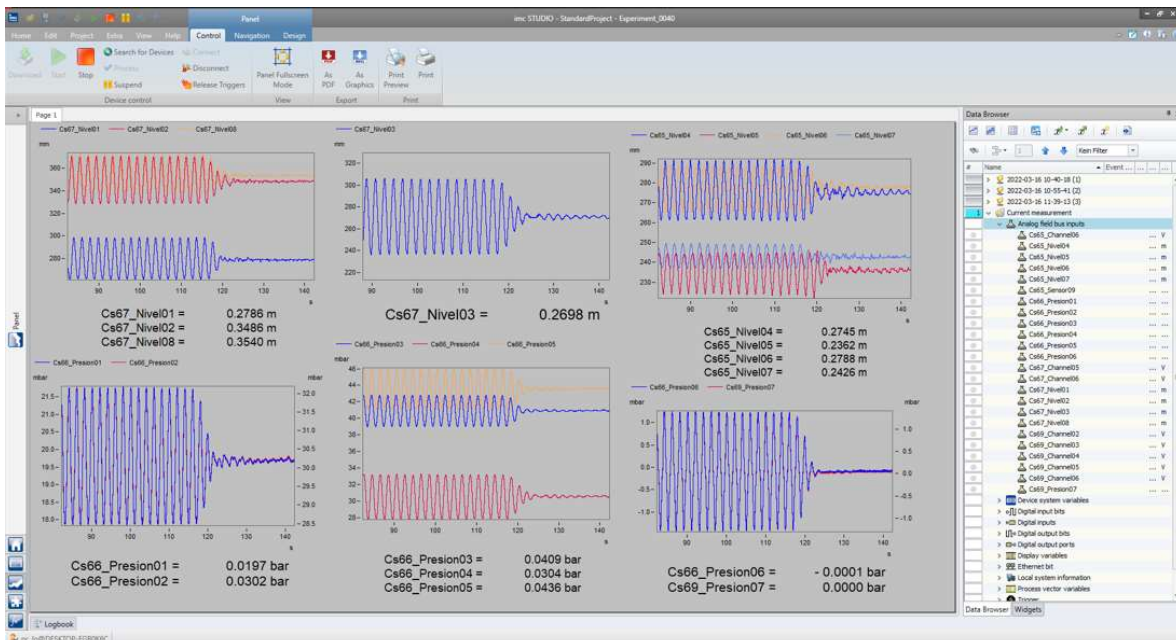


Figura 18. Panel de visualización de datos obtenidos por sensores. Programa imc STUDIO.

Para poder recibir los datos y visualizarlos en el programa imc STUDIO, fue necesario conectar los sensores de nivel Figura 17, al equipo WG-8CH89 (Figura 17a), el cual consta de 8 módulos de medida de altura de ola como se muestra en la figura 19.

Los sensores de nivel se conectan al cable de sensor de medida de altura de ola, y este se conecta al equipo WG-8CH.



Figura 17a



Figura 17b

Figura 17. Equipo WG-8CH. 8 módulos de altura de ola (WG-1CH-E), y cable receptor del sensor de nivel.

Para poder conectar el equipo WG-8CH al imc CANSAS fue necesario adaptar el cable LEMO receptor del imc CANSAS con un conector de salida de audio y video coaxial positivo y negativo macho como se muestra en la Figura 18



Figura 18. Conector coaxial BNC macho.



Figura 19a



Figura 19b

Figura 19. Conector coaxial conectado (Figura 19a) a cable LEMO (Figura 19b) Imc CANSAS

Una vez conectado el equipo WG-8CH con el imc CANSAS, figura 19, se pudo transmitir la información de los sensores al imc BUSDAQ, figura 20a y 20b, dispositivo que permite registrar los datos y guardarlos. Mismo dispositivo se conecta a una computadora en la cual se tenga instalado el programa imc FAMOS. Esto permite al usuario recibir un sistema de medición de manera compacta y modular, la cual puede manipular para observar los datos, ya sea, de manera general o de algún valor en específico.

Además, presenta la información en tiempo real acerca del estado de una medición y del dispositivo. Particularmente conveniente es la posibilidad de transferir los datos directamente a FAMOS para la evaluación automática o para almacenarlo en forma estructurada.



(a)



(b)

Figura 20. imc BUSDAQ

En el panel del IMC Studio es posible observar la medición de los sensores, ya sea de manera gráfica o numérica. En la Figura 21 se puede observar la medición y variación de nivel del sensor 3 de manera gráfica. En la Figura 22 se muestran los sensores 1 y 2 colocados en la parte frontal de la cámara.

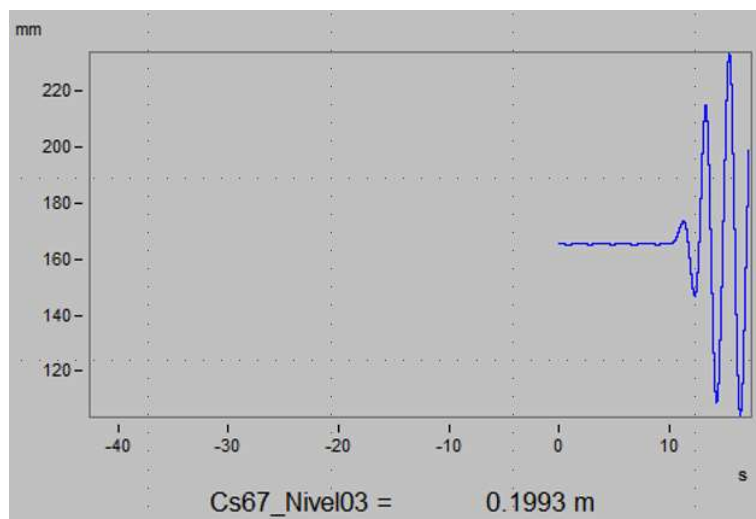


Figura 21. Medición con sensor de nivel.

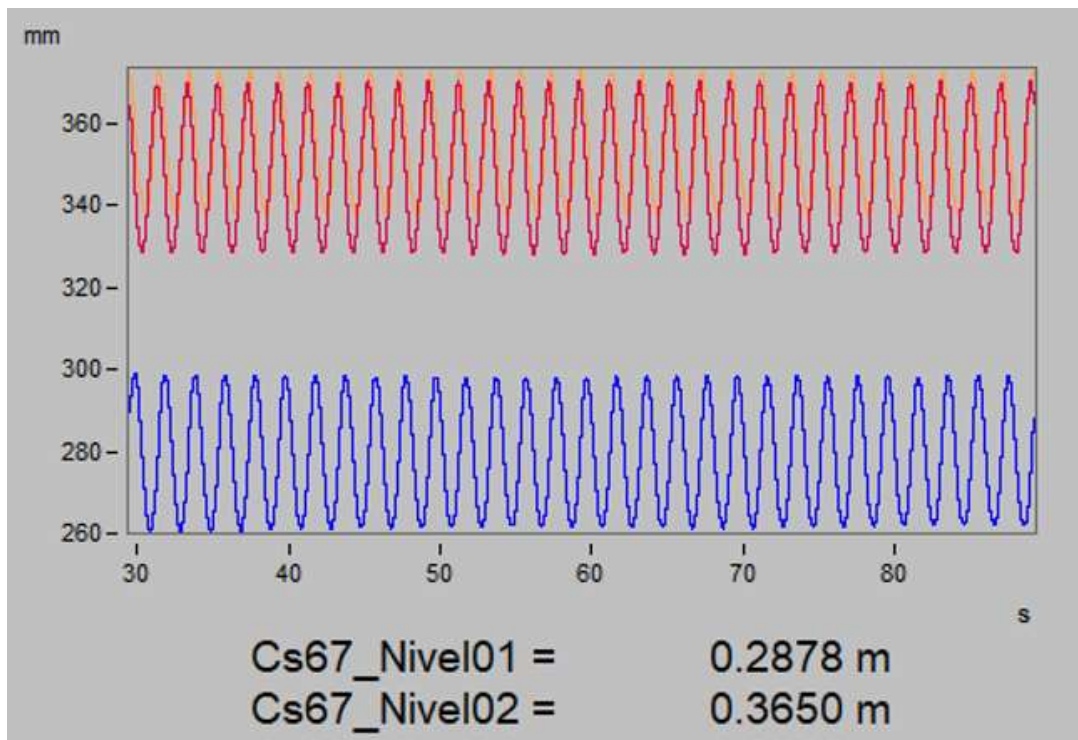


Figura 22. Sensores de nivel 1 y 2 ubicados al frente de la cámara.

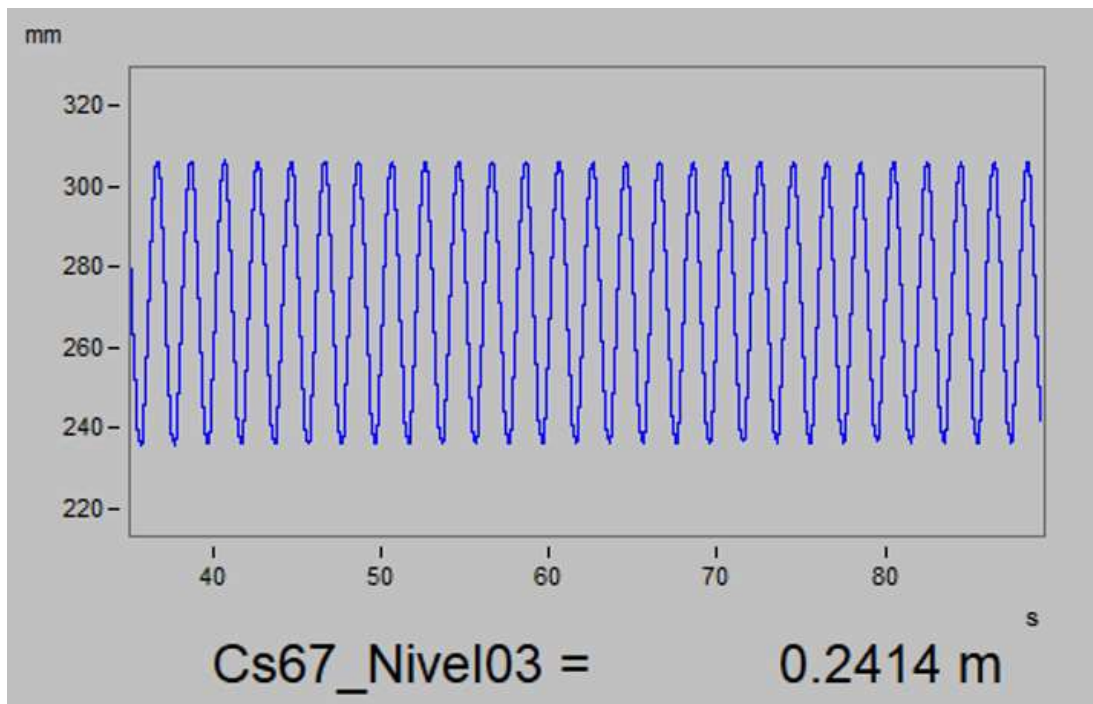


Figura 23. Variación del nivel de agua dentro de la Cámara.

En la figura 23 se observa la variación del nivel de agua dentro de la cámara con respecto al tiempo de generación durante un ensayo de laboratorio.

Para la realización de los ensayos, se colocó la cámara OWC, a una distancia de 6.80 m del generador de oleaje, esto para evitar que las olas reflejadas por la playa modifiquen el oleaje que llega a la Cámara.

## 6. Análisis de resultados

Para cada serie de ensayos y sensores se realizará el análisis estadístico del oleaje, por medio del programa WaveLab Figura 24, posteriormente se realizaron comparaciones de altura de ola significativa, así como variación de la potencia del oleaje tanto al interior como el exterior del oleaje.

No	h (m)	H (m)	t (s)	Long Onda (m)	Sensor 03 (Dentro de la OWC)				Potencia Oleaje 3	Relación Potencia 3/1
					Hs (m)	T 1/3 (s)	Hs OWC/Hs	Tp OWC/T		
1	0.40	0.020	1.0	1.4637	0.00471	0.999	0.24	1.00	0.02143	0.0483
2	0.40	0.020	1.2	1.9362	0.01270	1.200	0.64	1.00	0.21690	0.3246
3	0.40	0.020	1.4	2.3928	0.02870	1.400	1.44	1.00	1.34600	2.7413
4	0.40	0.020	1.6	2.8359	0.03800	1.600	1.90	1.00	2.57100	3.4112
5	0.40	0.020	1.8	3.2691	0.05082	1.800	2.54	1.00	4.99400	8.6882
6	0.40	0.020	2.0	3.6950	0.05118	2.000	2.56	1.00	5.27100	4.8536
7	0.40	0.020	2.2	4.1155	0.04919	2.200	2.46	1.00	5.08000	5.3094
8	0.40	0.020	2.4	4.5320	0.04542	2.400	2.27	1.00	4.36400	5.8295
9	0.40	0.020	2.6	4.9453	0.03960	2.600	1.98	1.00	3.35000	3.3201
10	0.40	0.020	2.8	5.3562	0.02615	2.800	1.31	1.00	1.50200	2.0213
11	0.40	0.020	3.0	5.7651	0.02505	3.000	1.25	1.00	1.29800	1.4949
12	0.40	0.040	1.0	1.4637	0.00994	1.000	0.25	1.00	0.09820	0.0410
13	0.40	0.040	1.2	1.9362	0.02529	1.200	0.63	1.00	0.86970	0.3144
14	0.40	0.040	1.4	2.3928	0.04784	1.400	1.20	1.00	3.75000	2.0358
15	0.40	0.040	1.6	2.8359	0.06457	1.600	1.61	1.00	7.26600	2.5558
16	0.40	0.040	1.8	3.2691	0.07987	1.800	2.00	1.00	12.25000	5.5962
17	0.40	0.040	2.0	3.6950	0.08757	2.000	2.19	1.00	15.20000	3.8569
18	0.40	0.040	2.2	4.1155	0.08492	2.200	2.12	1.00	14.91000	3.8231
19	0.40	0.040	2.4	4.5320	0.08325	2.400	2.08	1.00	14.40000	5.4442
20	0.40	0.040	2.6	4.9453	0.07867	2.600	1.97	1.00	12.82000	3.3024
21	0.40	0.040	2.8	5.3562	0.06101	2.800	1.53	1.00	7.73500	1.9637
22	0.40	0.040	3.0	5.7651	0.05821	3.000	1.46	1.00	6.27700	1.4093
23	0.40	0.060	1.0	1.4637	0.01458	1.000	0.24	1.00	0.20440	0.0383
24	0.40	0.060	1.2	1.9362	0.03635	1.200	0.61	1.00	1.83800	0.3034
25	0.40	0.060	1.4	2.3928	0.06128	1.400	1.02	1.00	6.20100	1.7824
26	0.40	0.060	1.6	2.8359	0.08684	1.600	1.45	1.00	12.91000	2.0430
27	0.40	0.060	1.8	3.2691	0.10340	1.800	1.72	1.00	20.19000	4.1246
28	0.40	0.060	2.0	3.6950	0.11350	2.000	1.89	1.00	25.56000	3.1478
29	0.40	0.060	2.2	4.1155	0.11540	2.200	1.92	1.00	27.28000	3.0982
30	0.40	0.060	2.4	4.5320	0.11090	2.400	1.85	1.00	25.29000	4.5642



31	0.40	0.060	2.6	4.9453	0.10940	2.600	1.82	1.00	24.15000	2.9426
32	0.40	0.060	2.8	5.3562	0.09407	2.800	1.57	1.00	17.26000	1.7551
33	0.40	0.060	3.0	5.7651	0.08970	3.000	1.50	1.00	13.87000	1.4522
34	0.40	0.080	1.0	1.4637	0.01640	1.000	0.21	1.00	0.30110	0.0342
35	0.40	0.080	1.2	1.9362	0.04481	1.200	0.56	1.00	2.79500	0.2875
36	0.40	0.080	1.4	2.3928	0.07201	1.400	0.90	1.00	8.56000	1.5666
37	0.40	0.080	1.6	2.8359	0.10340	1.600	1.29	1.00	18.77000	1.7542
38	0.40	0.080	1.8	3.2691	0.12170	1.800	1.52	1.00	28.16000	2.9868
39	0.40	0.080	2.0	3.6950	0.13680	2.000	1.71	1.00	37.17000	2.5337
40	0.40	0.080	2.2	4.1155	0.14080	2.200	1.76	1.00	41.02000	2.7220
41	0.40	0.080	2.4	4.5320	0.13450	2.400	1.68	1.00	36.81000	3.7367
42	0.40	0.080	2.6	4.9453	0.13540	2.600	1.69	1.00	36.43000	2.5038
43	0.40	0.080	2.8	5.3562	0.12220	2.800	1.53	1.00	28.08000	1.6936
44	0.40	0.080	3.0	5.7651	0.11700	3.000	1.46	1.00	22.59000	1.4621
45	0.40	0.100	1.0	1.4637	0.02166	1.000	0.22	1.00	0.52860	0.0368
46	0.40	0.100	1.2	1.9362	0.05264	1.200	0.53	1.00	3.86100	0.2581
47	0.40	0.100	1.4	2.3928	0.08323	1.400	0.83	1.00	11.29000	1.3983
48	0.40	0.100	1.6	2.8359	0.1185	1.600	1.19	1.00	24.69000	1.6934
49	0.40	0.100	1.8	3.2691	0.1362	1.800	1.36	1.00	35.22000	2.4156
50	0.40	0.100	2.0	3.6950	0.1548	2.000	1.55	1.00	47.42000	2.2875
51	0.40	0.100	2.2	4.1155	0.1622	2.200	1.62	1.00	53.98000	2.4853
52	0.40	0.100	2.4	4.5320	0.1488	2.400	1.49	1.00	44.18000	2.9123
53	0.40	0.100	2.6	4.9453	0.1551	2.596	1.55	1.00	46.46000	2.0853
54	0.40	0.100	2.8	5.3562	0.1446	2.800	1.45	1.00	37.20000	1.5506
55	0.40	0.100	3.0	5.7651	0.1383	3.000	1.38	1.00	31.88000	1.5190

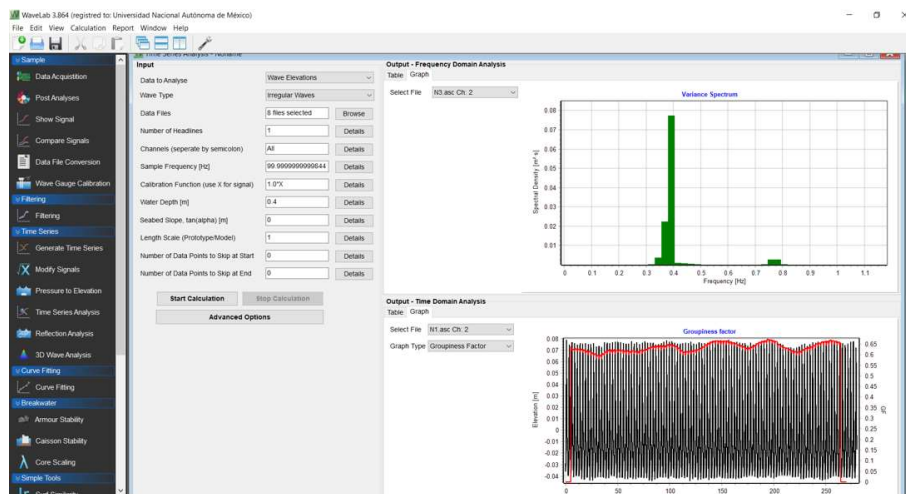


Figura 24. Pantalla del programa WaveLab.

En la Tabla 2 se presenta los resultados para cada ensayo de laboratorio

Tabla 2. Resultados obtenidos de las pruebas de laboratorio.

En las figuras 25 a **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se presentan, en función del periodo y para cada altura de ola inicial, las gráficas de altura de ola significativa, relación de altura de ola significativa entre sensor 3 y 1 y Potencia del oleaje para el sensor 3.

En la Figura 25 se muestran las alturas de olas dentro de la cámara OWC con respecto a los periodos de onda elegidos para los ensayos, de esta manera podemos apreciar para que periodo se obtiene una altura de ola mayor al interior de la cámara; para altura de ola incidente bajas, es decir 0.02 m el mayor efecto se obtiene para periodos de 1.8 s, conforme aumenta la altura de ola el periodo de mayor resonancia se incrementa, llegando a ser, para la altura de 0.10 m, un periodo de 2.2s, de manera general, el máximo de aprovechamiento se obtiene entre 1.8 y 2.0 s.

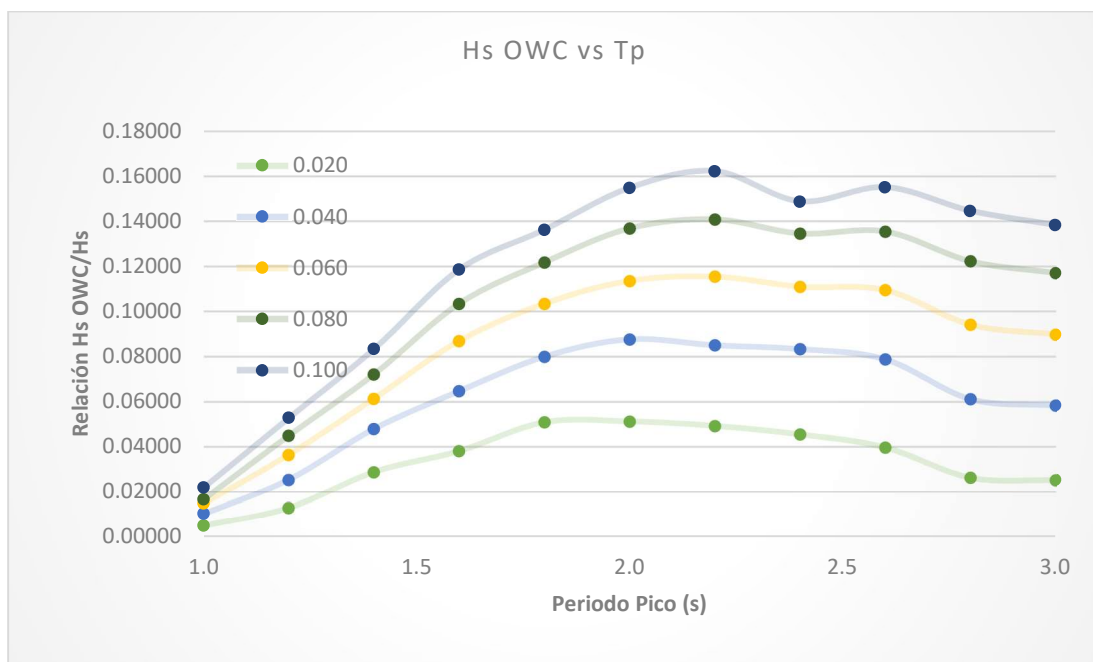


Figura 25. Altura de ola significativa en función del periodo

Podemos observar en la Figura 26, la relación entre la altura de ola y la altura de ola generada con respecto al periodo de las olas, para los sensores que se encuentran frente a la Cámara OWC, el comportamiento es similar al indicado anteriormente.

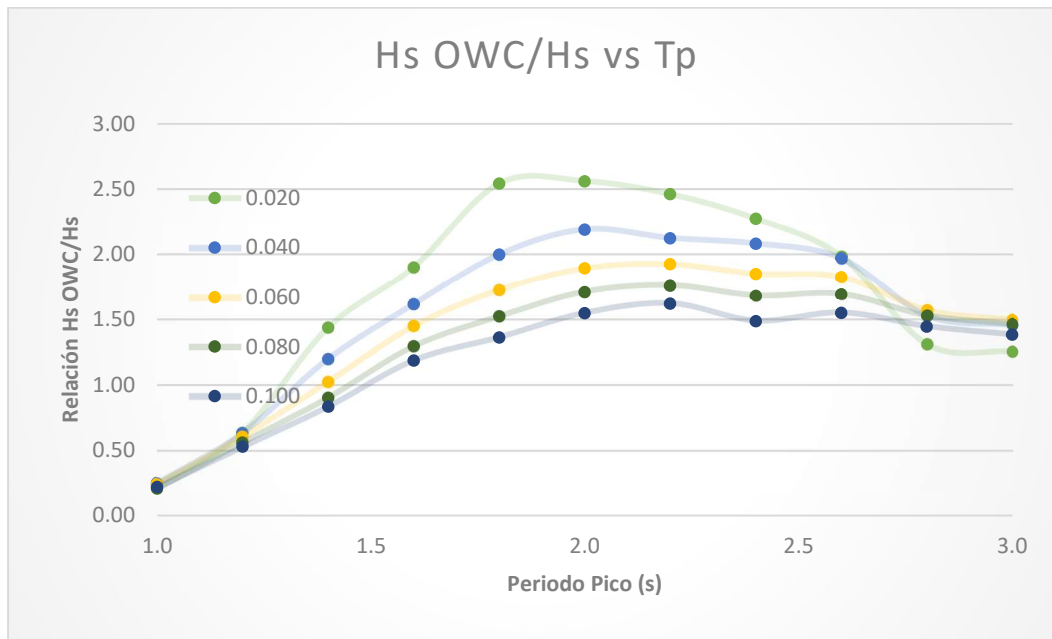


Figura 26. Relación de altura de ola entre sensores 3 y 1, en función del periodo

La Figura 27 indica la potencia de la energía del oleaje dentro de la cámara en función del periodo, de manera clara, para todos los periodos se obtiene un máximo alrededor de 2.2 s, se observan 3 regiones, la primera comprendida entre 1.0 y 1.8 s, en el cual a mayor periodo se obtiene una mayor potencia, la segunda región está comprendida entre 1.8 y 2.6 s, en la cual, si bien hay un máximo alrededor de 2.2 s, la potencia tiende a ser constante, por último, para periodos superiores a 2.6 s se presente una disminución en la potencia, la cual tiende a estabilizarse para 3.0 s

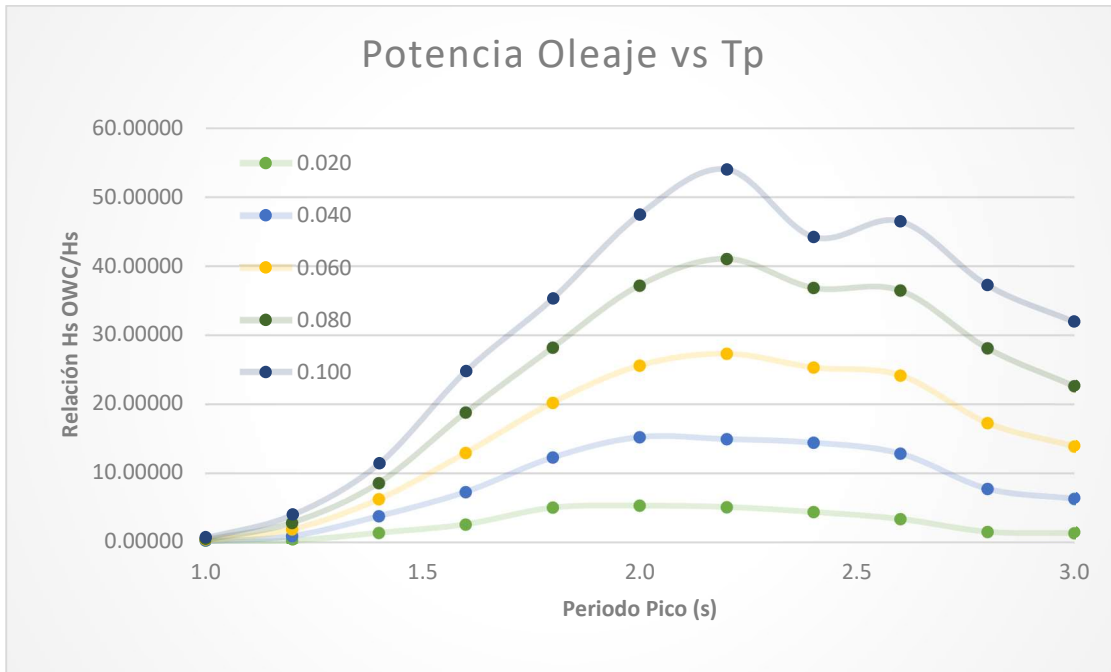


Figura 27. Potencia de energía al interior de la OWC en función del periodo

## Conclusiones

A nivel mundial, el uso de cámaras de oscilación del oleaje es una alternativa viable para el aprovechamiento de la energía undimotriz, estos dispositivos tienen la gran ventaja de que pueden ser implementados en rompeolas ya construidos, lo cual debe hacerse por medio de un diseño ingenieril que garantice la estabilidad de la estructura bajo las condiciones de diseño originales.

Antes de construir un modelo a escala de laboratorio es pertinente que este sea fabricado a una escala menor para garantizar que las dimensiones son correctas, de tal forma que las dimensiones sean verificadas y reales, para este trabajo el haber construido el modelo de la OWC primero en cartón, luego en PLA permitió corregir las dimensiones internas de la OWC, con el consiguiente ahorro en materiales de acrílico.

Con los resultados obtenidos de las pruebas realizadas en el laboratorio, se puede notar que en periodos de 2.2 s la variación del nivel del agua dentro de la cámara llega a su máximo, siendo esto un buen indicador para la conversión de energía undimotriz en energía eléctrica por medio, por ejemplo, de una turbina que se ubique en la parte superior de la cámara de oscilación del oleaje.

El dimensionamiento de las partes de la cámara OWC juega un papel importante en el rendimiento del dispositivo, si bien, para un mejor aprovechamiento de la presión generada en la cámara, se recomienda el uso de turbinas Wells, dada su funcionalidad de rotar continuamente en un solo sentido independientemente de la dirección del aire, ya sea por expulsión o succión de la cámara OWC.

Los OWC colocados en rompeolas costeros tienen la ventaja de reducir costos, es un buen punto para tomar en cuenta, ya que los dispositivos suelen tener costos elevados, tanto en producción como en mantenimiento, el combinar OWC con rompeolas mejora el aprovechamiento de ambos, protege la costa del oleaje y al mismo tiempo aprovecha la energía de las olas que se genera a partir de la presión de aire dentro de la cámara cuando aumenta y disminuye el nivel de agua.

Se puede mejorar el aprovechamiento del oleaje utilizando más de un dispositivo OWC, basados en una matriz de cámaras, igualmente es necesario complementar el estudio presentado en este

trabajo por medio de la evaluación del comportamiento de la OWC con oleaje regular con diferentes direcciones, así como con oleaje irregular, a  $0^\circ$  y con diversas direcciones, igualmente los ensayos que se obtienen en este estudio son útiles para la validación de modelos numéricos.

Es necesario realizar estudios y análisis para la aplicación dispositivos OWC en las costas de México, la región del pacífico supone mejores condiciones, para la selección del sitio es importante conocer la cantidad de energía transportada por las olas tanto como las condiciones climáticas, un sitio con flujo de energía de las olas pequeño pero constante es más preferible que un con flujo alto, la durabilidad de los dispositivos WEC se puede mejorar evitando condiciones extremas de olas.

Mediante pruebas de laboratorio, si se logra a amplificar 1.8 veces la columna de agua dentro de una cámara OWC, podría considerarse la aplicación en tanto los costos de construcción disminuyeran.

## BIBLIOGRAFÍA

- Ashlin, S. John, S.A. Sannasiraj, V. Sundar. Research Scholar, Dept. of Ocean Engg., Indian Institute of Technology Madras, Chennai, India.
- Ashlin, S. John V. Sundar, S.A. Sannasiraj. (2016). Effects of bottom profile of an oscillating water column device on its hydrodynamic characteristic.
- António F. de O. Falcao. (2010). Wave energy utilization: A review of the technologies.
- António F. O. Falcao, António J.N.A. Sarmiento, Luís M. C. Gato, Ana Brito-Melo. (2020). The pico OWC wave power plant: its lifetime from conception to closure 1986-2018
- De-Zhi Ning, Rong-Quan Wang, Qing-Ping Zou, Bin Teng. (2016). An Experimental investigation of hydrodynamic of a fixed OWC Wave Energy Converter.
- Delmonte, Nicola, Member, IEEE, Davide, Barater, Member, IEEE, Francesco Gualiani, Student Member, IEEE, Paolo Cova, and Giampaolo Buticchi. 2015. Review Of Oscillating Water Columns.
- Heath, T. V. (2012). A review of oscillating water columns. *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 370(1959), 235–245. <http://www.jstor.org/stable/41348234>
- Félix, A., Hernández, J., Lithgow, D., Mendoza, E., Posada, G., Ring, M., Silva, R. (2019). Wave Energy in Tropical Regions: Deployment Challenges, Environmental and Social Perspective. *Journal of Marine Science and Engineering*.
- Medina R., Ayrton A. Jesús Blanco I., Rodolfo Silva C., and Urko Izquierdo E. The influence of the chamber configuration on the hydrodynamic efficiency of oscillating water column devices. 2020
- Medina R., Ayrton A., Alejandro Martínez F., Jesús M. Blanco I., Rodolfo Silva C. Interaction of oblique waves with an Oscillating Column device. 2021
- Medina R, Ayrton A. Rodolfo Silva C. Jesús M Blanco I. A 3D boundary element method for analyzing the hydrodynamic performance of a land-fixed oscillating water column device. 2022

Mustapa, M.A. O.B. Yaakob, Yasser M. Ahmed, Chang-Kyu Rheem, K.K. Koh, Faizul Amri Adnan.  
Wave energy device and breakwater integration: A review. (2017).

K. Rezanejad, C. Guedes Soares, I. López, R Carballo. (2017). Experimental and numerical investigation of the hydrodynamic performance of an oscillating water column wave energy converter

Vallam Sundar, Torgeir Moan, Jorgen Hals. (June 2010). Conceptual Design of OWC Wave Energy Converters Combined With Breakwater structures.

Página web.

Tethys. (8 de julio de 2011). *Planta de energía undimotriz Mutriku*  
<https://tethys.pnnl.gov/project-sites/mutriku-wave-power-plant>

Biscay Marine Energy Platform. <https://www.bimep.com/>

Características técnicas: Área Mutriku. <https://www.bimep.com/area-mutriku/caracteristicas-tecnicas/>

Wave Lab, <https://www.hydrosoft.civil.aau.dk/wavelab/>

Imc Busdaq, <https://www.imc-tm.mx/productos/hardware-para-medicion/imc-busdaq/serie/imc-busdaqflex/> 4