



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

# **POTENCIAL DE LA ENERGÍA UNDIMOTRIZ EN COSTAS MEXICANAS Y USOS POTENCIALES**

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

PRESENTA:  
**ERICK IVÁN GARCÍA SANTIAGO**

**TUTOR PRINCIPAL:**  
**RODOLFO SILVA CASARÍN – INSTITUTO DE INGENIERÍA**

**COMITÉ TUTOR:**  
**EDGAR G. MENDOZA BALDWIN – INSTITUTO DE INGENIERÍA**  
**ISMAEL MARIÑO TAPIA – CINVESTAV MÉRIDA**  
**CARLOS A. ESCALANTE SANDOVAL – FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**LILIA REYES CHÁVEZ – FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Ciudad de México, Febrero de 2019**

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente: **Carlos A. Escalante Sandoval**

Secretario: **Lilia Reyes Chávez**

Vocal: **Rodolfo Silva Casarín**

1<sup>er</sup> suplente: **Edgar G. Mendoza Baldwin**

2<sup>o</sup> suplente: **Ismael de J. Mariño Tapia**

Instituto de Ingeniería, Campus C.U.

TUTOR DE TESIS:



**Dr. Rodolfo Silva Casarín**

FIRMA

---

## Dedicatoria

---

**A mi esposa e hijo:**

*Leticia García Trinidad*  
*Uriel Adair García García*

Razones suficientes para vivir y seguir  
adelante.

Por su apoyo incondicional, cariño y  
comprensión que me han brindado todo este  
tiempo, pero sobre todo por ser una motivación  
para ser mejor y seguir adelante día a día.

## Agradecimientos

**A mi director y asesor de tesis:**

*Dr. Rodolfo Silva Casarín*  
*Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin*

Por haberme dado la oportunidad, su confianza y apoyo durante mi estancia en el Instituto, pero sobre todo por ser una motivación, un ejemplo de ética, experiencia y superación constante.

**Al:**

**Posgrado de Ingeniería de la UNAM**  
**Instituto de Ingeniería de la UNAM**

Por haber colaborado en mi formación profesional al brindarme la oportunidad y el apoyo para realizar en tiempo y forma este proyecto de investigación.

Mi agradecimiento y una enorme GOYA.

**Al:**

**Proyecto ITX2015PAPIT (DGAPA)-UNAM**  
**CEMIE-Océano**  
**CONACYT**

Por brindar los recursos económicos para desarrollar esta investigación y por haberme proporcionado una beca durante los cuatro años de doctorado.

**A:**

**RDZ Renovables**  
**DINA Camiones**  
**Laboratorio de Investigación Sexto Sol**

Por todo su apoyo, capacitación y consejos durante el desarrollo del proyecto con cada uno de sus Sistemas de Conversión de Energía del Oleaje.

**Al:**

*Dr. Ismael Mariño Tapia*  
*Dr. Rubén Raygosa Barahona*  
*M. C. Edgar Escalante Mancera*  
*Dr. Guillermo Gómez.*

Por su valioso apoyo y ejemplo durante los trabajos de campo.

**A mis compañeros y amigos:**

*Edgar, Elizabeth, Emilio, Erik, Gustavo,*  
*Ismael, Iván, Ivonne, Juan, Manuel,*  
*Mariel, Marisela, Miguel, Miriam, Oscar,*  
*Ponciano, Rodrigo y Rubén.*

Por todo su apoyo durante las pruebas de laboratorio y las actividades de campo, con quienes tuve la oportunidad de trabajar y convivir.

*A todos, mis más sinceros agradecimientos...*

---

---

# Índice de Contenido

---

---

---

Contenido	Páginas
Índice de contenido -----	I
Lista de tablas -----	IV
Lista de figuras -----	V
Título -----	VII
Introducción -----	VIII

---

## CAPÍTULO I: JUSTIFICACIÓN

---

I.1.- Motivación -----	1
I.2.- Hipótesis -----	2
I.3.- Objetivos -----	3
I.3.1.- Objetivos principales -----	3
I.3.2.- Objetivos secundarios -----	3

---

## CAPITULO II: ENERGÍA DEL OLEAJE

---

II.1.-Potencial energético teórico del oleaje -----	4
II.2.- Potencial de la energía undimotriz en México -----	6
II.2.1.- Análisis de clima marítimo -----	6
II.2.2.- Régimen extremal -----	7
II.2.3.- Análisis en agua profundas -----	7
II.2.4.- Análisis en agua someras -----	8
II.2.5.- Potencial energético del oleaje -----	9

---

---

<b>Contenido (continuación)</b>	<b>Páginas</b>
<b>CAPITULO III: ANTECEDENTES EN MÉXICO</b>	
<b>III.- Antecedentes de sistemas WEC en México</b> .....	11
<b>CAPITULO IV: ACTIVIDADES DE LABORATORIO Y DE CAMPO</b>	
<b>IV.1.- Actividades en laboratorio</b> .....	13
IV.1.1.- Laboratorio de Oleaje del Instituto de Ingeniería de la UNAM .....	13
IV.1.2.- Actividades en laboratorio con el modelo 1:17 de WEC UFCAP .....	16
IV.1.3.- Actividades en laboratorio con el modelo 1:32 del WEC UFCAP .....	21
IV.1.4.- Actividades en laboratorio con el modelo 120 del WEC MICO-2T .....	23
IV.1.5.- Actividades en laboratorio con el modelo 1:10 del WEC MICO-1T .....	25
<b>IV.2.- Actividades de campo</b> .....	27
IV.2.1.- Selección de sitios de estudio .....	27
IV.2.2.- Actividades en campo con el modelo 1:20 del WEC MICO-1T .....	29
IV.2.3.- Actividades en campo con el modelo 1:10 del WEC MICO-2T .....	31
IV.2.4.- Actividades en campo con el prototipo 1:1 del WEC CINA-EF .....	37
<b>CAPÍTULO V: RESULTADOS Y ANÁLISIS</b>	
<b>V.1.- Resultados de las actividades en laboratorio</b> .....	43
V.1.1.- Resultados de laboratorio con el modelo 1:17 del WEC UFCAP .....	43
V.1.2.- Resultados de laboratorio con el modelo 1:32 del WEC UFCAP .....	49
V.1.3.- Resultados de laboratorio con el modelo 1:10 del WEC MICO-1T .....	51
V.1.4.- Resultados de laboratorio con el modelo 1:20 del WEC MICO-2T .....	53
<b>V.2.- Resultados de las actividades en campo</b> .....	55
V.2.1.- Resultados de campo con el modelo 1:20 del WEC MICO-1T .....	55
V.2.2.- Resultados de campo con el modelo 1:20 del WEC MICO-1T .....	57
V.2.3.- Resultados de campo con el prototipo 1:1 del WEC DINA-EF .....	60

<b>Contenido (continuación)</b>	<b>Páginas</b>
<b>CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y APORTACIONES</b>	
<b>VI.1.- Conclusiones</b> -----	63
<b>VI.2.- Aportaciones y alcances</b> -----	64
<b>CAPÍTULO VII: PROPUESTAS Y RECOMENDACIONES</b>	
<b>VII.1.- Recomendaciones para el WEC MICO</b> -----	66
VII.1.1.- Recomendaciones para el modelo 1:20 del WEC MICO-2T -----	66
VII.1.2.- Recomendaciones para el modelo 1:20 del WEC MICO-1T -----	67
VII.1.3.- Recomendaciones para el modelo 1:10 del WEC MICO-1T -----	67
<b>VII.2.- Recomendaciones para el WEC UFCAP</b> -----	68
VII.2.1.- Recomendaciones para el modelo 1:17 del WEC UFCAP -----	68
VII.2.2.- Recomendaciones para el modelo 1:32 del WEC UFCAP -----	69
<b>VII.3.- Recomendaciones para el WEC DINA-EF</b> -----	69
<b>VII.4.- Propuestas Generales</b> -----	70
<b>REFERENCIAS</b>	
Referencias -----	71
<b>ANEXOS</b>	
<b>Anexo A:</b> Diagramas de los sistemas WEC -----	74
Diagrama del WEC MICO-1T -----	74
Diagrama del WEC MICO-2T -----	77
Diagrama del WEC UFCAP -----	80
Diagrama del WEC DINA-EF -----	83
<b>Anexo B:</b> Impactos asociados a la instalación y operación de un WEC -----	87
<b>Anexo C:</b> Posibles usos de la energía undimotriz -----	89

## Lista De Tablas

No.	Contenido	Páginas
Tabla 1.-	Pruebas en campo realizadas en México con dispositivos undimotrices -----	12
Tabla 2.-	Ensayos realizados con el modelo 1:17 del WEC UFCAP -----	17
Tabla 3.-	Condiciones de operación para la evaluación del WEC UFCAP 1:17 -----	19
Tabla 4.-	Condiciones de operación para la optimización del WEC UFCAP 1:17 -----	20
Tabla 5.-	Condiciones de operación para optimizar el modelo 1:32 del WEC UFCAP -----	23
Tabla 6.-	Condiciones de operación durante las pruebas con el WEC MICO-2T 1:20 -----	24
Tabla 7.-	Cronograma de actividades para la instalación del WEC MICO-1T 1:10 -----	32
Tabla 8.-	Velocidades de viento alcanzadas con 1 cámara OWC sumergida 30 y 50 % -----	44
Tabla 9.-	Velocidades de viento alcanzadas con 1 cámara OWC al variar la tapa -----	45
Tabla 10.-	Velocidad del viento y potencia de las 3 cámaras OWC del WEC UFCAP 1:17 -----	46
Tabla 11.-	Condiciones de operación óptimas para el WEC MICO-2T 1:20 -----	54
Tabla 12.-	Información generada en campo con el WEC MICO-1T 1:10 -----	57
Tabla 13.-	Potencia y eficiencia de generación del WEC MICO-1T obtenida en campo -----	58

## Lista De Figuras

No.	Contenido	Paginas
Figura 1.-	Fenómenos del oleaje que pueden ser aprovechados para generar energía -----	4
Figura 2.-	Energía de una ola en la columna de agua -----	6
Figura 3.-	Potencial energético del oleaje en costas Mexicanas -----	9
Figura 4.-	Potencial energético del oleaje en costas mexicanas por estación del año -----	10
Figura 5.-	Estimación de la altura y periodo de oleaje en costas Mexicanas -----	10
Figura 6.-	Sitios con mayor potencial undimotriz en las costas de México -----	11
Figura 7.-	Laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM -----	14
Figura 8.-	Vista lateral del WEC UFCAP con 4 cámaras OWC -----	16
Figura 9.-	Modelo 1:17 del WEC UFCAP durante las pruebas de evaluación y diagnóstico -----	18
Figura 10.-	Cámaras OWC evaluadas en laboratorio -----	19
Figura 11.-	Imágenes obtenidas durante el análisis y actualización de la base de datos -----	20
Figura 12.-	Vista frontal del modelo a escala 1:17 y 1:32 del WEC UFCAP -----	22
Figura 13.-	Pruebas realizadas con el modelo a escala 1:32 del WEC UFCAP -----	22
Figura 14.-	Vista lateral del modelo 1:20 del WEC MICO-2T durante las pruebas de laboratorio -----	24
Figura 15.-	Ensamble del modelo 1:10 del WEC MICO-1T, Laboratorio de Costas y Puertos de la UNAM -----	26
Figura 16.-	Pruebas de laboratorio con el modelo 1:10 del WEC MICO-1T -----	27
Figura 17.-	Sitios de estudio propuestos para evaluar los WEC's -----	28
Figura 18.-	Sitio de pruebas con el modelo 1:20 del WEC MICO-1T en Puerto Progreso, Yucatán -----	28
Figura 19.-	Sitio de pruebas con el modelo 1:10 del WEC MICO-1T en Puerto Morelos, Quintana Roo -----	29
Figura 20.-	Sitio propuesto para instalar el modelo 1:1 del WEC DINA-EF, Puerto el Sauzal, Ensenada BC -----	29
Figura 21.-	Resguardo y envío del modelo 1:20 del WEC MICO-1T -----	30
Figura 22.-	Inspección de componentes y ensamble del WEC MICO-1T -----	30
Figura 23.-	Pruebas en campo con el modelo 1:20 del WEC MICO-1T -----	31
Figura 24.-	Vista aérea del sitio de instalación del modelo 1:10 del WEC MICO-1T -----	32
Figura 25.-	Desensamble y transporte del prototipo a campo -----	33
Figura 26.-	Ensamble del modelo 1:10 del WEC MICO-1T in situ -----	34
Figura 27.-	Pruebas de comunicación, descarga de datos e izaje del prototipo -----	34
Figura 28.-	Pruebas de flotabilidad del WEC MICO-1T en campo -----	35
Figura 29.-	Instalación y puesta en marcha del WEC MICO-1T en Puerto Morelos -----	36
Figura 30.-	Reinstalación de la boya en la estructura del WEC -----	37
Figura 31.-	Vista lateral del sistema de captación de energía del WEC DINA-EF -----	38
Figura 32.-	Componentes principales del sistema conversión-generación de energía del WEC DINA-EF -----	38
Figura 33.-	Autoridades Federales que otorgan permisos para aprovechar la energía marina en México -----	39
Figura 34.-	Sistema de captación de energía del WEC DINA-EF -----	41
Figura 35.-	Sistema de conversión y generación de energía del WEC DINA-EF -----	41
Figura 36.-	Recorrido por el muelle el Sauzal para ubicar el sitio de instalación del WEC -----	42

No.	Contenido	Páginas
Figura 37.-	Velocidad del aire alcanzado con la cámara OWC al 30% y 50% de sumergencia -----	44
Figura 38.-	Flujo máximo de aire obtenido con la cámara OWC de tapa reforzada y tapa normal -----	45
Figura 39.-	Flujo y potencia del aire obtenida con 3 cámaras OWC diferentes -----	47
Figura 40.-	Eficiencia de reflexión con la cámara OWC-UFCAP a escala 1:17 -----	47
Figura 41.-	Eficiencia de disipación con la cámara OWC-UFCAP a escala 1:17 -----	48
Figura 42.-	Eficiencia de transmisión con la cámara OWC a escala 1:17 -----	49
Figura 43.-	Pruebas realizadas con el modelo 1:32 del WEC UFCAP -----	50
Figura 44.-	Chasis de los componentes electrónicos del modelo 1:10 del WEC MICO-1T -----	41
Figura 45.-	Pruebas de operación con el modelo 1:10 del WEC MICO-1T -----	52
Figura 46.-	Potencia generada con el modelo 1:10 del WEC MICO-1T en las pruebas de laboratorio -----	52
Figura 47.-	RPM alcanzadas durante las pruebas con el modelo 1:10 del WEC MICO-2T -----	53
Figura 48.-	Voltaje y RPM alcanzadas con el modelo 1:20 del WEC MICO-1T durante las pruebas en campo -----	55
Figura 49.-	Potencia generada con el modelo 1:20 del WEC MICO-1T durante las pruebas en campo -----	56
Figura 50.-	Pieza de unión boya-brazo del WEC MICO-1T desgastada por fricción -----	58
Figura 51.-	Perdida de estabilidad de la boya del WEC MICO-1T -----	59
Figura 52.-	Vista de la estructura del WEC MICO-1T al inicio y final de las pruebas en campo -----	60
Figura 53.-	Caratula del proyecto ejecutivo presentado -----	61
Figura 54.-	Modificación de la cimentación del WEC DINA-E después de la modelación numérica -----	62
Figura 55.-	Vista trasera del WEC MICO-1T -----	74
Figura 56.-	Vista lateral del WEC MICO-1T -----	75
Figura 57.-	Vista lateral-frontal del WEC MICO-1T -----	75
Figura 58.-	Vista aérea del WEC MICO-1T -----	76
Figura 59.-	Vista frontal del WEC MICO-1T -----	76
Figura 60.-	Vista lateral del WEC MICO-2T -----	77
Figura 61.-	Vista diagonal del WEC MICO-2T -----	77
Figura 62.-	Vista aérea del WEC MICO-2T -----	78
Figura 63.-	Vista lateral del WEC MICO-2T -----	78
Figura 64.-	Vista frontal del WEC MICO-2T -----	79
Figura 65.-	Vista lateral del WEC UFCAP 1:32 -----	80
Figura 66.-	Vista superior del WEC UFCAP 1:32 -----	81
Figura 67.-	Vista inferior del WEC UFCAP 1:32 -----	81
Figura 68.-	Vista lateral del WEC UFCAP 1:17 -----	82
Figura 69.-	Dimensiones de la cimentación del WEC DINA-EFII -----	83
Figura 70.-	Espaciamiento entre postes de cimentación del WEC DINA-EFII -----	83
Figura 71.-	Vista aérea de la cimentación y boya del WEC DNA-EFII -----	84
Figura 72.-	Vista lateral de la cimentación del WEC DINA-EFII -----	84
Figura 73.-	Vista lateral de la cimentación del WEC DINA-EFII -----	85
Figura 74.-	Vista lateral de postes de cimentación del WEC DINA-EFII -----	85
Figura 75.-	Diagrama hidráulico del sistema conversión-generación del WEC DINA-EF -----	86

---

Título de tesis:

# POTENCIAL DE LA ENERGÍA UNDIMOTRIZ EN COSTAS MEXICANAS Y USOS POTENCIALES

---



---

## Introducción

---

El desarrollo de sistemas para la captación y conversión eficiente de las distintas fuentes de energías renovables debe implementarse con la menor huella ecológica posible y costos económicamente rentables. En este sentido, es probable que en un futuro próximo la producción de energía en pequeñas plantas ubicadas cerca de los sitios de consumo sea el modo de operación más apropiado. Estas premisas son más obvias cuando la fuente de energía es el oleaje, ya que el carácter oscilatorio de la fuente y otros retos aún no resueltos [Portilla 2013] permite pensar en que el usuario final serán las poblaciones cercanas a la costa, lo cual no es menor considerando que a nivel mundial alrededor del 10 % de población vive en las costas en cotas menores a los 10 metros [Silva 2014].

A nivel mundial el uso de los energéticos tiene un alto impacto e importancia ya que es el motor principal de la economía y desarrollo de los países, sin embargo el acelerado crecimiento de la población, así como la rápida evolución y expansión de la tecnología ha originado que la sociedad incremente significativamente la demanda energética y México no es la excepción puesto que en 1980 el consumo nacional fue estimado en 186.5 TWh y para 2015 el consumo se estimó en 280.4 TWh, lo que indica que hubo un incremento del 66.5 % en 35 años (CEFP 2006). Por otro lado las necesidades ambientales, políticas, económicas, académicas y tecnológicas permiten especular con la posibilidad que las energías renovables son una alternativa para mitigar el descenso energético, activar la recuperación económica y atenuar el impacto negativo al medio ambiente global derivado de las fuentes de energía de origen fósil, aun cuando se cuenta con reservas probadas para varias décadas, estos combustibles son finitos y no renovables en la escala de tiempo humanas.

Países como México donde la principal fuente económica y energética son los combustibles fósiles presentan signos de una inminente reducción de sus reservas, lo que precisa a buscar nuevas fuentes de energía de carácter renovable y amigable con el medio ambiente que cubran este déficit. Entre las diferentes opciones del aprovechamiento de las energías renovables: la hidráulica, eólica, biomasa y solar tienen una importante presencia dentro de la Estrategia Nacional de Energía 2014 - 2028 (SENER 2014) de nuestro país; sin embargo la energía marina también posee un futuro prometedor, considerando que el mar ocupa más del 70 % de la superficie terrestre y tiene múltiples opciones de aprovechamiento (oleaje, mareas, corrientes, gradientes térmicos y gradientes salinos), de entre éstas, la energía del oleaje o energía undimotriz tiene como característica el hecho de ser prácticamente predecible y que naturalmente viaja hacia la zona costera donde puede ser aprovechada.

Desafortunadamente México tiene una gran dependencia económica de los combustibles fósiles, a tal grado que la venta de hidrocarburos representa el ingreso más alto en materia de exportaciones, mientras que en el ámbito energético los combustibles fósiles ocuparon el 89 % de las fuentes de energía durante 2017 (SENER 2018). A pesar de la gran problemática pronosticada por la escasez de combustibles fósiles, México cuenta con pocos estudios sobre fuentes de energía

no convencionales puesto que apenas inicia su incursión en el mundo de las energías renovables con el firme objetivo de aprovechar las fuentes energéticas de las que dispone en su territorio.

Actualmente existen diversos dispositivos alrededor del mundo que captan esta fuente y la transforman en otro tipo de energía (generalmente electricidad), sin embargo todos han sido desarrollados para regiones con alto potencial energético correspondientes a las zonas templadas en donde las condiciones de clima marítimo, cantidad y distribución de la energía marina difieren en gran manera de la zona intertropical donde se encuentra la mayor parte de la costa mexicana dejando de lado aquellas zonas de medio a bajo potencial energético ignorando que existen regiones cuyas condiciones climáticas hacen de la explotación energética marina una opción viable. Las regiones con potencial energético medio para explotación del oleaje son: el mar Báltico; el Mediterráneo; el mar del Norte en Europa y algunas regiones cercanas al ecuador (Bernhoff 2006). Algunas investigaciones han estimado que el océano tiene un potencial energético teórico superior a 100,000 TWh/año, mientras que el consumo eléctrico mundial oscila los 16,000 TWh/año.

Acorde a lo anterior, en este trabajo se presentan las bases para desarrollar una investigación teórico-práctica del aprovechamiento y aplicación de la energía undimotriz en las regiones costeras, sin dejar de lado la importancia de los impactos ambientales, sociales y tecnológicos que ocasiona la implementación de un sistema WEC en la costa. Por lo tanto, el objetivo del presente trabajo es encaminar y presentar una opción viable para la generación de energía estable, que no dependa de la volatilidad de los precios del petróleo.

---

## Capítulo I:

# Justificación

---

La investigación doctoral aquí presentada tiene como fundamentos la motivación, hipótesis y objetivos que se detallan en los siguientes párrafos.

### I.1.- Motivación

La sociedad actual tiene un gran reto por delante; como abastecer de energía eléctrica limpia y con bajos costos a la población futura. Tomando en consideración que en países como México la mayor parte de sus fuentes de energía son a base de combustibles fósiles, los cuales entre sus problemas principales están su alta emisión de contaminantes atmosféricos, terrestres y acuáticos, tanto en su extracción, transporte y utilización, los cuales son aspectos importantes del deterioro ambiental del planeta que conllevan lluvia ácida así como aumento de las temperaturas y que a su vez son los principales responsables de la notable aceleración del cambio climático [Chen 2013]. Por estas razones, los estudios actuales tienen como meta la búsqueda de sistemas y métodos eficientes para aprovechar las fuentes de energía renovables de las que disponemos en la naturaleza, tales como la eólica, solar, hidráulica y marina las cuales utilizan tecnología limpia [IEA-OEs 2008].

Para este trabajo se ha seleccionado la energía marina ya que a nivel mundial las investigaciones en busca de la sustentabilidad energética con fuentes renovables más que un simple interés científico es una necesidad y en México estos estudios son muy limitados. Además, si se considera que nuestro país cuenta con aproximadamente 3,149.9 Km<sup>2</sup> de mar territorial [CONABIO 2017] y más de 11,000 kilómetros de costa [Padilla L. 2000] donde esta fuente energética puede ser aprovechada para generar energía eléctrica a través de sus; corrientes marinas, gradientes térmicos, gradientes salinos, corrientes oceánicas, mareas y oleaje.

De las fuentes de energía que presenta el mar se ha seleccionado el oleaje, también conocida como energía undimotriz ya que ésta se encuentra disponible de forma gratuita en todo el océano (desde la línea de costa hasta aguas profundas), por lo que solo se requieren sistemas eficientes para captar dicha energía y que localmente no generen un problema para los ecosistemas marinos. A nivel mundial el desarrollo de sistemas para captar la energía del oleaje lleva un gran retraso en comparación con las fuentes de energía convencionales. Si bien existen algunos sistemas para captar esta fuente de energía la mayor parte de ellos aún se encuentran en etapas de desarrollo y pruebas de laboratorio, por lo que solo una pequeña cantidad ha sido probada bajo condiciones reales limitando aún más el desarrollo de estos sistemas por su baja eficiencia alcanzada y altos costos [Allan G. 2012, Annual report 2010 y Amundarain 2012]. A este respecto, estudios recientes como los realizados por García en 2014 han demostrado que en México existen algunos

dispositivos undimotrices en desarrollo capaces de aprovechar la energía cinética del oleaje para producir energía eléctrica con bajos costos.

Por estas razones es necesario implementar y realizar estudios teórico-prácticos que permitan desarrollar e implementar sistemas eficientes para aprovechar el potencial energético de las Fuentes de Energía Renovables como el oleaje a fin de afrontar algunos de los retos energéticos y económicos de la sociedad. En esta línea de investigación el Grupo de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM ha realizado estudios de laboratorio con distintos WEC's (por sus siglas en Inglés: Wave Energy Converter) demostrando ser eficientes y al mismo tiempo tener bajos costos de construcción, operación y mantenimiento.

Finalmente, las actividades en campo desarrolladas con este proyecto de investigación permitirán evaluar las necesidades metódicas, tecnológicas y legales para implementar sistemas de conversión de energía undimotriz aplicables en distintos procesos costeros dando solución a algunos problemas de la sociedad, a la par se contará con una base técnica y científica en la cual pueda fundamentarse la toma de decisiones administrativas y políticas referentes a las actuales reformas energéticas de México de la Estrategia Nacional de Energía 2014 – 2028, así como de la Estrategia de Transición Para Promover el Uso de Tecnologías y Combustibles Más Limpios (publicada en el DOF el 20 de diciembre de 2013) asociado a una posible incorporación al mercado de las energías renovables con miras a la autosuficiencia al cubrir parte de la creciente demanda energética de la sociedad y eliminando la dependencia externa buscando equilibrar la balanza comercial y económica del país.

## I.2.- Hipótesis

- Los sistemas para captación de energía del oleaje pueden aplicarse para diferentes procesos de conversión, tales como generación de energía, bombeo de agua, almacenamiento de hidrógeno y desalación de agua.
- Los sistemas para captación de energía del oleaje pueden operar tanto en la zona costera como en la zona marina, con una diferencia en los costos de instalación, mantenimiento y transporte de la energía.
- Las zonas con oleaje de potencial bajo-medio también pueden ser económicamente rentables para su aprovechamiento mediante granjas WEC y sistemas híbridos.
- Los sistemas de conversión de energía del oleaje pueden ser instalados y operados con una huella ecológica aceptable, un impacto social positivo y una gran aportación tecnológica y científica.

## I.3.- Objetivos

### I.3.1.- Objetivos Principales

- Ubicar las zonas con mayor potencial undimotriz en México.
- Identificar las necesidades para implementar sistemas que aprovechen la energía del oleaje, ubicando a la par los principales impactos ambientales, sociales y tecnológicos involucrados para su implementación en los distintos procesos de conversión.

### I.3.2.- Objetivos Secundarios

- Estimación de la energía del oleaje en costas mexicanas.
- Ubicar zonas costeras con factibilidad para aprovechar la energía undimotriz en México.
- Definir los impactos ambientales que provoca la presencia de un WEC en el medio marino.
- Definir el impacto social que produce una planta undimotriz en la costa.
- Evaluar técnica y económicamente los usos potenciales de la energía undimotriz.
- Establecer las bases científicas y tecnológicas para sistemas de captación y aprovechamiento de la energía del oleaje.

## Capítulo II:

# Energía del Oleaje

El oleaje se forma debido al arrastre de la capa superior del agua por la fuerza del viento, por lo que a mayor flujo de aire se producirá un incremento en la altura y periodo de oleaje, generando que ésta tenga mayor energía. Sin embargo, pese al familiar y fácil concepto del oleaje, su estudio es de una extraordinaria complejidad.

Las olas tienen la capacidad de desplazarse grandes distancias prácticamente sin pérdida de energía, por ello la energía en cualquier parte del océano acaba en el borde continental. De forma general hay cuatro fenómenos del oleaje que pueden ser aprovechados para generar energía eléctrica (Figura 1), el primero es el empuje de la ola, que es la fuerza con la cual se desplaza hacia la costa lo cual depende de su celeridad, el segundo es la altura de la ola (energía potencial), que está definida como la distancia entre el valle y cresta de ola, el tercero es el periodo de oleaje, definido como el tiempo que transcurre entre crestas o valles de dos olas continuas y el cuarto fenómeno es la variación de la presión bajo la superficie del agua debida a la variación de la profundidad [Annual report 2010, Amundarain 2012 y Allan G. 2012].

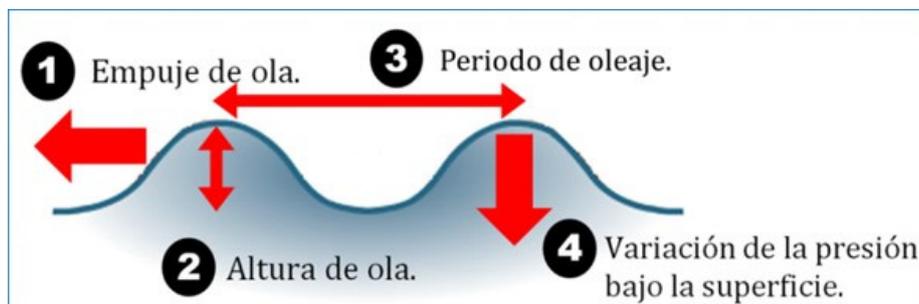


Figura 1.- Fenómenos del oleaje que pueden ser aprovechados para generar energía

### II.1.- Potencial energético teórico del oleaje

La energía de las olas en el mar es muy grande, incluso la fracción de la energía que es potencialmente explotable es muy importante comparada con el consumo actual de electricidad en el mundo. A través de los años se han realizado diversos estudios con el propósito de estimar el potencial mundial del oleaje, por lo que se ha estimado que la energía mundial explotable es de 2 TWh año [Eduambiental 2017].

La energía del oleaje depende principalmente de la intensidad, tiempo y superficie sobre la cual sopla el viento. Por lo tanto, la potencia “P” o energía contenida en una ola idealizada (onda Cnoidal de amplitud constante, periodo y longitud de onda bien definidos) en kW por metro de

ancho de ola, puede determinarse con la ecuación 1, mientras que para aguas someras se utiliza la ecuación 2, para aguas intermedias la ecuación 3 y para aguas profundas la ecuación 4 [USACE 2008]:

$$P = \frac{g^2 \rho H^2 T}{32 \pi} \dots\dots\dots (1)$$

$$P_S = \frac{\rho g^2}{64 \pi} H^2 T \dots\dots\dots (2)$$

$$P_I = \frac{1}{16} \rho g H^2 C_g \dots\dots\dots (3)$$

$$P_P = \frac{1}{16} \rho g H^2 \sqrt{g H} \dots\dots\dots (4)$$

Donde “g” es la gravedad, “ρ” es la densidad del agua, “H” es la altura de ola, “T” el periodo de oleaje y “Cg” la celeridad de grupo.

De acuerdo a la ecuación (1), la potencia contenida en una ola es proporcional al cuadrado de la altura de ola “H” y al periodo del movimiento “T”. Por lo cual, las olas con periodos largos (entre 7 y 10 s) y grandes amplitudes (del orden de 2 m) tienen un flujo de energía que normalmente excede los 40-50 W/m.

Al igual que la mayoría de los recursos del planeta, la energía de las olas también se encuentra distribuida de forma desigual, por lo que las zonas sujetas a vientos regulares son las que disponen de mayores potenciales energéticos. Así la energía de las olas se ve incrementada por los vientos alisios en latitudes entre 30° y 60° en ambos hemisferios.

Para captar la máxima energía de una ola los dispositivos undimotrices deben ser diseñados para interceptar los movimientos de las partículas de agua considerando que la mayor cantidad de energía se encuentra en la superficie y la menor cantidad en la profundidad, de tal modo que el 95% de la energía de una ola se encuentra a una profundidad de un cuarto de la longitud de onda (Figura 2).

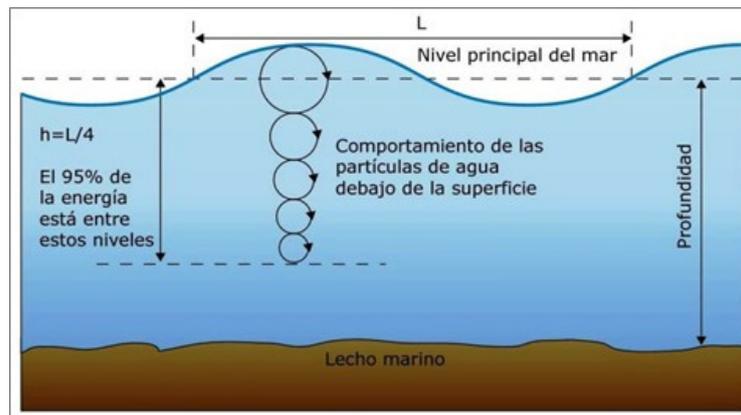


Figura 2.- Energía de una ola en la columna de agua

## II.2.- Potencial de la energía undimotriz en México

A lo largo de los más de 11,000 Km de litoral mexicano el oleaje representa la mayor fuente de energía ubicándolo como un importante recurso renovable, su constancia y predictibilidad permite establecer criterios para su aprovechamiento, sin embargo, para que esto suceda primero se debe cuantificar el recurso energético disponible.

Bajo este criterio Pérez en 2013 realizó un análisis y caracterización del clima marítimo mexicano, cuya base fueron algunos análisis estadísticos previos que se describen a continuación, posteriormente García en 2014 estimó el potencial energético de las principales costas de México para ubicar los sitios con mayor potencial energético undimotriz.

### II.2.1.- Análisis del clima marítimo

Para analizar el clima marítimo Pérez 2013 aplicó el modelo WAM-HURAC, alimentado con datos del National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research (NCEP/NCAR). Los resultados analizados crearon los estados de mar en aguas profundas presentados en el Atlas de clima marítimo de las costas mexicanas (Silva et al, 2007), una vez conocido y caracterizado el régimen medio y extremal del oleaje, se trasladó hacia la zona de interés propagándose todos los estados de mar.

El cálculo de la altura de ola significativa " $H_s$ " se obtuvo mediante la ecuación 5:

$$H_{\frac{1}{3}} = \sum_{i=1}^{\frac{N}{3}} \frac{H_i}{\frac{N}{3}} \dots\dots\dots(5)$$

Donde " $H_i$ " es la serie de alturas de ola individuales del registro, ordenada de mayor a menor, y " $N$ " es el número total de ondas, mientras que para calcular la altura de ola media cuadrática " $H_{rms}$ " se utilizó la ecuación 6:

$$H_{rms} = \left[ \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N H_i^2 \right]^{1/2} \dots\dots\dots (6)$$

Para representar las condiciones más frecuentes se utilizó el régimen medio, mientras que para determinar los parámetros de la función de distribución: donde si el desplazamiento de la superficie libre es un proceso estacionario, ergódico y gaussiano, la distribución de densidad de “ $\eta$ ” ( $t$ ) es la siguiente:

$$f(\eta) = \frac{1}{\eta_{rms} \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{\eta^2}{2\eta_{rms}^2} \right] \dots\dots\dots (7)$$

Donde “ $\eta_{rms}$ ” es el desplazamiento vertical medio cuadrático de la superficie libre.

### II.2.2.- Régimen extremal

Para establecer el riesgo de ocurrencia de tormentas donde el oleaje alcanza alturas poco frecuentes se estimó la probabilidad de eventos que superen la “ $H_s$ ”, la estimación del régimen extremal de oleaje se realizó con el modelo estadístico de los valores pico (*POT, Peak Over Threshold*) el cual hace estimaciones más precisas con períodos inferiores a 20 años.

Este método se basa en suponer que los máximos que superan un cierto umbral y que están separados por un cierto intervalo de tiempo son independientes entre sí. Esto implica que si en un año hay eventos extremos pueden no presentarse durante el siguiente año, ya que los eventos han sido por azar. De este modo la muestra a analizar estará constituida por los máximos locales o bien los picos temporales que superen un determinado umbral de altura “ $H_0$ ”.

El número medio de temporales al año “ $\lambda$ ” se define como la relación entre el número total de temporales registrados “ $N_T$ ” y el tiempo efectivo de medida “ $T_{ef}$ ”:

$$\lambda = \frac{N_T}{T_{ef}} \dots\dots\dots (8)$$

### II.2.3.- Análisis en aguas profundas

La base de datos histórica de viento y oleaje, se obtuvo a partir del Atlas de oleaje de la República Mexicana (Silva et al, 2007), el cual fue generado a partir de la hibridación de dos modelos, uno numérico y otro paramétrico. El primero de ellos conocido como WAM es un modelo de tercera generación que resuelve la ecuación básica de transporte, lo cual describe la evolución de un espectro bidimensional de energía de oleaje con respecto a la frecuencia y dirección. El segundo modelo es el HURAC (Silva et al. 2002), el cual se divide en tres submodelos que describen los campos de presión, viento y oleaje de huracanes. Este modelo híbrido se alimentó con datos de velocidad obtenidos del re-análisis de la base de datos NCEP/NCAR.

Primero se obtuvo la potencia disponible del oleaje y viento cerca de la costa mediante un análisis estadístico de 59 años de datos, donde se estimaron promedios multianuales delimitados por temporada del año: invierno (noviembre-enero), primavera (febrero-abril), verano (mayo-julio)

y otoño (agosto-octubre). Para evitar sobre-estimaciones se eliminaron los datos de tormentas; oleaje mayor a 1.5 veces la altura media de todo el registro con duración mínima de 12 horas. Finalmente se aplicó el método de los valores picos seleccionando el valor más alto por año. De esta forma la potencia del oleaje en aguas profundas se calculó con la ecuación 4 descrita anteriormente.

La probabilidad de que el mayor temporal ocurrido en un año tenga una “Hs” superior a un cierto valor “Ha” se calculó con la probabilidad anual de excedencia, que está dada por la expresión.

$$P_a(x) = 1 - e^{-\lambda(1-F_w(H_a))} \dots\dots\dots(9)$$

Donde “λ” es el número medio de temporales ocurridos en un año, y “Fw” es la distribución de Weibull de excedencias cuya expresión es:

$$F_w(H_a) = 1 - \exp\left[\left(\frac{H_a - \alpha}{\beta}\right)^\gamma\right] \dots\dots\dots(10)$$

**II.2.4.- Análisis en aguas someras**

Las bases de datos con información batimétrica se obtuvieron del programa GEBCO, donde se crearon mallas de 1000 x 1000 nodos, la interpolación tipo Kriging con espaciamiento de 30 m, se realizó en el programa Surfer que alimenta al modelo REF/DIF, y para mejorar la calidad de la malla se recopilación datos de campo de las diferentes API’s (Administración Portuaria Integral).

La batimetría se empleó en el análisis espectral para seleccionar los estados de mar, utilizando un espectro tipo JONSWAP modificado por Goda (1985) que permite reescribir las expresiones en función de los parámetros de altura de ola del momento de orden cero “H0” y período pico “Tp”, obteniendo la siguiente expresión:

$$S(f) = \alpha H_{m0}^2 T_p^{-4} f^{-5} \exp\left[-1.25 (T_p f)^{-4}\right] \gamma^{\exp\left[-1(T_p f - 1)^2 / (2\sigma^2)\right]} \dots\dots (11)$$

Donde:

$$\alpha \approx \frac{0.0624}{0.23 + 0.0336\gamma - 0.185 (1.9 + \gamma)^{-1}} \dots\dots\dots (12)$$

$$\sigma \approx 0.07 \text{ para } f \leq f_p \text{ y } \sigma \approx 0.09 \text{ para } f \geq f_p \dots\dots(13)$$

A partir del m0 y la densidad espectral S (f):

$$m_n = \int_0^\infty f^n S(f) df \dots\dots\dots (14)$$

Donde: m0 = ∫0∞ S(f) df, obteniendo así la altura de ola “Hm0s”

$$H_{m0s} = 4.004 \sqrt{m_0} \dots\dots\dots (15)$$

Con esto se creó un espectro para cada “ $T_p$ ”, abarcando todas las combinaciones posibles de estados de mar con períodos pico de 4 a 12 s y altura de ola unitaria, considerando la restricción del modelo REF/DIF respecto a las direcciones, se limitó a propagar ángulos entre  $45^\circ$  y  $-45^\circ$  para seleccionar las direcciones más frecuentes de cada zona por época del año. De esta forma la potencia del oleaje en aguas someras se calculó con la ecuación 2 descrita al inicio.

## II.2.5.- Potencial energético del oleaje

Considerando la información del Atlas del Clima Marítimo de las Costas Mexicanas se calculó la potencia disponible del oleaje y viento para generar los mapas de distribución espacio-temporal de la potencia aledaña a la costa (Figura 3).

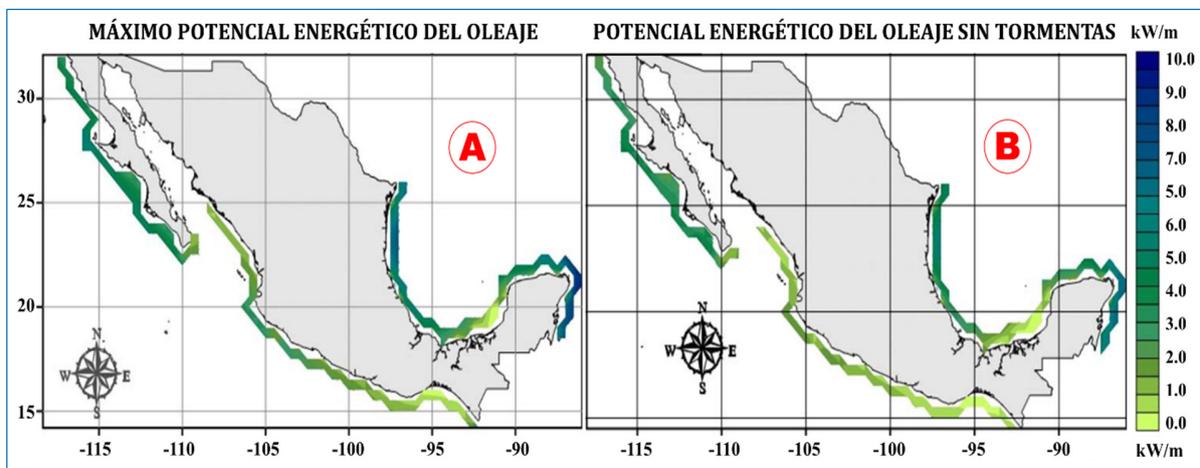


Figura 3.- Potencial energético del oleaje en costas Mexicanas [Pérez 2013]

En la figura 3-A Pérez 2013 muestra las potencias máximas del oleaje durante todo el año, mientras que en la figura 3-B muestra la potencia del oleaje al excluir las tormentas. En ambos casos se puede observar que los valores más altos corresponden a la costa suroeste del Pacífico Mexicano con rangos de 6 a 10 kW/m y al Caribe con rangos de 4 a 7 kW/m. Aunque Pérez en 2013 obtuvo valores mayores en el Caribe y Norte del Golfo de México, es más común encontrar mayor potencial unidimotriz en el Pacífico, tal como se muestra más adelante en las figuras 5 y 6.

De forma general se ha estimado que en todo el litoral del país las tormentas incrementan en promedio 2 kW/m de ola el potencial energético unidimotriz.

Mientras que el potencial energético por estaciones del año (Figura 4) muestra que durante invierno se tiene mayor potencial en el Golfo de México, donde la Península de Yucatán presenta valores de 6 a 9 kW/m. Para el Pacífico el menor potencial es de 2 y 3 kW/m, aumentando durante primavera hasta valores entre 4 y 6 kW/m.

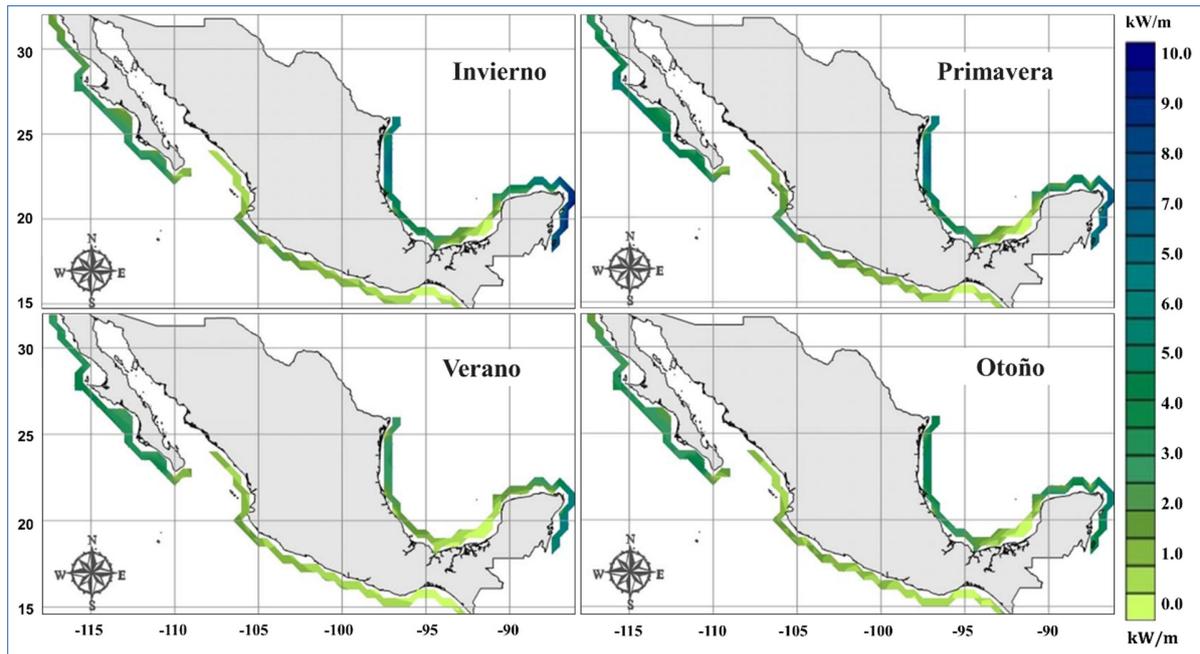


Figura 4.- Potencial energético del oleaje en costas mexicanas por estación del año [Pérez 2013]

A continuación se presenta una estimación de las condiciones de oleaje que se pueden encontrar en las costas Mexicanas (García 2014), donde la Figura 5-A muestra la altura de ola significativa “H<sub>s</sub>” en la cual el área sombreada en color rojo indica las zonas con alturas de ola mayores a 1.2 metros y la figura 5-B muestra el periodo de oleaje pico “T<sub>p</sub>” donde las áreas sombreadas indican las zonas con periodos mayores a 7 segundos.

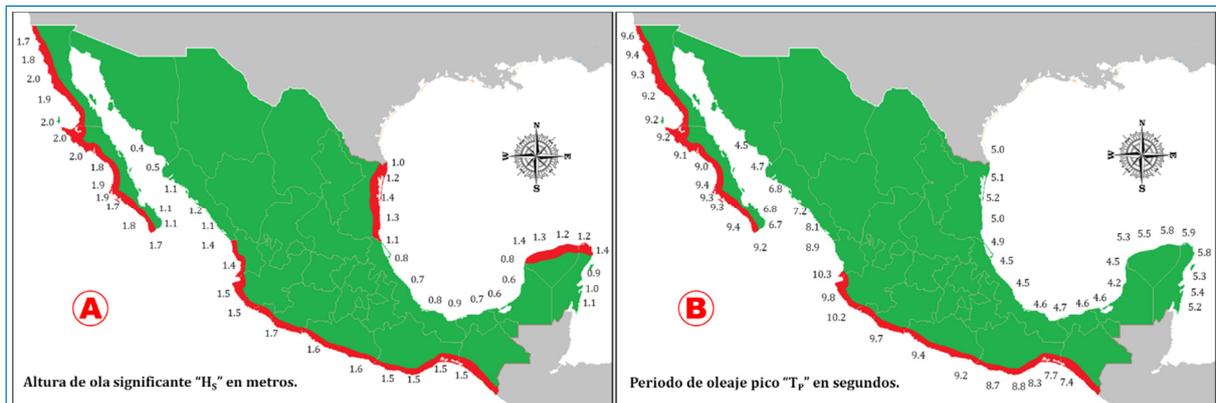


Figura 5.- Estimación de la altura y periodo de oleaje en costas Mexicanas [García 2014]

La información mostrada en los mapas de la figura 5 fueron estimados a partir de los datos estadísticos disponibles en el Atlas de Oleaje Oceánico Mexicano (ATLOOM) en el portal del Instituto Mexicano del Transporte “IMT”, así como del Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y de la Red de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas (RENEOM).

Con los datos de altura y periodo de oleaje mostrados en la figura 5 se estimó el potencial energético y se ubicaron los sitios de México con mayor potencial undimotriz, es así como se generó el mapa de la figura 6 que muestra los sitios de mayor potencial explotable, los cuales se pueden agrupar en 4 zonas: en el Océano Pacífico Zona 1 (Península de Baja California) con una potencia entre 8 y 14 kW/m, Zona 2 (Oaxaca, Guerrero, Michoacán, Colima y Jalisco) con un rango de 6 a 11 kW/m, en el mar Caribe y Golfo de México Zona 3 (Península de Yucatán) con un rango de 3 a 6 kW/m y Zona 4 (Tamaulipas) con 2 a 5 kW/m.



Figura 6.- Sitios con mayor potencial undimotriz en las costas de México [Adaptado de García 2014]

### Capítulo III:

## Antecedentes de Sistemas WEC en México

El gran rezago de México en el desarrollo de sistemas para captar las distintas fuentes de energía marina es muy evidente, pues hasta hace unos años se habían desarrollado pocos dispositivos cuyo registro de operación bajo condiciones reales en el océano había sido nulo o muy limitado, por lo que actualmente ninguno ha alcanzado la etapa comercial.

De acuerdo a datos obtenidos del portal de CFE y de la UNAM, en México hasta 2013 solo había registro de cuatro proyectos relacionados con el aprovechamiento de la energía marina, aunque actualmente de se desconoce la situación de cada uno de ellos, a continuación se enlistan en orden cronológico estos proyectos:

1. En 1974 CFE desarrolló un estudio de factibilidad para el aprovechamiento de la energía contenida en el oleaje y generar energía eléctrica.
2. En 1996 la UNAM efectuó el proyecto SIBEO para desarrollar un sistema de bombeo por energía de oleaje. <http://www.fenomec.unam.mx/SIBEO/sibeo.html>
3. En 2005 CFE aplica tecnología de patente australiana (energía de oleaje de columna de agua oscilante, OWC) de la empresa Oceanlinx Ltd.
4. En 2013 el Gobierno Federal a través de CFE compró tecnología Australiana a la empresa Oceanlinx Ltd para instalar un sistema de columna de agua oscilante (OWC) en Rosarito, Baja California.

Sin embargo también existen registros de algunos dispositivos undimotrices mexicanos que alcanzaron la etapa de pruebas bajo condiciones reales de operación y que fueron evaluados en diversos procesos costeros, algunos de estos se enlistan en la Tabla 1.

**Tabla 1.- Pruebas en campo realizadas en México con dispositivos undimotrices [Adaptado de García 2014].**

Empresa/Institución	Tecnología/dispositivo	Sitio de pruebas	Año
UAG, ICF-UNAM, IINGEN-UNAM	OWC	Duque de Alba, Acapulco Guerrero	2018
Laboratorio de Investigación Sexto Sol	Boya flotante	Playa Escollera, Rosarito Baja California	2011
RDZ (Renewable Energy Technology)	OWC	Playa Ventanas, Manzanillo Colima	2010
ICMyL-UNAM	SIBEO	Oaxaca	2004
ICMyL-UNAM	Amplificador de oleaje	Puerto Morelos, Quintana Roo	2001
ICMyL-UNAM	REAL	Puerto Morelos, Quintana Roo	1997

Es de notar que el desarrollo de sistemas para conversión de la energía del oleaje en México es muy limitado, no solo por la falta de financiamiento sino también por la falta de intereses políticos y académicos. Por otra parte, la ubicación geográfica de México lo limita a un potencial energético del oleaje bajo (del orden de 10 KW/m) en comparación con zonas de Europa donde suelen alcanzar potenciales mayores a 60 KW/m, sin embargo, esta cantidad de energía no es despreciable y pudiera utilizarse para abastecer parte de la creciente demanda energética. Es por ello que el gran reto en las investigaciones mexicanas radica en desarrollar sistemas capaces de generar energía en zonas con bajo potencial, de este modo en zonas con mayor potencial energético los dispositivos WEC podrían operar de forma más eficiente.

De acuerdo a lo anterior a continuación se describen las actividades desarrolladas durante este trabajo de tesis doctoral en aras de la búsqueda y desarrollo de sistemas que aprovechen el potencial energético undimotriz de México.

---

## Capítulo IV:

# Actividades de Laboratorio y de Campo

---

Las actividades desarrolladas en este trabajo de investigación se presentan en tres grupos principales: el primero hace referencia a una investigación de gabinete para conocer el potencial de la energía undimotriz en México tomando como base estudios previos realizados por Pérez en 2013 y García en 2014 los cuales han sido presentados en el capítulo II.2, el segundo grupo incluye las pruebas en laboratorio donde se abarcan los preparativos y el desarrollo de experimentos bajo condiciones controladas en un canal de oleaje del Instituto de Ingeniería de la UNAM, y el tercero abarca las actividades de campo donde en algunos casos se realizó el escalamiento, construcción, adecuación, traslado e instalación de modelos en el mar. Finalmente como actividad anexa se hace una descripción general de los impactos asociados a la implementación de un WEC, así como los usos potenciales de la energía undimotriz.

### IV.1.- Actividades en laboratorio

Esta etapa abarca las pruebas realizadas a 4 modelos físicos de 3 sistemas de conversión del oleaje (modelo 1:10 del WEC MICO-1T, modelo 1:20 del WEC MICO-2T, modelo 1:17 y modelo 1:32 del WEC UFCAP) donde cada dispositivo fue evaluado bajo distintas condiciones de operación en el canal de oleaje del Laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM. Por lo tanto, a continuación se inicia con una descripción del canal de oleaje utilizado y posteriormente se describen las pruebas realizadas con cada modelo.

#### IV.1.1.- Laboratorio de oleaje del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

El laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM cuenta con un canal de oleaje de 37 metros del largo, 0.8 metros de ancho y 1.2 metros de alto [Figura 7]. Estas características permiten utilizar 0.9 metros de profundidad y generar alturas de ola hasta de 0.4 metros. El material de construcción de uno de los costados y del fondo del canal es lámina de acero inoxidable y el otro lado está conformado por 30 metros de vidrio y acero inoxidable soportados por una estructura tubular de acero PTR. En la parte superior del canal se dispuso una canaleta que permite tender el cableado aéreo facilitando así su manejo y el tránsito por el laboratorio.



Figura 7.- Laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Lleno a su máxima capacidad, el canal requiere cerca de 24,000 litros de agua y en condiciones normales de operación 15,000 litros. Esta gran cantidad de agua es recirculada y almacenada en una cisterna con lo cual se evita su desperdicio. Para llevar el agua de la cisterna al canal se utilizan tres bombas de dos caballos de fuerza, cada una llena el canal a razón de un centímetro de profundidad por minuto. Para vaciarlo se utilizan las mismas bombas y un sistema por gravedad situado en la parte final del canal, en donde se ha dispuesto material que además de cumplir funciones hidráulicas específicas, sirve de filtro para las partículas más gruesas. Una vez en la cisterna, la mayoría de las partículas finas se depositan en el fondo. Adicionalmente se cuenta con un sistema de filtrado que mantiene la transparencia y pureza del agua.

El generador de olas consiste de una placa vertical de acero sostenida por un riel horizontal que se mueve hacia delante y atrás. Dicho riel, a su vez, está suspendido de una estructura fija a las paredes del canal. Este arreglo permite que los elementos de precisión estén colocados a suficiente altura sobre el nivel del agua y no corran riesgo de mojarse. El riel es llevado hacia delante y atrás por un motor eléctrico que opera a través de engranes controlado desde una PC. El motor tiene muy baja inercia, lo que es necesario para la operación en frecuencia alta, mientras que los engranes están diseñados para trabajar a altas velocidades. Una playa de esponja muy porosa se colocó detrás del generador para absorber la energía del agua y evitar la generación de ondas adicionales.

Las principales características técnicas del generador son: Carrera de la paleta de 0.85 metros y velocidad máxima de la paleta de 0.81 m/s. El equipo de generación fue adquirido a la empresa HR Wallingford del Reino Unido y entre las capacidades del mismo se cuentan las de generar tanto oleaje controlado (regular) en el que siempre se tiene la misma ola, como oleaje aleatorio (irregular) el cual resulta mucho más cercano a la realidad.

Una de las limitaciones de este tipo de instalaciones es que el oleaje generado no se disipa, sino que tiende a reflejarse en las paredes de los extremos del canal. Este problema aumenta si para algún experimento se ha colocado, dentro del canal, una estructura altamente reflejante; puesto que las ondas viajarán en ambos sentidos del canal provocando una condición caótica que no permitirá hacer estudios fiables. Para solucionar lo anterior, el canal cuenta con un módulo de absorción de

oleaje diseñado por HR Wallingford para minimizar el efecto de las ondas re-reflejadas. Este módulo mide la altura de ola en la placa con un medidor de nivel y ajusta la señal para lograr la altura designada por el usuario. Adicionalmente, se ha dispuesto una playa disipativa en la parte final del canal.

## Instrumentación del canal de oleaje.

Actualmente el canal de oleaje del Laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería cuenta con la siguiente instrumentación:

**Medidores de nivel:** Se cuenta con doce medidores de nivel de tipo probeta de 600 mm de largo. Este tipo de sensores registran el nivel de la superficie del agua en un instante dado aprovechando la capacidad conductiva del agua, es decir, entre las dos barras metálicas se hace pasar una corriente eléctrica cerrando el circuito solo en la parte sumergida. Finalmente, a partir de una relación entre el voltaje y la longitud sumergida del sensor se puede conocer la profundidad en cada instante y de ahí la altura de las olas.

**Sensores de presión:** Se tienen ocho sensores de presión, cuatro con rango de 0 a 2 metros de columna de agua y cuatro de 0 a 5 metros de columna de agua. Las celdas de presión consisten en un diafragma capaz de registrar variaciones muy pequeñas en el medio que lo rodea, y al ser conectado a un circuito con corriente, las traduce a voltajes los que a su vez son transformados a su equivalente en metros de columna de agua. Este equipo a pesar de ser relativamente frágil, resulta muy confiable, y en virtud de su capacidad de responder a cambios muy rápidos, puede ser utilizado para la medición de impactos sobre estructuras marítimas o portuarias causadas por el oleaje.

**Micropropelas:** Se cuenta con 4 micropropelas digitales con rango de 6 a 150 cm/s, cada una mide la velocidad a una profundidad dada a través de un pequeño rehilete y un sensor que registra las RPM inducidas por una corriente de agua.

**Velocímetro acústico doppler:** Es un aparato de muy alta definición que permite conocer las tres componentes de la velocidad en un punto dado. El principio de operación parte de la emisión de una señal acústica que luego de rebotar en las partículas del agua de un volumen de control situado 5 cm por arriba de la fuente sonora es captada por tres transductores. La velocidad del fluido se puede estimar al relacionar la frecuencia de la onda inicial con las frecuencias deformadas que captarán los transductores.

**PIV-Láser:** Consiste en un iluminador láser sincronizado con una cámara digital de alta velocidad que en post proceso puede calcular velocidades muy bajas del flujo por medio de técnicas de visión computacional. Este equipo es de gran utilidad en flujos de pequeña escala y velocidades bajas, adicionalmente, es especialmente útil cuando la turbidez es alta ya que la presencia de partículas en el flujo le permite tener más elementos de medición.

**Cámaras de alta velocidad:** Se cuenta con dos cámaras de alta velocidad y alta resolución que permiten grabar pequeños instantes de tiempo de un fenómeno, lo que a su vez permite analizar visualmente de forma detallada el fenómeno de estudio.

**Torquímetro IML:** Se cuenta con un torquímetro el cual es una herramienta de precisión ideal para registrar pares pequeños, es utilizado para medir el torque de un motor o la torsión mecánica al aplicar una fuerza de tensión para hace rotar algún elemento, este instrumento puede realizar 20 registros por segundo en un rango de 0 a 50 Nm.

**Anemómetro de hilo caliente:** Se cuenta con un anemómetro de hilo caliente con registrador de datos en tiempo real que puede almacenar hasta 8,000 entradas. Este sensor cuenta con una varilla telescópica que permite medir velocidad, volumen y temperatura del aire en lugares de difícil acceso con gran precisión y rapidez inclusive a velocidades bajas, también puede ser configurado para tomar muestras cada 2 segundos hasta 8 horas.

**Taquímetro laser:** Se cuenta con un taquímetro laser, el cual es un instrumento digital cuyo láser permite conocer con gran precisión y rapidez la velocidad de giro en un elemento rotatorio sin ser afectado por la temperatura aun en lugares reducidos o peligrosos. Las lecturas son instantáneas y son expresadas en revoluciones por minuto (RPM).

#### IV.1.2.- Actividades en laboratorio con el modelo 1:17 del WEC UFCAP

El WEC UFCAP (Por sus siglas en inglés: Unidirectional Flow Collective Air Pumps) es un dispositivo OWC que consiste en un arreglo de cámaras de aire ancladas al fondo marino e interconectadas entre sí mediante un conducto de aire, el conducto y la cámara de aire están unidos mediante una válvula que crea un flujo de aire unidireccional para hace rotar una turbina central y ésta a su vez a un generador eléctrico ubicado en la costa (Figura 8), el arreglo y número de cámaras puede variar en función de la capacidad total requerida.

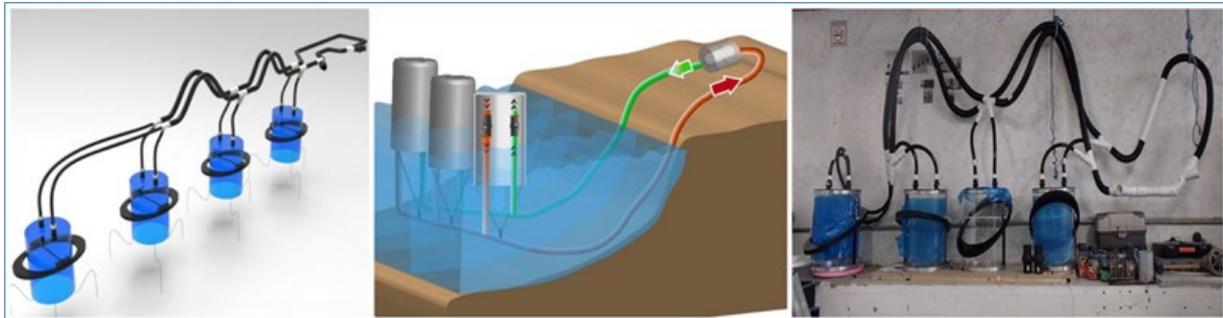


Figura 8.- Vista lateral del WEC UFCAP con 4 cámaras OWC

Cada cámara del modelo a escala 1:17 del WEC UFCAP tiene 0.5 metros de altura, 0.38 metros de diámetro y 0.002 metros de grosor en paredes, la mayor parte de su construcción es en acrílico y solo una pequeña porción en aluminio, en cambio el diámetro de los conductos de aire secundarios son de 1" en PVC, mientras que los principales donde esta acoplada la turbina de 2".

Las pruebas de laboratorio con este modelo se realizaron en 2 etapas: durante la primera el objetivo fue evaluar el funcionamiento y estabilidad del sistema de captación de energía, por lo cual se realizaron diversas pruebas para estabilizar el sistema de anclaje, evaluar el abombamiento de la parte superior de la cámara OWC y comparar el flujo de aire generado a diferentes profundidades de la cámara. Mientras que durante la segunda etapa se inició la optimización del sistema de captación y el sistema de conversión de energía, durante la cual se caracterizó el flujo

de aire generado con una y dos cámaras de aire a diferentes profundidades, también se compararon 3 arreglos diferentes de las cámaras OWC analizando velocidad del viento dentro del conducto, así como reflexión, transmisión y disipación de energía del oleaje.

A continuación en la tabla 2 se enlista en orden cronológico la secuencia de pruebas realizadas durante ambas etapas con el modelo 1:17 del UFCAP incluyendo sus características principales, posteriormente en los siguientes párrafos se describe a detalle cada una de ellas.

**Tabla 2.- Ensayos realizados con el modelo 1:17 del WEC UFCAP.**

<b>Etapas de pruebas</b>	<b>Secuencia de pruebas</b>	<b>Descripción de operación</b>	<b>Tipo de sensores</b>	<b>Parámetros medidos</b>	<b>No. de ensayos</b>
<b>Etapas 1: Evaluación</b>	1	Estabilización del sistema de anclaje del modelo 1:17	Anemómetro de hélice	Velocidad de viento	40
	2	Cámara OWC normal durante la evaluación, modelo 1:17	Anemómetro de hélice	Velocidad de viento	180
	3	Cámara OWC con refuerzo, modelo 1:17	Anemómetro de hélice	Velocidad de viento	80
	4	Cámara OWC sumergida al 30 y 50 %, modelo 1:17	Anemómetro de hélice	Velocidad de viento	160
<b>Etapas 2: Optimización</b>	5	3 cámaras OWC (Normal, aletas y diámetro reducido), modelo 1:17	Anemómetro de hélice	Velocidad de viento	24
	6	3 cámaras OWC (Normal, aletas y diámetro reducido), modelo 1:17	Anemómetro de Hilo Caliente	Velocidad de viento	24
	7	3 cámaras OWC (Normal, aletas y diámetro reducido), modelo 1:17	Sensores de nivel	Altura y Periodo de oleaje	36
	8	Potencia turbina-generador, modelo 1:17	Osciloscopio	Voltaje	5

### **Primera etapa de pruebas:**

**Estabilización del sistema de anclaje:** Durante los primeros ensayos preliminares con el modelo a escala 1:17 se observó que el peso de los conductos de aire ubicados en la parte superior de las cámaras OWC provocaban que éstas perdieran el punto de equilibrio para flotar en la superficie del agua haciendo que el sistema fuera inestable e induciendo su hundimiento. Por tal motivo las primeras actividades consistieron en darle estabilidad al sistema durante su operación (Figura 9), por lo que para solucionar este problema se realizaron las siguientes acciones:

- a) Se probó un sistema de anclaje de mayor peso y tamaño integrando así 4 pesas al fondo del canal que sujetaban la base de las cámaras mediante una barra metálica.

- b) Se modificó el punto de flotabilidad de las cámaras al cambiar el punto de equilibrio donde se sujetaban los flotadores, para esto se recorrió hacia arriba el punto de sujeción de los flotadores permitiendo que la cámara quedara hundida 20% más.
- c) Se sustituyeron los flotadores por 3 soportes metálicos en “L” que sujetaban las paredes externas de la cámara con el fondo del canal.
- d) Se fijó la cámara OWC con soportes en “T” sujetándolas mediante barras metálicas verticalmente de la parte externa de la cámara hasta la parte superior del canal de oleaje.

**Reforzamiento de la tapadera de la cámara OWC:** Debido a que en pruebas anteriores se había observado un pequeño abombamiento en la parte superior de la cámara de aire durante el paso de la onda, se reforzó la tapa de la misma mediante una placa de acrílico con la finalidad de reducir la deformación causada por la compresión del aire (Figura 9-E).

**Cámara OWC sumergida al 30 y 50%:** Como parte de la evaluación del WEC se realizaron pruebas con la cámara sumergida al 30% (Figura 9-F) y al 50% (Figura 9-G) para comparar el flujo de aire generado en ambas condiciones, en cada caso la sumergencia de las cámaras OWC se logró mediante los soportes de la figura 9-H.

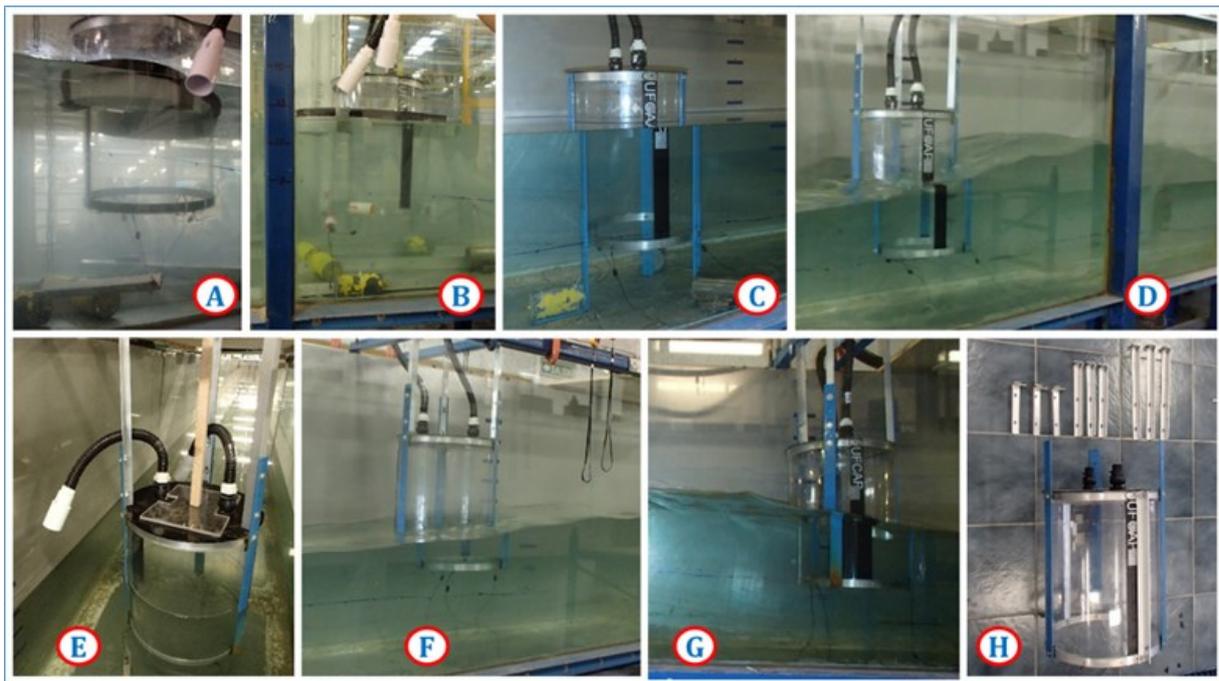


Figura 9.- Modelo 1:17 del WEC UFCAP durante las pruebas de evaluación y diagnóstico

En los ensayos de la primera etapa se evaluaron distintas condiciones de operación hidrodinámicas y mecánicas con el objetivo de buscar los escenarios bajo los cuales el sistema de captación de energía del WEC tiende a ser más estable y eficiente. Las condiciones hidrodinámicas incluyeron 2 tipos de oleaje, 8 periodos y 5 alturas de ola, mientras que las condiciones mecánicas incluyeron una y dos cámaras OWC sumergidas al 30 y 50% tal como se describe en la tabla 3, donde la combinación de estas condiciones sumaron un total de 160 ensayos.

Tabla 3.- Condiciones de operación para la evaluación del WEC UFCAP 1:17.

	Condición de operación	Número	Descripción
Hidrodinámica	Tipo de oleaje	2	Regular e Irregular
	Periodo de oleaje “ $T$ ”	8	1.6 a 3.0 segundos
	Altura de ola “ $H$ ”	5	0.05 a 0.15 metros
	Profundidad del canal	2	0.5 y 0.7 metros
Mecánica	Profundidad de cámara de aire “ $h_c$ ”	2	30 y 50 %
	Número de cámaras	1 y 2	2 cámara OWC en serie
	Distancia entre cámaras	1	1.2 metros

### Segunda etapa de pruebas:

Durante la segunda etapa se evaluaron y compararon 3 variantes en el modelo de las cámaras OWC: la primera consistió en incluir un par de placas verticales (aletas) sujetadas entre la pared del canal y la pared de la cámara OWC (Figura 10-A) con el objetivo de eliminar la alteración del oleaje producido por el reducido espacio entre el dispositivo y el canal de olas, la segunda condición fue la cámara OWC con diámetro interno reducido de 0.39 a 0.27 metros (Figura 10-B) cuyo objetivo fue conocer cómo influye un cambio de área interna en el flujo de aire generado, así como su influencia en el oleaje externo y la tercer condición fue la cámara OWC normal (Figura 10-C).



Figura 10.- Cámaras OWC evaluadas en laboratorio

Los escenarios de operación utilizados durante las pruebas de la segunda etapa se describen en la tabla 4, donde se observa que las condiciones hidrodinámicas incluyeron 2 tipos de oleaje, 2 periodos y 2 alturas de ola, mientras que las condiciones mecánicas incluyeron las 3 cámaras OWC sumergidas al 50%. La combinación de estas condiciones sumó un total de 24 ensayos cuyo objetivo primordial fue encontrar la cámara OWC con la cual se obtiene la máxima velocidad del aire.

Tabla 4.- Condiciones de operación para la optimización del WEC UFCAP 1:17

Condición de operación		Número	Descripción
Hidrodinámica	Tipo de oleaje	2	Regular e Irregular
	Periodo de oleaje " $T$ "	2	2.4 y 3.0 segundos
	Altura de ola " $H$ "	2	0.05 a 0.15 metros
Mecánica	Profundidad de cámara de aire " $h_c$ "	1	0.25 metros
	Modelos de cámaras	3	Normal, Aletas y Pared reducida
	Número de cámaras	1	Normal/Aletas/Pared reducida

Esta etapa de pruebas se realizó en 4 series de ensayos: la primera contempló la caracterización del modelo mediante la medición y registro de velocidad del viento en los conductos de entrada y salida utilizando un anemómetro digital de hélice (Figura 11-A), mientras que durante la segunda se comparó la velocidad del viento bajo las mismas condiciones de operación utilizando un anemómetro de hilo caliente (Figura 11-B), para la tercera serie de ensayos se replicaron las condiciones de operación utilizando sensores de nivel para analizar los coeficientes de reflexión, disipación y transmisión de la energía del oleaje (Figura 11-C), y finalmente durante la cuarta serie de pruebas se compararon dos turbinas para elegir el sistema turbina-generator más apropiado para el WEC.



Figura 11.- Imágenes obtenidas durante el análisis y actualización de la base de datos

En la figura 11-D se puede observar la turbina original del WEC UFCAP, mientras que en la figura 11-E se muestra una turbina alternativa que ya cuenta con un generador integrado, finalmente la figura 11-F muestra el sistema de conversión y generación de energía del WEC.

Por otro lado, la generación del oleaje en el Laboratorio se realizó mediante los softwares “WaveDesktop” y “AwaSys” con los cuales se puede replicar y simular diversos estados del mar incluyendo tormentas, tsunamis, oleaje regular e irregular (tipo Jonswap) y para iniciar la generación de ondas el software requiere datos como: tipo de oleaje, altura de ola, periodo de oleaje, profundidad del canal y duración de las pruebas. Mientras que para el registro de datos se cuenta con un datalogger que recibe y almacena la señal de todos los sensores conectados mediante un software llamado “IMC Studio” a una frecuencia de 20 lecturas por minuto.

#### IV.1.3.- Actividades en laboratorio con el modelo 1:32 del WEC UFCAP

El modelo 1:32 es una versión más pequeña del modelo a escala 1:17 del WEC UFCAP descrita en el punto anterior. Debido a que durante las pruebas anteriores (Capítulo IV.1.2) se observó que el oleaje se distorsionaba al pasar por el limitado espacio entre la pared del canal y la pared de la cámara OWC dificultando reproducir adecuadamente el comportamiento real del WEC en el océano, se vio la necesidad de cambiar la escala del modelo y así obtener datos más precisos durante los ensayos.

Por lo tanto, con las ecuaciones de similitud de Froude: 16, 17, 18 y 19 se recalcularon las nuevas dimensiones de los componentes estructurales, así como de las condiciones hidrodinámicas (periodo de oleaje, altura de ola, profundidad de operación y potencia de generación) para el modelo 1:32.

$$T_R = \sqrt{L_e} * T_m \dots\dots\dots (16)$$

$$H_R = L_e * H_m \dots\dots\dots (17)$$

$$L_R = L_e * L_m \dots\dots\dots (18)$$

$$P_R = L_e^{3.5} * P_m \dots\dots\dots (19)$$

Donde “ $T_R$ ” es el periodo real en segundos, “ $H_R$ ” la altura real en metros “ $L_R$ ” la longitud real en metros, “ $P_R$ ” la potencia real en W/m, “ $L_e$ ” la escala del prototipo, “ $T_m$ ” el periodo del modelo de laboratorio, “ $H_m$ ” la altura de ola a escala laboratorio, “ $L_m$ ” la longitud de la cámara OWC a escala laboratorio y “ $P_m$ ” la potencia obtenida con el modelo en W/m.

De este modo se calcularon las nuevas dimensiones del modelo y se inició su construcción con materiales comerciales como acrílico, PVC y aluminio, por lo tanto, las nuevas dimensiones para la cámara OWC de este modelo quedaron de: 0.26 metros de altura, 0.20 metros de diámetro y conductos de 1/2” de diámetro. En la figura 12 se muestra una comparación entre ambos modelos de la cámara OWC del WEC UFCAP.

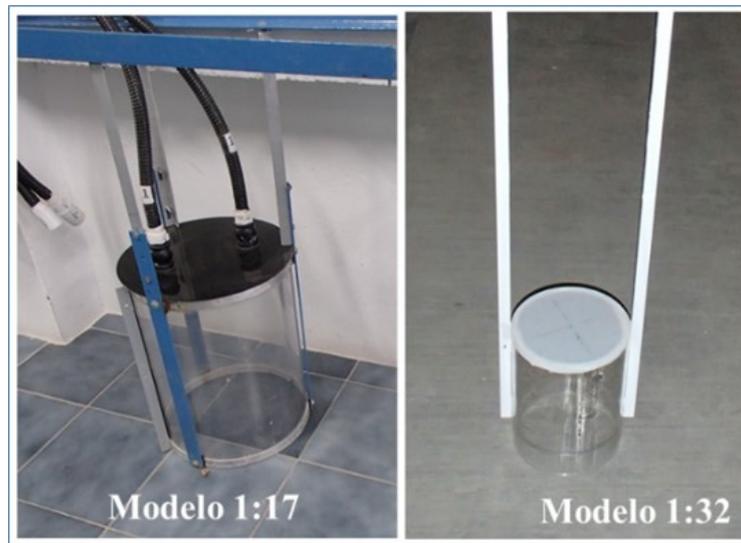


Figura 12.- Vista frontal del modelo a escala 1:17 y 1:32 del WEC UFCAP

La etapa de pruebas con el modelo a escala 1:32 se realizó en dos partes; durante la primera se eligió el sistema de conversión y generación más adecuado para el modelo mediante la combinación de 4 generadores y 2 turbinas. Cada combinación fue puesta a operar en una corriente de aire controlada para medir el voltaje generado mediante un osciloscopio, posteriormente se compararon los voltajes para seleccionar la combinación de mayor potencia de generación (Figura 13), finalmente durante la segunda etapa se integró el arreglo turbina-generator a las cámaras OWC y se realizaron algunas pruebas preliminares con el WEC completo (sistema de captación, conversión y generación de energía) dentro del canal de oleaje.

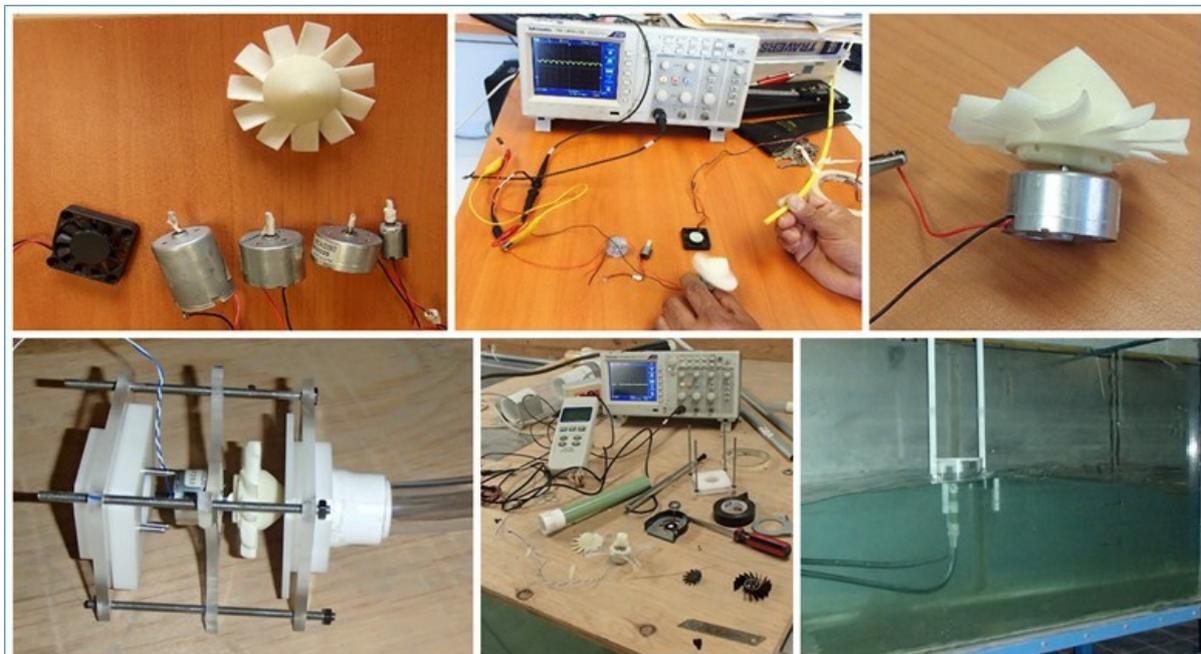


Figura 13.- Pruebas realizadas con el modelo a escala 1:32 del WEC UFCAP

Las condiciones de operación propuestas para optimizar el modelo 1:32 se muestran en la tabla 5, las cuales suman un total de 630 ensayos, sin embargo solo se realizaron 6 pruebas preliminares utilizadas para ajustar el WEC que incluyeron 2 alturas de ola (0.05 y 0.09 metros), 3 periodos de oleaje (1.2, 1.8 y 2.2 segundos) con oleaje regular y cámara sumergida al 50%.

**Tabla 5.- Condiciones de operación para optimizar el modelo 1:32 del WEC UFCAP.**

Condición de operación		Número	Descripción
Hidrodinámica	Tipo de oleaje	2	Regular e Irregular
	Periodo de oleaje “ $T$ ”	7	1.2, 1.4, 1.6, 1.8, 2.0, 2.2, y 2.4 segundos
	Altura de ola “ $H$ ”	5	0.030, 0.050, 0.070, 0.090 y 0.110 metros
Mecánica	Profundidad de cámara de aire “ $h_c$ ”	3	25%, 50% y 75%
	Profundidad del canal “ $h$ ”	3	0.31, 0.47 y 0.63 metros

Al igual que en el caso del modelo 1:17, la generación de oleaje se llevó a cabo mediante el software “WaveDesktop” y “AwaSys”, con los cuales los parámetros simulados fueron tipo de ola, periodo de oleaje, altura de ola y profundidad de operación, mientras que el registro de datos también fue efectuado con el software “IMC Studio” el cual recibe y almacena todas las señales de los sensores conectados.

Por otro lado los sensores utilizados para recabar los datos fueron: un osciloscopio Tektronix TDS1001-EDU para medir el voltaje generado, un tacómetro digital General Tools LT2234C para medir las RPM de la turbina, un anemómetro de hilo caliente Omega HHF2005HW para medir la velocidad del aire y dos sensores de presión Keller américa para medir la presión dentro y fuera de la cámara OWC.

#### **IV.1.4.- Actividades en laboratorio con el modelo 1:20 del WEC MICO-2T**

Este WEC es la segunda versión de la gama de dispositivos MICO por lo que adquiere su nombre: MICO-2T el cual es un sistema undimotriz de tipo boya flotante conformado por 2 boyas (Figura 14), la primer boya orientada hacia la costa capta la energía de la ola cuando ha pasado por el dispositivo, mientras que la boya secundaria orientada hacia el océano capta la energía de la ola antes de pasar por la estructura. Este modelo es una representación a escala 1:20 del WEC cuyas dimensiones son: 1.25 metros de alto, 0.75 metros de ancho y 0.92 metros de largo con un peso de 29 kg.

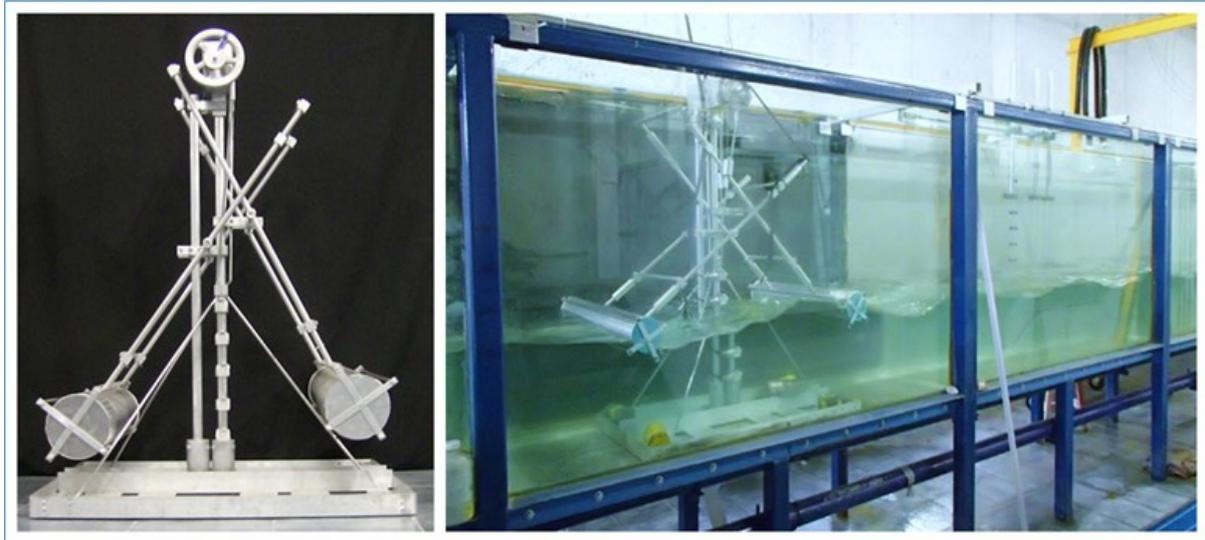


Figura 14.- Vista lateral del modelo 1:20 del WEC MICO-2T durante las pruebas de laboratorio

El objetivo principal de los ensayos realizados con éste modelo fue obtener las condiciones mecánicas e hidrodinámicas óptimas con las cuales el dispositivo alcanza el máximo potencial energético, para lo cual el WEC fue sometido a pruebas bajo diversas condiciones de operación en las que se varió el diámetro de boya, longitud de palanca, así como el tipo, periodo y altura de oleaje a distintas profundidades del canal. En la tabla 6 se describen las condiciones de operación de las pruebas, las cuales sumaron un total de 240 ensayos.

Tabla 6.- Condiciones de operación durante las pruebas con el WEC MICO-2T 1:20.

Condición de operación		Número	Descripción
Mecánica	Diámetro de boya	2	A=0.10 metros, B=0.15 metros
	Longitud de palanca	3	X=0.80 metros, Y=0.90 metros, Z=1.00 metros
Hidrodinámica	Tipo de ola	2	Regular , Irregular
	Altura de ola	2	0.075 metros, 0.1 metros
	Periodo de oleaje	5	0.8, 1.0, 1.2, 1.4 y 1.6 segundos
	Profundidad del agua	2	0.4 metros, 0.5 metros

La generación de oleaje se realizó mediante el software HR WaveMaker el cual permite simular diversos estados del mar, incluyendo oleaje regular e irregular (tipo Jonswap) así como altura de ola y periodo de oleaje a una profundidad dada. Mientras que el registro de datos se realizó con el software Wave Data Collector, el cual recibe la señal de todos los sensores conectados a una frecuencia de 20 lecturas por segundo.

Las pruebas se centraron en evaluar la relación entre la longitud del brazo de palanca y la longitud de onda, así como el diámetro de boya y la altura de ola. Este análisis permite identificar las condiciones bajo las cuales el WEC capta la mayor cantidad de energía de una ola para posteriormente ubicar las zonas costeras de México donde el WEC pueda operar de forma más eficiente.

#### IV.1.5.- Actividades en laboratorio con el modelo 1:10 del WEC MICO-1T

Los trabajos realizados con el WEC MICO-1T se han desarrollado en tres fases: Durante la primera García en 2014 evaluó y optimizó en laboratorio un modelo a escala 1:20 de este WEC. A partir de estos resultados se inició la segunda fase para evaluar el mismo dispositivo en costas de Puerto Progreso, Yucatán (descritas en el capítulo IV.2.2 de este escrito), posteriormente se inició la tercer fase que incluyó el escalamiento y construcción de un modelo a escala 1:10 del mismo WEC para ser evaluado en costas de Puerto Morelos, Quintana Roo.

Por lo tanto, a continuación se describen las actividades de la tercer fase con el modelo a escala 1:10 del WEC MICO-1T (Módulo Independiente de Captura de Olas de un tiempo) el cual es un sistema construido en aluminio y acondicionado para operar bajo condiciones reales en el océano, su arquitectura se adecuó para funcionar con el oleaje de Puerto Morelos en Quintana Roo México.

Las pruebas de la tercera fase se efectuaron en dos etapas; durante la primera se desarrollaron las actividades en el laboratorio (escalamiento, construcción, pruebas de estabilidad y generación de energía) las cuales se describen a continuación, mientras que la segunda etapa abarcó las actividades de campo que se describen en el capítulo IV.2.3 de este trabajo.

##### **Escalamiento, ensamble y adecuación del modelo.**

Como primer actividad de esta etapa se recalcularon las dimensiones del WEC mediante las ecuaciones de similitud 16 a 19, de este modo se pasó del modelo 1:20 a un modelo 1:10 el cual fue adaptado para operar en condiciones del oleaje de Puerto Morelos México (0.3 metros de altura de ola, 6 segundos de periodo y mareas de 0.5 metros), donde con ayuda del Laboratorio de Investigación Sexto Sol se inició la construcción del modelo en el Laboratorio del Instituto de Ingeniería (Figura 15), posteriormente se construyó e incorporó el sistema de adquisición de datos incluyendo sensores, componentes eléctricos y electrónicos necesarios para evaluar su operación en campo.

Ensamblado en su totalidad el modelo 1:10 del WEC MICO-1T ocupó un área de 37 m<sup>3</sup> al tener 3.8 metros de largo, 2.9 metros de ancho y 3.3 metros de alto con un peso aproximado de 800 kg, mientras que las dimensiones de la boya fueron: 2 metro de largo y 0.39 metros de diámetro con un brazo de palanca de 4 metros, en cambio el volante de inercia quedó de 1 metro de diámetro y un peso de 70 kg. La mayor parte del material de construcción del WEC fue aluminio en un 95 % y solo un 5 % de acero inoxidable.

Este modelo cuenta con 3 chasis herméticos; el primero de ellos resguarda sensores de corriente y voltaje, así como un banco de 16 resistencias de 50 W donde se consume y registra la energía producida por el generador, en el segundo chasis se localiza un sistema de adquisición, almacenamiento y envío remoto de datos, mientras que el tercer chasis contiene un banco de baterías que suministra energía a todos los componentes electrónicos, las baterías a su vez son alimentadas por un panel solar instalado en la parte superior del chasis de generación.



Figura 15.- Ensamble del modelo 1:10 del WEC MICO-1T, Laboratorio de Costas y Puertos de la UNAM

### Pruebas de laboratorio.

Una vez concluida la construcción del WEC se iniciaron las actividades de examinación, que incluyeron la revisión general de la estructura, evaluación de su estabilidad durante las pruebas, generación de energía del WEC, fidelidad de datos del sistema de almacenamiento y comunicación remota entre el sistema de adquisición del WEC y un punto externo de conexión a internet.

Para simular el movimiento del oleaje se construyó un dispositivo mecánico que daba movilidad al brazo de boya (Figura 16), el cual estaba compuesto por un motor que accionaba una polea y esta a su vez mediante una eslinga al brazo de boya, con éste sistema se logró simular el oleaje de las costas de Puerto Morelos, sitio seleccionado para su instalación en campo.

Las diversas pruebas realizadas en laboratorio sirvieron para:

- Estimar la potencia de generación del WEC mediante un arreglo de 9 focos de 60 W, con lo cual se diseñó el banco de resistencias del modelo.
- Integrar y probar todos los sensores internos y externos.
- Una vez conectado el sistema electrónico se midió el voltaje requerido para alimentarlos.
- Conocido el voltaje se calculó la cantidad de energía requerida para alimentar al sistema electrónico durante todo el día.
- Con el requerimiento de energía diario se determinó el tamaño del banco de baterías para alimentar al sistema.
- Definido el banco de baterías se dimensionó la capacidad y tamaño del panel solar que las recargaría.



Figura 16.- Pruebas de laboratorio con el modelo 1:10 del WEC MICO-1T

En la parte inferior izquierda se puede apreciar en color azul la estructura mecánica que se utilizó para simular el movimiento de la palanca por el oleaje, mientras que en la parte central se observa el WEC durante las pruebas y a la derecha se muestra el arreglo de focos utilizado para visualizar físicamente la producción de energía así como el sistema de adquisición de datos.

## IV.2.- Actividades en campo

Este grupo de actividades abarca los trabajos realizados en campo con 3 modelos WEC: un modelo a escala 1:1 del WEC DINA-EF y 2 modelos del WEC MICO-1T (uno a escala 1:20 y otro a escala 1:10). La selección de sitios de estudio y las actividades realizadas con cada WEC se describen a continuación.

### IV.2.1.- Selección de sitios de estudio

Como ya se describió anteriormente, México cuenta con más de 11,000 km de costa donde el oleaje puede ser aprovechado y de acuerdo con los resultados de Pérez en 2013 y García en 2014 mostrados con anterioridad se propusieron los sitios para instalar y evaluar los 3 dispositivos WEC bajo condiciones reales en el océano (Figura 17). La selección de sitios de estudio se limitó solo a territorio mexicano por lo tanto, los sitios elegidos fueron los siguientes: modelo a escala 1:20 del WEC MICO-1T evaluado en Puerto Progreso, Yucatán (Figura 18), modelo 1:10 del WEC MICO-1T evaluado en Puerto Morelos, Quintana Roo (Figura 19) y modelo 1:1 del WEC DINA-EF a evaluar en Puerto el Sauzal Baja California (Figura 20).



Figura 17.- Sitios de estudio propuestos para evaluar los WEC's [Adaptado de García 2014]

Algunos criterios para seleccionar los sitios de estudio fueron: 1) Zonas de mayor potencial energético undimotriz, 2) Contar con acceso vehicular, 3) Contar con vigilancia, 4) disponer de datos batimétricos, 5) Tener acceso a luz eléctrica e internet y 6) Disponer de permisos legales.



Figura 18.- Sitio de pruebas con el modelo 1:20 del WEC MICO-1T en Puerto Progreso, Yucatán



Figura 19.- Sitio de pruebas con el modelo 1:10 del WEC MICO-1T en Puerto Morelos, Quintana Roo



Figura 20.- Sitio propuesto para instalar el modelo 1:1 del WEC DINA-EF, Puerto el Sauzal, Ensenada BC

A continuación, en los siguientes párrafos se describen las actividades realizadas en campo con cada modelo.

#### IV.2.2.- Actividades en campo con el modelo 1:20 del WEC MICO-1T

Dando continuidad a los trabajos realizados por García en 2014 donde optimizó a nivel laboratorio este dispositivo, ahora corresponde dar inicio a la segunda etapa que consistió en evaluar el mismo WEC bajo condiciones reales de operación en costas de Puerto Progreso con el objetivo de analizar su estabilidad estructural, desempeño y generación de energía. Las actividades realizadas se describen a continuación en los siguientes puntos:

- **Embarque y envío:** La primera fase consistió en trasladar el prototipo de CU en la Ciudad de México a CINVESTAV Mérida; para lo cual se requirió desarmar completamente el WEC que se encontraba en el Laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM para posteriormente resguardarlo en un contenedor de madera (Figura 21) que lo protegería durante su traslado.



Figura 21.- Resguardo y envío del modelo 1:20 del WEC MICO-1T

- **Inspección de componentes y ensamble:** El prototipo fue recibido en el Laboratorio de Procesos Costeros y Oceanografía Física de CINVESTAV Mérida donde se inspeccionó cada unidad del sistema (principalmente los componentes mecánicos y las boyas, los cuales son elementos claves del WEC), seguido a esto se inició el ensamble y calibración del modelo para finalmente diseñar y construir el sistema electrónico que almacenaría los datos, así mismo se incorporaron los sensores para medición de oleaje, voltaje y RPM (Figura 22).



Figura 22.- Inspección de componentes y ensamble del WEC MICO-1T

El registro de RPM se realizó mediante un encoder óptico de alta resolución, mientras que para registrar la potencia generada se instalaron 2 resistencias de  $5 \Omega$  y un micro controlador con sistema ADC (convertidor analógico digital), el registro de oleaje y presión se realizó con una sonda Nortek y finalmente el datalogger se configuró para registrar datos

con una resolución de 10 Amper (10 lecturas por segundo) con una memoria de almacenamiento de 2 GB. Concluida la construcción e integración del sistema de adquisición de datos en el WEC se realizaron algunas pruebas para asegurar su correcto funcionamiento.

- **Pruebas en campo:** Para evaluar el funcionamiento del modelo bajo condiciones reales de operación el WEC se trasladó armado en su totalidad desde el laboratorio de CINVESTAV Mérida a las costas de Progreso el 1 de diciembre de 2015, por lo cual su instalación solo requirió de 2 minutos para orientarlo y anclarlo al fondo marino (Figura 23), de este modo la recopilación de datos inició a las 11:20 am y se detuvo a las 5 pm del mismo día.



Figura 23.- Pruebas en campo con el modelo 1:20 del WEC MICO-1T

Finalmente, el WEC fue retirado del agua y transportado al laboratorio de CINVESTAV Mérida para descargar los datos e iniciar su análisis.

#### IV.2.3.- Actividades en campo con el modelo 1:10 del WEC MICO-1T

Una vez concluidas las actividades en laboratorio con el modelo 1:10 del MICO-1T se iniciaron los preparativos y planeación para su instalación en campo siguiendo la siguiente dinámica de actividades.

- **Elección del sitio de Instalación:** Para seleccionar el sitio de instalación del WEC se consideraron 3 aspectos fundamentales en virtud del resguardo y seguridad del dispositivo, siendo estos los siguientes:
  - Disponibilidad de datos batimétricos y de oleaje del sitio de instalación.
  - Seguridad y vigilancia para resguardar el WEC.
  - Acceso a servicios de luz eléctrica e internet.

Por lo tanto, el sitio seleccionado para instalar el WEC MICO-1T fue la costa de Puerto Morelos en Quintana Roo México, donde se encuentra la Unidad Académica Puerto Morelos de la UNAM (Figura 24), la cual cuenta con infraestructura y material necesario para instalar el WEC. Sin embargo, la principal desventaja de esta zona es que el mar tiene una barrera de arrecifes que genera un comportamiento lagunar lo que propicia oleaje poco energético en la costa.



- **Embarque y envío del prototipo a campo:** Las pruebas de laboratorio realizadas al MICO-1T fueron concluidas el día 20 de enero del 2016, por lo que al siguiente día se inició la limpieza estructural, inventariado de componentes y desensamble del prototipo cerciorándose de embalar todos los elementos del WEC (Figura 25). De esta manera el prototipo salió de las instalaciones del Instituto de Ingeniería en la Ciudad de México la mañana del 25 de enero del 2016 planeando su llegada a las instalaciones de la Unidad Académica de Puerto Morelos el día martes 26 a las 6 pm, sin embargo debido a que el camión que transportaba el prototipo se quedó sin combustible a 1 hora de llegar a Puerto Morelos se tuvo un retraso de 5 horas.



Figura 25.- Desensamble y transporte del prototipo a campo

- **Ensamble e instrumentación in Situ:** Una vez que arribo el camión al ICMYL se procedió a descargar el WEC sobre el muelle de la UNAM dando inicio al ensamble a las 8 am del día 27 de enero, su construcción inició con la estructura metálica, seguida del sistema de captación y sistema de conversión de energía (Figura 26), finalmente se incorporó el sistema electrónico para adquisición de datos, así como los sensores de presión y de temperatura.



Figura 26.- Ensamble del modelo 1:10 del WEC MICO-1T in situ

- **Pruebas de izaje, comunicación y adquisición de datos:** Concluido el ensamble e instrumentación del WEC se iniciaron las pruebas de conectividad, visualización, almacenamiento y transmisión de datos para corroborar su correcto funcionamiento antes de ser introducido al mar. Por otra parte, las pruebas de izaje se realizaron para asegurar que la estructura del WEC soportaría el proceso de transferencia al agua, la cual consistió en alzar el prototipo desde su base con la grúa de banco del muelle durante 5 minutos (Figura 27), sujetándolo del centro y de cada extremo mediante eslingas remolcadoras.



Figura 27.- Pruebas de comunicación, descarga de datos e izaje del prototipo

- **Pruebas de flotabilidad y anclaje:** Utilizando diversos contenedores herméticos se buscó dar flotabilidad y estabilidad al WEC en el agua, sin embargo debido a que el diseño del prototipo no cuenta con punto de equilibrio así como tampoco de un mecanismo que permita sujetarse para ser alzado durante su instalación, su estabilidad para mantenerlo a flote en el agua fue complicada.

Después de una serie de pruebas y por las limitaciones de equipo y material se decidió cambiar el punto de flotabilidad del WEC; sustituyendo el punto de sujeción inicial (base del prototipo) por la parte media de los postes verticales justo bajo la unión del brazo de boya. De esta forma la parte superior del WEC quedó fuera del agua y la parte inferior permaneció sumergida (Figura 28), dándole mayor estabilidad y permitiéndole flotar libremente sobre el agua.



Figura 28.- Pruebas de flotabilidad del WEC MICO-1T en campo

- **Instalación y Puesta en marcha:** Lograda la flotabilidad del WEC se desenganchó de la grúa que aún lo detenía y se remolcó con una pequeña lancha de motor hacia aguas más profundas, el objetivo era desplazarlo fácilmente hasta el sitio de instalación donde se tenía 1 metro de profundidad la cual fue la profundidad de diseño del prototipo, sin embargo debido a las irregularidades del fondo marino y a las condiciones de flotabilidad, el WEC encallo a 1.5 metros de profundidad al dirigirlo hacia la playa dificultando su instalación a la profundidad de diseño (1 metro de profundidad). Por lo tanto, debido a las dificultades y limitaciones de equipo se decidió dejar en este sitio para evitar dañar la estructura del prototipo prosiguiendo con la orientación de la boya (Figura 29).

Inmediatamente después se retiraron los flotadores para anclar el WEC al fondo marino liberando al mismo tiempo la boya e iniciando la generación de energía eléctrica y el registro de datos. Por lo tanto, El WEC MICO-1T inició operaciones el día 28 de enero de 2016 a las 3:15 pm. Posteriormente se incorporó el panel solar y un faro que indicaba la presencia del prototipo durante la noche, señalizando así la ubicación de la estructura para evitar posibles accidentes con las embarcaciones de la zona.



Figura 29.- Instalación y puesta en marcha del WEC MICO-1T en Puerto Morelos

- **Revisión estructural periódica:** Durante los primeros 6 días de operación el MICO-1T se mantuvo en vigilancia para asegurar su correcto funcionamiento, es así como durante el 3<sup>er</sup> día de operación se observó que debido a la gran cantidad de tornillería en la estructura del WEC y a la constante vibración generada por el oleaje se aflojaron algunos tornillos y opresores de la palanca de boya así como de los postes verticales, por lo que se procedió a hacer una revisión completa de la tornillería de la estructura para evitar nuevamente desajustes.

Sin embargo la vibración constante a la que estaba sometido el WEC ocasionó que en el 5<sup>o</sup> día la tornillería de la jaula de boya se aflojara originando que ésta saliera de su posición y quedara a la deriva en el mar, de acuerdo a registros del sistema de adquisición de datos la boya salió de operación alrededor de las 2 am del martes 02 de febrero, sin embargo fue hasta las 7 de la mañana del mismo día cuando el vigilante de la Unidad Académica y algunos turistas encontraron la boya flotando en la orilla de la playa cerca del muelle de la UNAM (Figura 30). Por lo que una vez recuperada se instaló nuevamente sujetándola con sogas para eliminar la vibración que provocó el desperfecto, finalmente se volvió a inspeccionar la tornillería y se puso en operación nuevamente el sistema.

Transcurridos los primero 6 días de operación del WEC el equipo de trabajo del Instituto de Ingeniería concluyó sus actividades, por lo que la operación del WEC quedó a cargo del grupo de trabajo del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, unidad Puerto Morelos.



Figura 30.- Reinstalación de la boya en la estructura del WEC

#### IV.2.4.- Actividades en campo con el prototipo 1:1 del WEC DINA-EF

Las actividades realizadas con el WEC DINA-EF forman parte de un proyecto que la empresa Mexicana DINA camiones ha venido desarrollando desde hace varios años con el objetivo de generar energía eléctrica mediante las olas del mar en Baja California, por lo tanto solo se apoyó en algunas actividades que no se habían realizado y que se describen más adelante.

Dado que el WEC DINA-EF es un modelo 1:1 de tamaño real, la etapa de construcción e instalación conlleva un proceso más riguroso en comparación con los modelos a escala descritos anteriormente, sobre todo en el ámbito ambiental y legal. Por tal motivo antes de iniciar la instalación del WEC en el sitio de operación ya se deben contar con todos los trámites y permisos pertinentes.

De acuerdo a lo anterior los trabajos de campo realizados con el WEC DINA-EF se centraron en desarrollar el Proyecto Ejecutivo, la simulación numérica del sistema de captación, seguimiento del proceso de construcción y la inspección del sitio de instalación, puesto que la empresa DINA ya llevaba un gran porcentaje de avances en cada rubro del proyecto.

A continuación se describen las principales características del WEC así como las actividades realizadas en esta etapa:

##### Descripción del WEC

El WEC DINA-EF es un sistema de conversión de energía del oleaje de tipo boya flotante, cuya patente pertenece a la empresa Energy Forever, a la que la empresa Mexicana DINA compro la tecnología con miras a explotar el potencial undimotriz existente en las costas de Ensenada, Baja California. Este WEC está conformado por 3 sistemas principales, el primero es el sistema de captación, seguido del sistema de conversión y finalmente el sistema de generación de energía, los cuales se describen a continuación:

**Sistema de captación de energía:** El sistema de captación está compuesto por un brazo de 10 metros de largo (Figura 31-B), su extremo dirigido a la costa se encuentra unido a una base de concreto anclado al fondo marino junto al muelle (Figura 31-A) mientras que en el otro extremo se encuentra acoplada una boya semiesférica (figura 31-C) de 4 metros de diámetro.

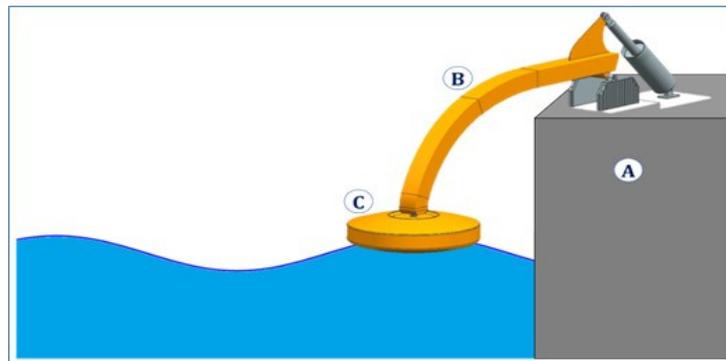


Figura 31.- Vista lateral del sistema de captación de energía del WEC DINA-EF

Cuando el oleaje se desplaza desde aguas profundas hacia la costa pasa por el sistema de captación, en este instante la boya capta la energía de la onda mediante un movimiento vertical de sube y baja al desplazarse del valle a la cresta de ola transformando la energía cinética en energía mecánica, la cual posteriormente es transmitida del brazo al pistón y finalmente al sistema de conversión de energía. De este modo la boya se mantiene en movimiento continuo con cada ola que pasa por el sistema hacia la costa.

**Sistema de conversión y generación:** El sistema de conversión de energía (Figura 32) está conformado por un pistón hidráulico ubicado en la parte superior del brazo de palanca junto al muelle, en este punto el pistón está conectado a un conducto de aceite y este a una turbina. El pistón es accionado por el movimiento de sube y baja del brazo haciendo fluir una corriente de aceite que acciona la turbina. De este modo la turbina es acelerada con cada ola que llega al sistema de captación manteniendo una generación de energía continua.

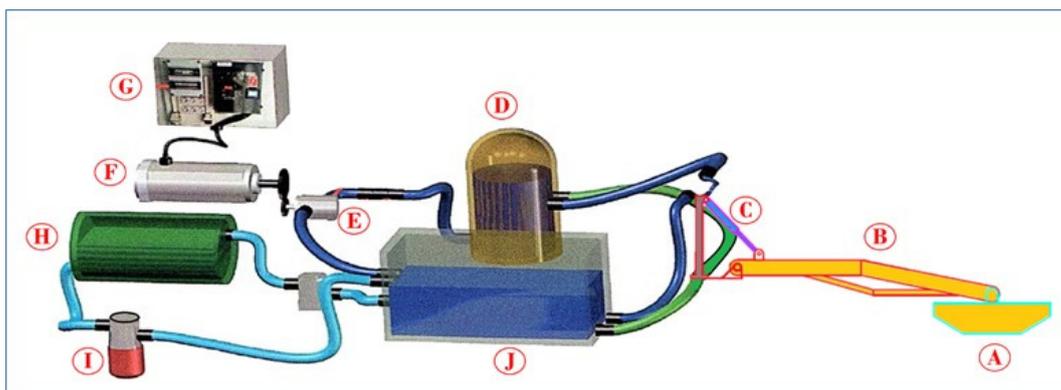


Figura 32.- Componentes principales del sistema conversión-generación de energía del WEC DINA-EF

A) Boya, B) Brazo de boya, C) Pistón, D) Acumulador, E) Motor hidráulico, F) Generador eléctrico, G) Panel de monitoreo, H) Tanque hidráulico, I) Filtro, J) Colector de aceite.

## Lineamientos y Normatividad

En México como en muchos países del mundo existen organizaciones gubernamentales encargadas de vigilar, regular y hacer cumplir las Leyes vigentes nacionales para el uso de suelo terrestre y marítimo, por lo tanto es indispensable cubrir todo el aspecto legal (Normas y Reglamentos) a fin de agilizar y garantizar la obtención de permisos para desarrollar proyectos de aprovechamiento de energías del océano. La mayor parte de estos permisos están orientados a la construcción, colocación, implementación y generación de energía undimotriz limpia y de calidad.

De este modo los organismos regulatorios Mexicanos se resumen en el diagrama de la figura 33, donde cada gestión requiere desarrollar distintos documentos de apoyo que facilitaran el trámite de los permisos, es así como se realizó un manual de procedimientos que incluye: diagramas de proceso, proyecto ejecutivo, listas de requisitos y documentación.

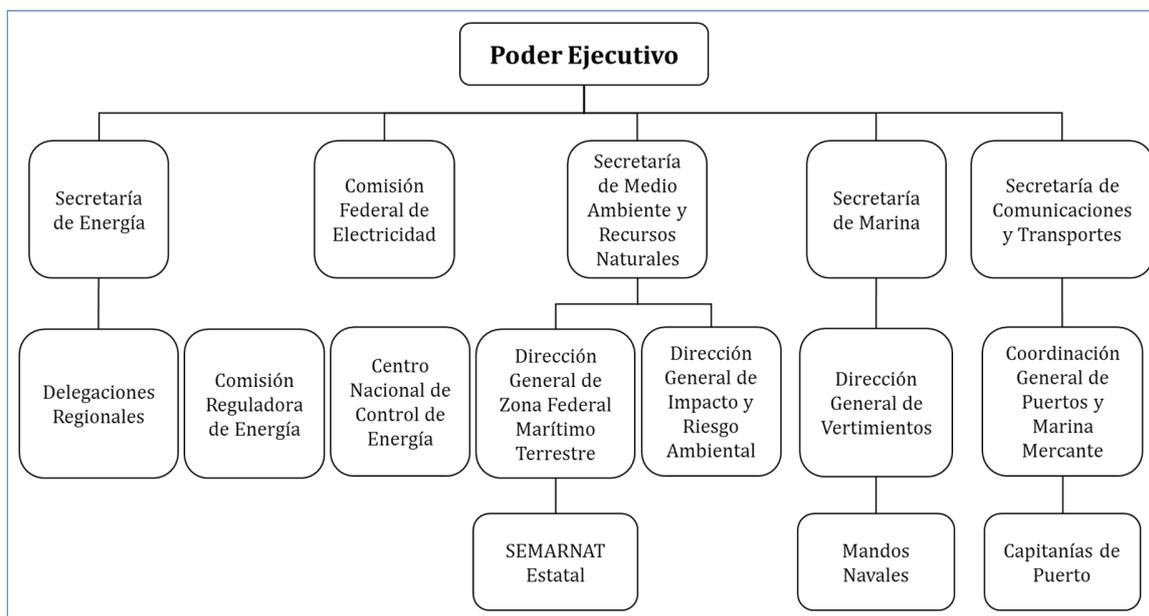


Figura 33.- Autoridades Federales que otorgan permisos para aprovechar la energía marina en México

Las solicitudes, permisos y trámites necesarios ante cada organización gubernamental que se deben cumplir son las siguientes:

- SENER: Evaluación de impacto social.
- CFE: Contrato de interconexión a la red.
- SEMARNAT: Concesión de ZOFEMAT, Permiso para construcción de obras y Evaluación de impacto ambiental.
- CRE: Permiso para generar energía eléctrica y Certificado de energía limpia.
- SEMAR: Permiso de vertimiento.
- SCT: Autorización de señales marítimas a concesionarios y particulares.
- CENACE: Registro de participación en el mercado y solicitud de interconexión a la red eléctrica nacional.

## Proyecto Ejecutivo

Como parte de los estudios generados para la implementación del WEC DINA-EF se propuso y desarrolló en colaboración con el área técnica de DINA el proyecto ejecutivo, el cual incluye estudios preliminares de factibilidad, proyecto arquitectónico, estructural, obra civil e instalaciones, entre otros. Por lo tanto el contenido del documento propuesto quedó integrado de la siguiente manera:

- Descripción general del proyecto.
- Descripción general del sitio de estudio.
- Infraestructura actual del puerto.
- Caracterización del puerto.
- Memorias de cálculo.
- Modelación numérica.
- Planos del dispositivo.
- Planos de construcción.
- Planos estructurales a detalle de obra civil.
- Planos generales de obra mecánica.
- Comentarios.

## Avances en la construcción del WEC

Como ya se describió anteriormente el WEC DINA-EF está proyectado para instalarse en Ensenada, Baja California, por tal motivo su construcción y ensamble se realizó en un taller cerca del muelle el Sauzal donde durante el recorrido se observó que el desarrollo del sistema de captación lleva un 90 % de avance (figura 34) mientras que los avances con el sistema de conversión y generación de energía han alcanzado el 100 % en su construcción (Figura 35).

Previo a la construcción del sistema de captación a tamaño real primero se montó un sistema a escala 1:2 para probar el funcionamiento del sistema de generación, de éste modo se construyó una boya de 2 metros de diámetro con un brazo de 4 metros de longitud dentro de un contenedor de tráiler con agua, donde con una pala de movimiento horizontal se generó oleaje para simular la operación del sistema completo (figura 34-A), mientras que la construcción del sistema de captación a tamaño real aún se encuentra en desarrollo (figura 34-B).



Figura 34.- Sistema de captación de energía del WEC DINA-EF

Durante el recorrido por Ensenada se observó que los avances logrados por la empresa DINA camiones en el proyecto de energía undimotriz han sido muy alentadores, pues el sistema de conversión y generación de energía ensamblados por la empresa CARCO han sido concluidos al 100 % por lo cual se encuentran resguardados en un contenedor de tráiler para su fácil traslado e instalación en sitio (Figura 35).



Figura 35.- Sistema de conversión y generación de energía del WEC DINA-EF

## Inspección del sitio de instalación

Se realizó un recorrido de reconocimiento por el muelle el Sauzal en Ensenada B.C. para ubicar el posible sitio de instalación del WEC (Figura 36), donde junto con el personal de CFE, DINA, UNAM y los encargados de la construcción de obra civil se identificaron las condiciones de acceso, área para maniobras durante la construcción, facilidad de conexión a la red eléctrica y condiciones del uso de suelo.



Figura 36.- Recorrido por el muelle el Sauzal para ubicar el sitio de instalación del WEC

Por otro lado el permiso solicitado para la construcción e instalación del WEC está pensado en dos fases: una de prueba y otra de producción e interconexión a la red.

La primera fase de prueba contempla la obra civil para dar acceso peatonal, maquinaria y equipo de montaje (relleno de espacios intersticiales con grava para nivelación de corona y taludes de escollera), cimentación tipo cajón con relleno para anclaje de dispositivo WEC. Así mismo durante el recorrido se acordó que no se puede hacer remoción de piezas (rocas) existentes en la escollera, por lo que una opción viable es optar por sistema de pilotaje frente al muelle para la cimentación. Por otro lado la instalación del brazo del WEC se prevé construir a corta distancia de la escollera con la finalidad de facilitar la instalación, monitoreo y mantenimiento del sistema.

El área de la escollera que puede ser utilizada es de aproximadamente 25 metros, por lo que la zona marina frente a la escollera será el sitio de instalación del sistema de captación del WEC, mientras que el área protegida ubicada detrás de la escollera y sobre el muelle será empleada para colocar el sistema de conversión y generación de energía.

Posteriormente en una segunda etapa se contempla extender el muelle mar adentro para aumentar el número de boyas en operación así como la producción de energía eléctrica y finalmente interconectarse a la red eléctrica.

## Modelación Numérica

Esta etapa se realizó en 2 partes; la primera abarca la simulación mecánica a cargo de DINA y la segunda la simulación hidráulica a cargo de la UNAM.

La simulación mecánica fue efectuada por personal del área de Ingeniería de DINA-Guadalajara y por personal de Inteligencia Mecánica, quienes mediante simulación CSD (Computational Solid Dynamics) y CAD-CSD (Computer Aided Design) detectaron y corrigieron fallas operacionales del sistema original de la empresa Energy Forever, dando como resultado una serie de modificaciones al brazo con boya en busca de incrementar la operación y eficiencia del sistema.

Por otra parte la modelación numérica de hidrodinámica costera se realizó en el Instituto de Ingeniería de la UNAM mediante el programa OpenFOAM con el cual se evaluó la interacción entre oleaje, boya y escollera. Los datos de diseño utilizados para alimentar el programa fueron: oleaje tipo Stokes de 2° orden, flujo bifásico, altura de oleaje, periodo de ola, profundidad, archivo STL de la boya, centro de gravedad, inercias, masa de la boya, anclajes, amortiguamiento del pistón, así como el perfil de escollera y tamaño de enrocamiento.

---

## Capítulo V:

# Resultados y Análisis

---

A continuación en los siguientes puntos se presenta el análisis de resultados obtenido con cada actividad de laboratorio y de campo realizado durante el proyecto doctoral.

## V.1.- Resultados de las actividades en laboratorio

### V.1.1.- Resultados de laboratorio con el modelo 1:17 del WEC UFCAP

**Resultados de la primera etapa:** Durante la primera etapa de pruebas se logró dar estabilidad a las cámaras OWC dentro del canal de oleaje y mediante distintos ensayos se obtuvieron los primeros resultados de velocidad de viento a diferentes condiciones de oleaje.

Con los ensayos iniciales se evaluó la velocidad del aire con 1 y 2 cámaras OWC a diferentes profundidades, seguido de pruebas con tapa reforzada y concluyendo con pruebas comparativas entre 3 cámaras diferentes. Por lo tanto a continuación en la tabla 8 se muestran los resultados de 160 ensayos obtenidos al comparar el flujo de aire generado con la cámara sumergida 0.15 y 0.25 metros.

Tabla 8.- Velocidades de viento alcanzadas con 1 cámara OWC sumergida 30 y 50 %.

Profundidad de cámara	Tipo de oleaje	Velocidad del aire (m/s)		
		Promedio	Moda	Máxima
0.25 metros = 50 %	Regular	4.5	4.9	7.3
	Irregular	4.1	4.7	7.1
0.15 metros = 30 %	Regular	4.6	3.5	6.7
	Irregular	3.9	4.1	5.9

Los resultados mostraron que la profundidad de operación óptima para la cámara OWC es cuando está sumergida 0.25 metros, esto significa que la relación aire-agua dentro de la cámara debe ser del 50 % (Figura 37) ya que bajo estas condiciones el agua logra desplazarse con mayor facilidad dentro de la cámara antes de que llegue la siguiente onda, por lo tanto al tener el máximo desplazamiento del agua también se obtiene la máxima presión atmosférica en la cámara OWC con lo que se genera un mayor flujo de aire hacia la turbina.

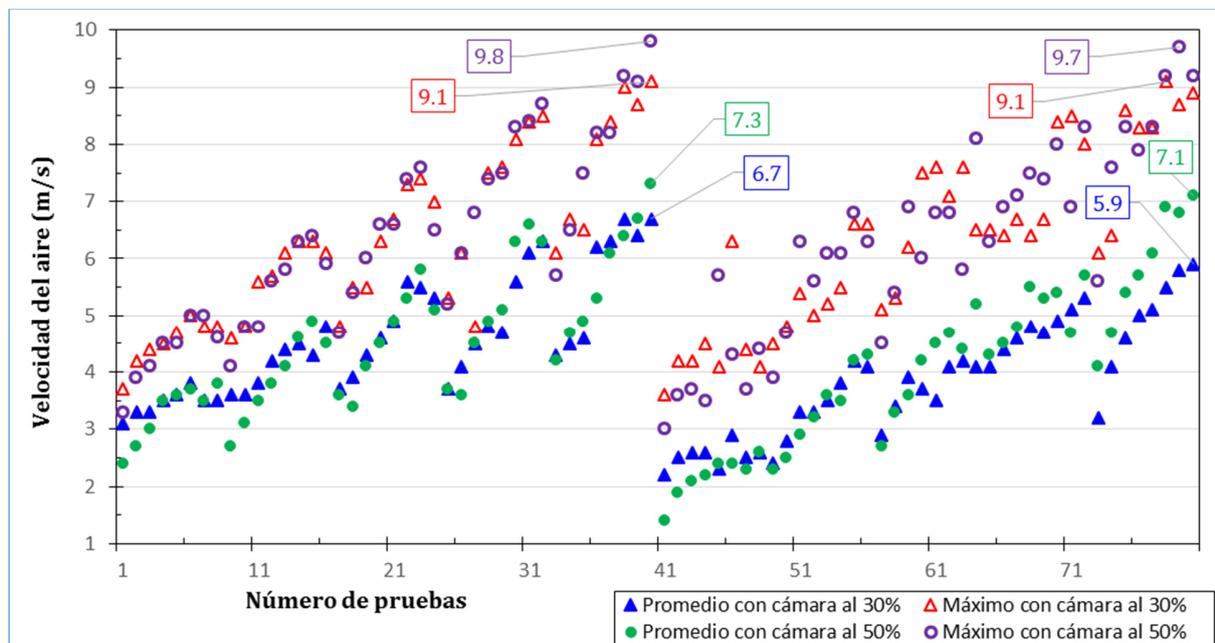


Figura 37.- Velocidad del aire alcanzado con la cámara OWC al 30% y 50% de sumergencia

Durante las primeras pruebas se observó que la tapa de la cámara OWC sufría una deformación; cuando la cresta de ola pasaba por el WEC había un abombamiento hacia afuera en la tapa, en cambio cuando pasaba el valle de la ola la tapadera se abombaba hacia adentro. Por lo tanto se vio la necesidad de hacer pruebas para evaluar el grado de afectación por la deformación de la tapa durante el paso del oleaje, para lo cual se compararon 2 cámaras OWC: una con tapadera reforzada y otra sin refuerzo (cámara normal), los resultados obtenidos en los 80 ensayos realizados se muestran resumidos en la tabla 9 y figura 38.

Tabla 9.- Velocidades de viento alcanzadas con 1 cámara OWC al variar la tapa.

Velocidad	Cámara reforzada [m/s]	Cámara normal [m/s]	Diferencia en porcentaje [%]
Promedio	5.60	5.40	3.7
Mediana	5.45	5.10	6.8
Moda	4.10	4.30	-4.6
Máxima	14.7	14.0	5.0

Los resultados del análisis estadístico muestran que el abombamiento de la tapa amortigua un pequeño porcentaje (3.7 %) del aire comprimido, ya que tras su refuerzo la velocidad del viento se incrementó 0.2 m/s, esta pequeña variación corresponde a la pérdida de presión que se tenía por la deformación de la tapa. Sin embargo aunque la diferencia en la velocidad del aire es mínima la solución a este problema es aumentar un 30 % el grosor de la tapa.

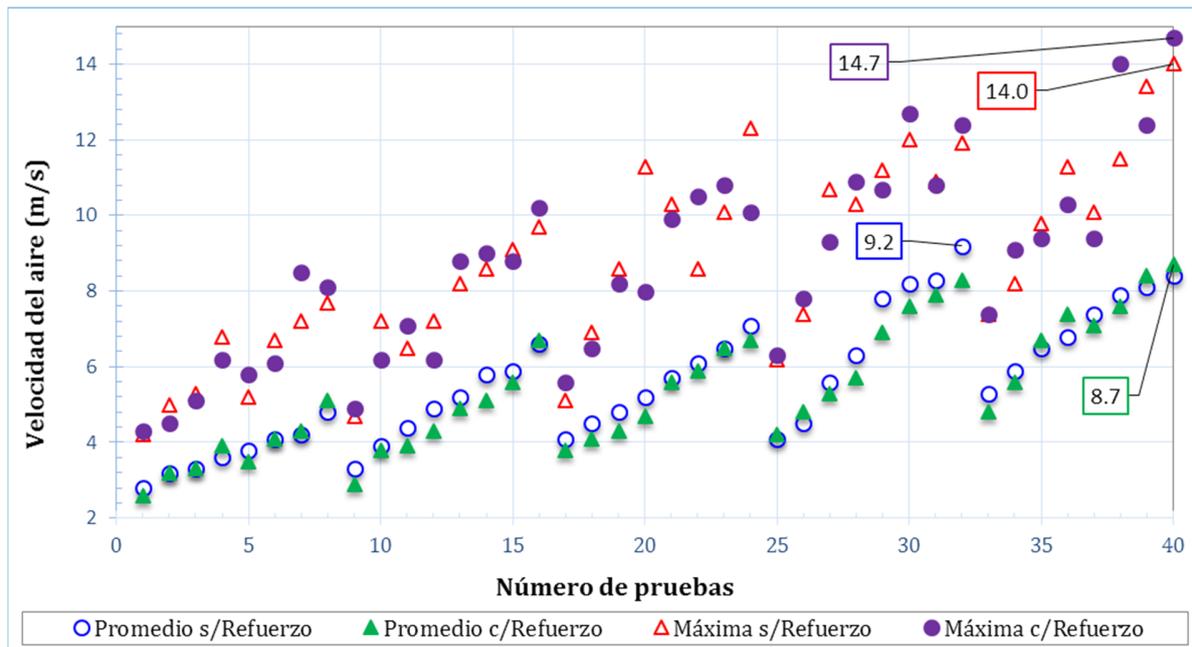


Figura 38.- Flujo máximo de aire obtenido con la cámara OWC de tapa reforzada y tapa normal

En la Tabla 10 y Figura 39-A se muestran los resultados de las pruebas comparativas entre las 3 variantes de la cámara OWC (cámara normal, cámara con aletas y cámara de diámetro reducido) los cuales demostraron que la máxima velocidad del aire se alcanzó con la cámara de aletas, la cual simula una pared vertical que obliga al agua a pasar por debajo de la cámara produciendo una corriente de agua y aumentando el flujo, lo que a su vez incrementa la columna de agua entro de la cámara OWC generando un aumento en la presión y velocidad del aire interno. En cambio cuando no tiene pared vertical el agua busca la menor resistencia al flujo y pasa por los costados de la cámara, por el contrario la cámara con diámetro reducido generó el flujo de aire más bajo debido a que el excesivo grosor de la pared de la cámara actuó como una barrea que redujo la

fuerza del oleaje, sin embargo habrá que comparar los flujos en función del área interna de cada cámara.

Finamente con los resultados obtenidos durante la comparación de las 3 cámaras OWC y aplicando la ecuación 16 se estimó el potencial eólico que se puede generar con el flujo de aire alcanzado durante los ensayos, los resultados de la potencia eólica disponible en W se presentan en la gráfica de la figura 39-B. Donde se observa que teóricamente la potencia máxima alcanzada es de 0.013 W obtenida con la cámara de aletas.

$$P_a(W) = \frac{1}{2} \pi \rho_{aire} R_{cond}^2 Vel^3 \dots\dots\dots (16)$$

Tabla 10.- Velocidad del viento y potencia de las 3 cámaras OWC del WEC UFCAP 1:17.

Descripción			Velocidad de Salida	Potencia eólica [W]
Cámara Normal	O Irregular	CNI1	0.66	0.001356858
		CNI2	0.66	0.001377626
		CNI3	0.69	0.001539758
		CNI4	0.87	0.003097181
	O Regular	CNR1	0.94	0.003934891
		CNR2	1.01	0.004839173
		CNR3	1.16	0.007321016
		CNR4	1.18	0.007815823
Cámara con Aletas	O Irregular	CAI1	0.71	0.001716733
		CAI2	0.70	0.001635776
		CAI3	0.86	0.003025788
		CAI4	0.82	0.002624755
	O Regular	CAR1	1.01	0.004855179
		CAR2	1.07	0.005731152
		CAR3	1.20	0.008064096
		CAR4	1.40	0.012993872
Cámara con Diámetro Reducido	O Irregular	CDRI1	0.66	0.001376293
		CDRI2	0.55	0.00076634
		CDRI3	0.56	0.000827571
		CDRI4	0.67	0.001398686
	O Regular	CDRR1	0.87	0.003095393
		CDRR2	0.83	0.002721626
		CDRR3	1.07	0.005805311
		CDRR4	0.98	0.004371498

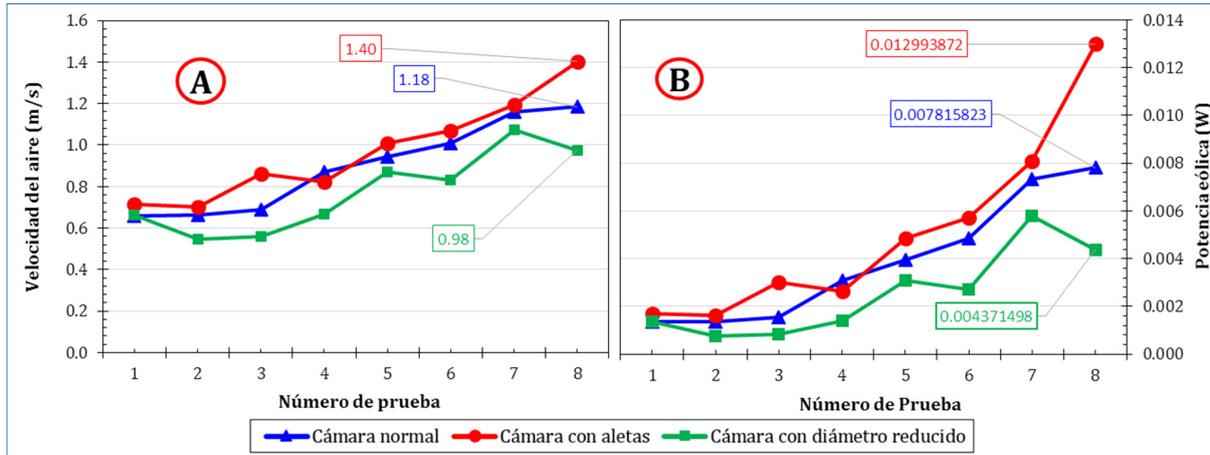


Figura 39.- Flujo y potencia del aire obtenida con 3 cámaras OWC diferentes

**Resultados de la segunda etapa:** Durante ésta etapa se obtuvo el análisis del oleaje que se desplaza hacia la playa y pasa por la estructura del WEC: esto se logró mediante el análisis de reflexión, disipación y transmisión de la energía del oleaje expresado como la variación de la onda en cm. Los resultados obtenidos al comparar las 3 cámaras OWC se muestran en las siguientes gráficas; la figura 40 muestra la eficiencia de reflexión, mientras que la figura 41 muestra la eficiencia de disipación y la figura 42 la eficiencia de transmisión.

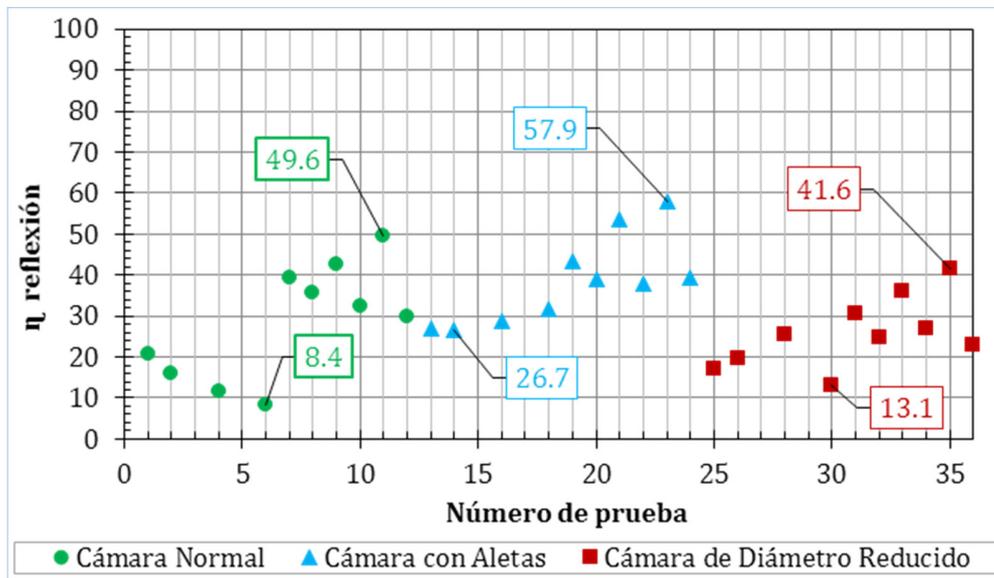


Figura 40.- Eficiencia de reflexión con la cámara OWC-UFCAP a escala 1:17

La gráfica de la figura 40 muestra que la mayoría de las pruebas tuvieron una eficiencia de reflexión entre 15 y 45 %; donde para el caso de la cámara normal osciló entre 8.4 y 49.6 %, mientras que la cámara con aletas osciló entre 26.7 y 57.9 % y la cámara con diámetro reducido osciló entre 13.1 y 41.6 %.

Sin embargo, cabe señalar que en las 3 cámaras evaluadas se presentaron 2 ensayos donde el coeficiente de reflexión superó el 100 % (120 a 160 %). El primer caso se presentó durante el ensayo con oleaje regular, altura de ola de 0.075 metros y periodo de 2.4 segundos, mientras que el segundo caso se presentó con oleaje regular, altura de ola de 0.100 m y periodo de 2.4 segundos. Como ambos casos se repitieron exactamente en las mismas condiciones hidrodinámicas de las 3 cámaras, esto nos indica que la alteración se debió a la resonancia provocada por el paso de la onda entre el WEC y el canal de olas.

Lo anterior es debido a que el limitado espacio entre la pared de la cámara OWC y el canal no permite el adecuado paso de la onda así como tampoco su disipación, lo cual provoca una perturbación del oleaje que distorsiona la trayectoria, forma y tamaño. Es así como la suma de estas ondas generadas caóticamente son registradas y percibidas más fácilmente cuando el sistema opera con alturas de ola superiores a 0.075 m y periodos menores a 2.4 segundos

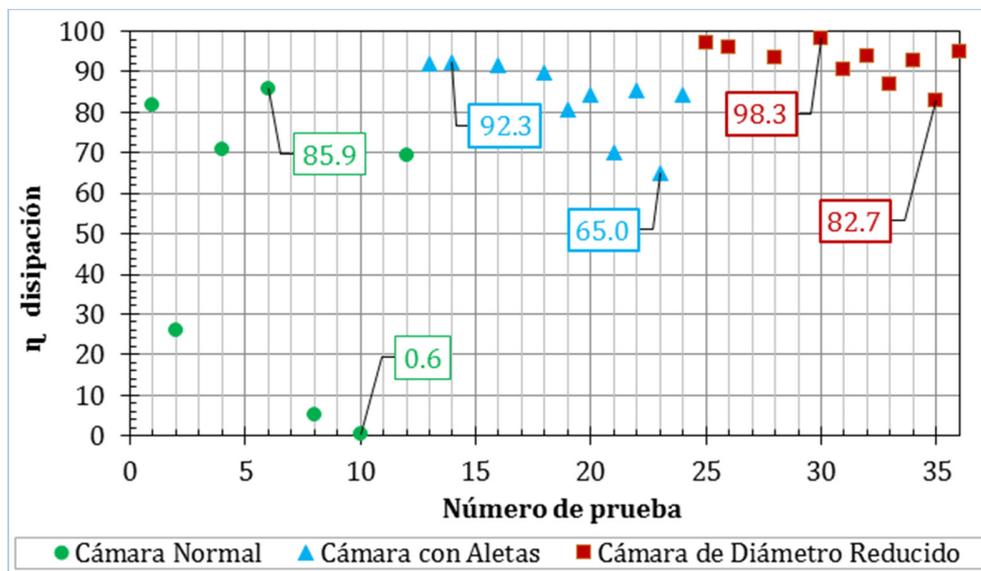


Figura 41.- Eficiencia de disipación con la cámara OWC-UFCAP a escala 1:17

En la figura 41 se puede observar que la mayor parte de las pruebas con la cámara normal presentaron eficiencias de disipación entre 70 y 90 %, mientras que con la cámara de aletas osciló entre 75 y 95 %, en cambio con la cámara de diámetro reducido fue entre 80 y 100 %. Estos resultados muestran que la mayor parte de las pruebas alcanzan eficiencias cercanas al 100 % lo cual al hacer un análisis bibliográfico permite establecer que es imposible obtener estos resultados en condiciones reales, no solo por el tipo de estructura sino también por el tipo de WEC.

Por lo tanto, los resultados obtenidos hasta ahora nos permiten deducir que la onda sufre una alteración debido al gran tamaño del WEC para el canal de oleaje, ya que teóricamente para este tipo de estructuras lo común es obtener eficiencias de disipación ente el 15 y 20 %. Por lo que esto refuerza la hipótesis de cambiar la escala del WEC para poder evaluarlo correctamente en el canal de oleaje del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Finalmente en la gráfica de la figura 42 se puede apreciar que la mayoría de las pruebas tuvieron una eficiencia de transmisión entre 3 y 15 %; sin embargo se observa que la cámara normal osciló entre 36 y 97 %, mientras que la cámara con aletas osciló entre 3 y 13 % y la cámara con diámetro reducido osciló entre 3 y 14 %.

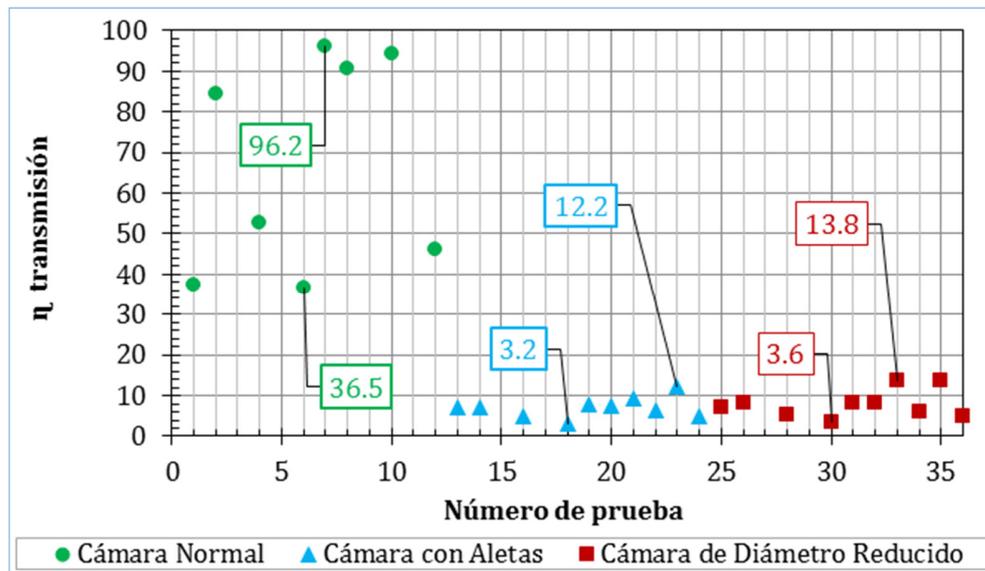


Figura 42.- Eficiencia de transmisión con la cámara OWC a escala 1:17

Como era de esperarse las eficiencias de transmisión obtenidas con la cámara de aletas no supero el 13 % debido a la barrera (aletas) que impidió el paso de la onda hacia la playa, sin embargo la cámara con diámetro reducido fue la más afectada al sumar el gran grosor de su pared interna y el reducido espacio entre la pared del canal y la cámara.

No obstante, cabe resaltar que en estos resultados al igual que en las gráficas anteriores se presentaron dos ensayos con cada cámara donde el coeficiente de transmisión superó el 100 % (mismos que no se visualizan en la gráfica). El origen de estos porcentajes tan elevados fue originado por la resonancia producida por el paso de la onda en el limitado espacio entre la cámara OWC y la pared del canal de oleaje, suceso ya descrito en párrafos anteriores.

### V.1.2.- Resultados de laboratorio con el modelo 1:32 del WEC UFCAP

Durante la primera etapa de actividades con este modelo se logró cambiar el tamaño del WEC pasando de una escala 1:17 a una escala 1:32, posteriormente inició su construcción con materiales comerciales como acrílico, PVC y aluminio para finalmente continuar con las pruebas para seleccionar el sistema conversión-generación de energía.

Los resultados obtenidos de la selección del sistema mostraron que la combinación más eficiente entre las 2 turbinas y los 4 generadores evaluados fueron el generador G3 y la turbina T1, por lo tanto, la combinación turbina-generador más apropiada para el modelo 1:32 UFCAP es la T1-G3 (figura 43-A) con la cual es posible obtener mayor producción de energía.

Una vez obtenido el arreglo turbina-generador se ensambló con el sistema de captación para posteriormente realizar las primeras pruebas preliminares con el WEC completo (captación-conversión-generación) en el canal de oleaje. La evaluación contemplo la revisión del funcionamiento, medición de voltaje y velocidad del viento generado (figura 43-B), revisando al mismo tiempo fugas de aire en uniones y acoplamientos.

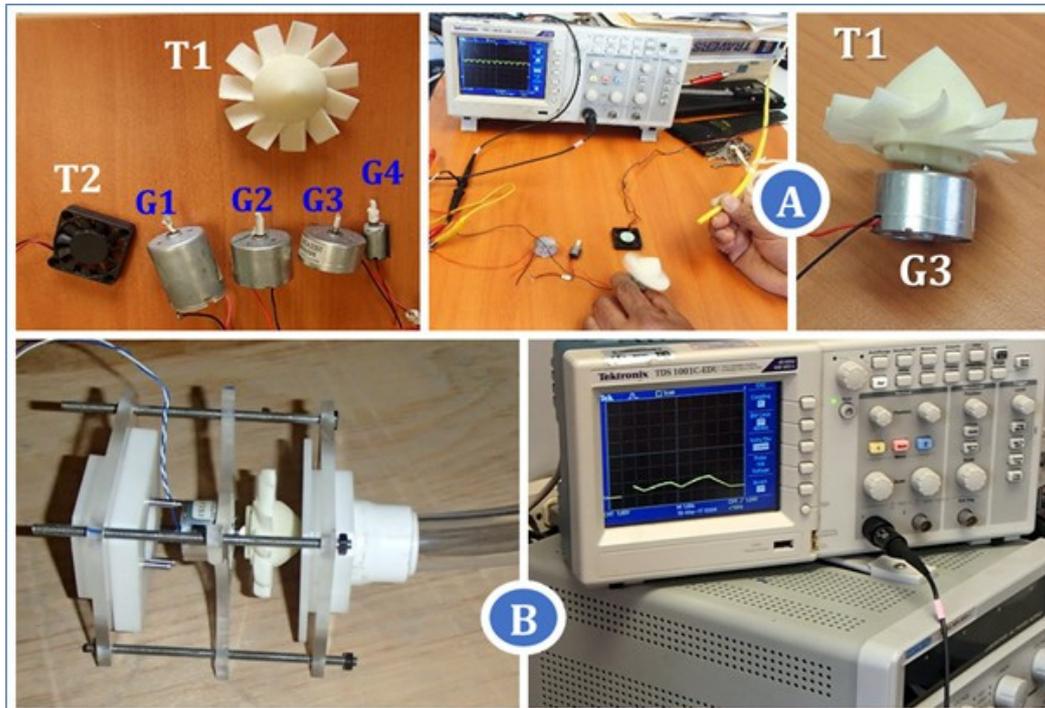


Figura 43.- Pruebas realizadas con el modelo 1:32 del WEC UFCAP

Las primeras pruebas preliminares realizadas con el WEC completo se enfocaron en evaluar la estabilidad estructural y el acondicionamiento del sistema de generación, por lo cual no fue posible obtener una base de datos completa.

Por lo tanto estas pruebas sirvieron para conocer el funcionamiento del WEC, así como para identificar las adecuaciones necesarias que mejoraran su operación. De este modo se percibió la necesidad de modificar el diseño de la carcasa del sistema de generación ya que la distancia entre la turbina y la salida del conducto de aire no es la adecuada, lo cual provoca turbulencia del aire en esta zona, así mismo se identificó que con oleaje menor a 0.09 m el aire producido no lograra romper el reposo de la turbina, incluso cuando se tenía máxima altura de ola (0.11 m) la turbina solo se mantenía en marcha cuando la cámara OWC recibía el máximo flujo de aire.

Por lo tanto los resultados indican que es necesario modificar el acoplamiento entre la turbina y el conducto de aire, principalmente la distancia entre ambos componentes, así mismo se requiere adecuar internamente la unión del conducto para eliminar la turbulencia de aire y de ser posible reducir la escala de la turbina.

### V.1.3.- Resultados de laboratorio con el modelo 1:10 del WEC MICO-1T

Durante la primera etapa se logró escalar y construir en laboratorio el modelo 1:10 del WEC MICO-1T (Figura 44-A) bajo las siguientes condiciones de operación: 1 metro de profundidad, altura de ola superior a 0.4 metros, periodos menores a 6 segundos y marea mínima de 0.25 metros. Como el WEC se diseñó para operar bajo condiciones reales fue necesario aislar los componentes eléctricos y electrónicos para protegerlos de las condiciones atmosféricas asegurando su correcto funcionamiento y prolongar así su tiempo de vida útil, por lo tanto, todos los componentes quedaron integrados en 3 cámaras selladas (chasis) los cuales se incorporaron al WEC.

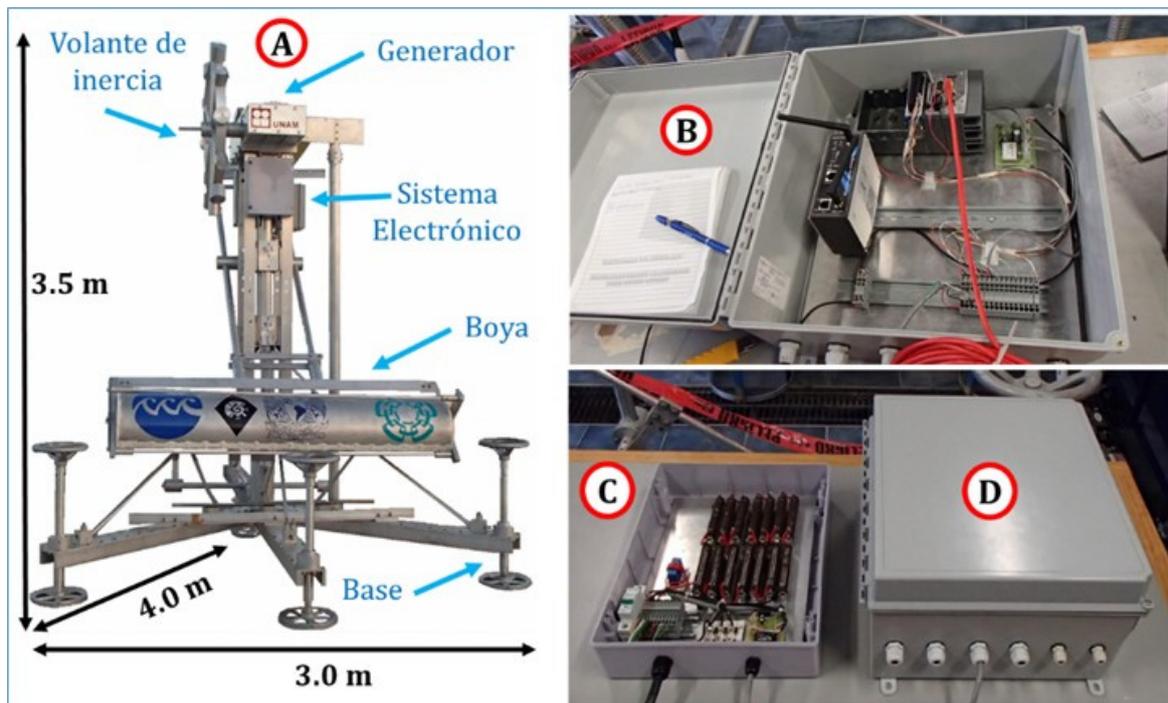


Figura 44.- Chasis de los componentes electrónicos del modelo 1:10 del WEC MICO-1T

En la figura 44-B se observa el chasis donde se encuentra resguardado el sistema de almacenamiento, comunicación y adquisición de datos, mientras que en la figura 43-C se observa el chasis donde se encuentran los sensores de voltaje, corriente y el banco de resistencias que consumió la energía generada por el WEC, finalmente la figura 44-D muestra el chasis donde se colocó el banco de baterías que alimentó a todos los componentes eléctricos.

En cambio, durante la segunda etapa de pruebas en laboratorio con el MICO-1T se puso en funcionamiento el WEC para examinar su estabilidad estructural y operación, así como para verificar el correcto funcionamiento del sistema de adquisición de datos y la fidelidad en los registros (Figura 45).



Figura 45.- Pruebas de operación con el modelo 1:10 del WEC MICO-1T

A continuación, en la figura 46 se muestran los registros de potencia obtenidos durante las pruebas en laboratorio con el modelo 1:10 del MICO-1T, donde la simulación del oleaje se realizó mediante un sistema de poleas construido para mover el brazo de boya. En estos resultados se puede observar un rango de 1,000 mediciones realizadas en las cuales el dispositivo logró generar un máximo de 82 W/m y un mínimo de 26 W/m con una potencia promedio de 60 W/m.

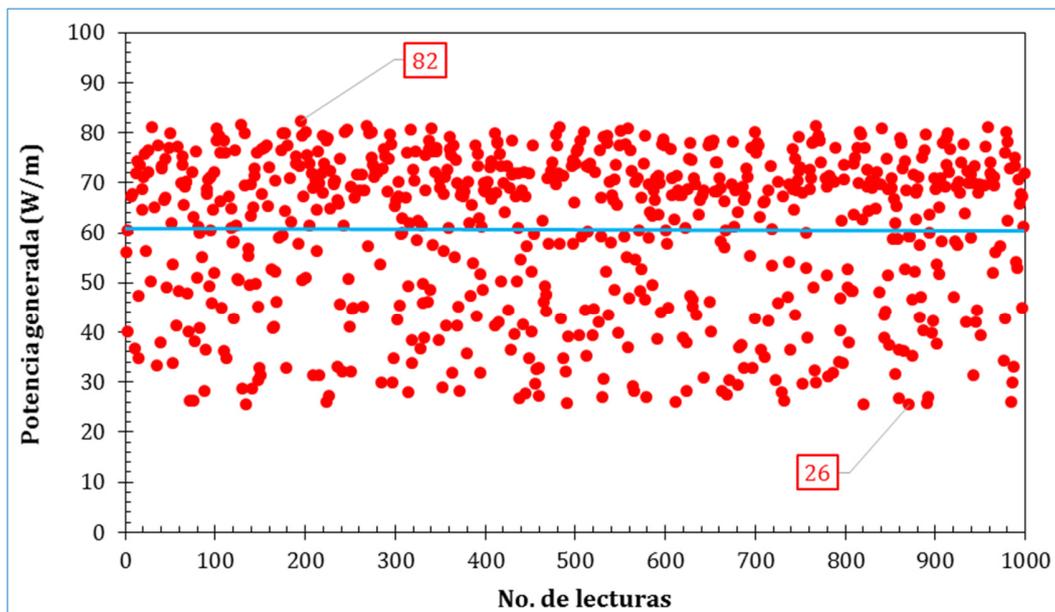


Figura 46.- Potencia generada con el modelo 1:10 del WEC MICO-1T en las pruebas de laboratorio

Conocida la potencia de generación real del WEC (60 W/m) y la potencia teórica calculada con la ecuación 2 (150 W/m) se calculó la eficiencia de generación del sistema, por lo tanto, los primeros resultados de laboratorio obtenidos por el sistema de adquisición de datos indican que el modelo a escala 1:10 del MICO-1T alcanzó una eficiencia del 40 %, lo cual permite especular en grandes posibilidades de obtener buenos resultados en campo.

Una vez concluidas las pruebas de operación y estabilidad del WEC en laboratorio, y habiendo analizado el funcionamiento del sistema de adquisición de datos, la siguiente etapa fue iniciar la planeación para su instalación en campo bajo condiciones reales de operación.

#### V.1.4.- Resultados de laboratorio con el modelo 1:20 del WEC MICO-2T

Los resultados de las pruebas de optimización del WEC MICO-2T permitieron obtener las condiciones mecánicas óptimas entre boya y longitud del brazo de palanca, mientras que las condiciones hidrodinámicas permitieron conocer la altura y periodo de ola con las cuales el sistema genera mayor energía.

En la figura 47 se muestran las RPM alcanzadas por el eje de tracción del generador durante las pruebas en laboratorio donde: OI-h05 son las pruebas con oleaje irregular a 0.5 metros de profundidad, OR-h05 son las pruebas con oleaje regular a una profundidad de 0.5 metros, OI-h045 son las pruebas con oleaje irregular a 0.4 metros de profundidad, y OR-h04 son las pruebas con oleaje regular a una profundidad de 0.4 metros.

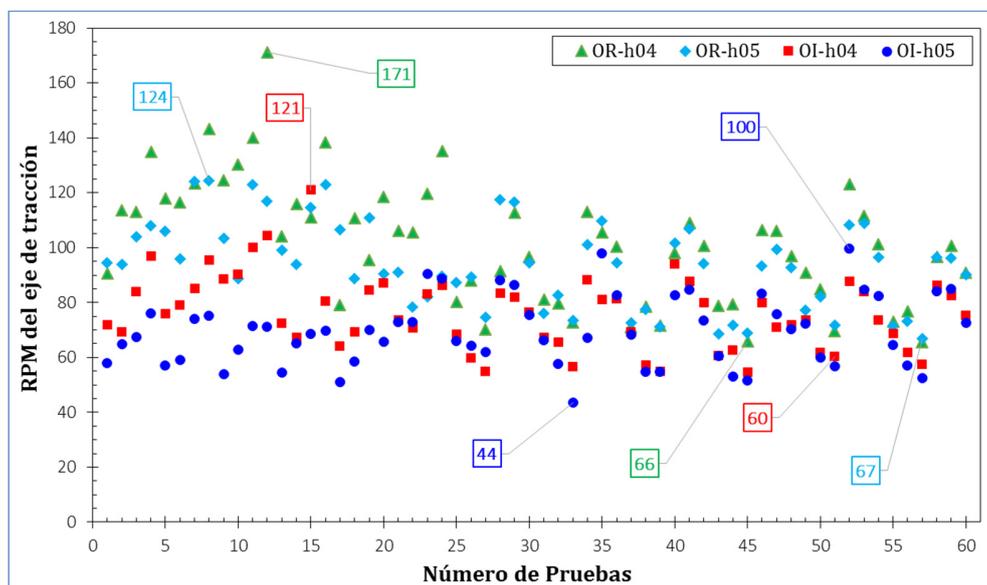


Figura 47.- RPM alcanzadas durante las pruebas con el modelo 1:10 del WEC MICO-2T

Los resultados muestran que a una profundidad de 0.4 metros la máxima velocidad alcanzada con oleaje regular es 171 RPM, y con oleaje irregular 121 RPM, mientras que a una profundidad de 0.5 metros la máxima aceleración alcanzada con oleaje regular fue 124 RPM y con oleaje irregular 100 RPM,

Por lo tanto, de acuerdo a los resultados de la figura 47, mecánicamente el sistema aprovecha el máximo potencial energético del oleaje cuando el brazo secundario es 1.2 veces la longitud del brazo primario y el brazo primario debe ser 1/3 de la longitud de onda, mientras que el diámetro de la boya primaria debe ser menor o igual a la altura de ola y la boya secundaria debe ser igual a la boya primaria, ambas boyas deben ser orientadas perpendicularmente a la incidencia del oleaje.

En cambio, hidrodinámicamente el WEC capta la máxima energía cuando la altura de ola es superior al diámetro de boya primaria, ya que en estas condiciones el flotador tiene mayor desplazamiento vertical lo cual incrementa la aceleración del generador, mientras que para el periodo de oleaje el sistema es más eficiente con periodos cortos, pues la cercanía entre ondas permite que la boya se mantenga en movimiento continuo eliminando las pérdidas de velocidad del generador, de lo contrario, entre más alejada viaja una onda de otra ocasionan que el sistema entre en reposo disminuyendo las RPM, reduciendo también la generación de energía hasta que llega la siguiente onda.

A manera de resumen en la tabla 11 se muestran las 3 condiciones mecánicas e hidrodinámicas con las cuales el sistema es más eficiente tanto con oleaje regular como con oleaje irregular.

Tabla 11.- Condiciones de operación óptimas para el WEC MICO-2T 1:20.

Tipo de Oleaje	Condición óptima	Diámetro de boya		Longitud de palanca		Altura de ola H (metros)	Periodo de oleaje T (segundos)	RPM
		Primaria $\varnothing_P$	Secundaria $\varnothing_S$	Primaria $l_P$	Secundaria $l_S$			
Irregular	1 <sup>a</sup>	A = 0.10	A = 0.10	Y = 0.90	Y = 0.90	0.10	0.8	124
	2 <sup>a</sup>	A = 0.10	A = 0.10	X = 0.80	Z = 1.00	0.10	1.0	104
	3 <sup>a</sup>	A = 0.10	A = 0.10	X = 0.80	Z = 1.00	0.10	0.8	100
Regular	1 <sup>a</sup>	A = 0.10	A = 0.10	X = 0.80	Z = 1.00	0.10	1.0	171
	2 <sup>a</sup>	A = 0.10	A = 0.10	X = 0.80	Y = 0.90	0.10	1.0	143
	3 <sup>a</sup>	A = 0.10	A = 0.10	X = 0.80	Z = 1.00	0.10	0.8	140

En la tabla se puede observar que con oleaje irregular la máxima aceleración alcanzada fue de 121 RPM, mientras que con oleaje regular la máxima fue de 171 RPM, ambas a una profundidad de 0.4 metros. También se visualiza que en todos los casos evaluados la máxima velocidad se alcanza con la boya de menor diámetro (boya A = 0.10 metros) y la altura de ola más grande (H = 0.10 metros).

Esto corrobora que el WEC tiende a captar mayor energía cuando el diámetro de las boyas es menor a la altura de ola. En cambio, la longitud del brazo de palanca secundaria debe ser 20 % más larga que el brazo primario, y esta debe ser 1/3 de la longitud de onda.

## V.2.- Resultados de las actividades en campo

### V.2.1.- Resultados de campo con el modelo 1:20 del WEC MICO-1T

Las actividades de campo con este modelo consistieron en trasladar el WEC de la ciudad de México hacia el estado de Mérida donde con el apoyo de investigadores del Laboratorio de Procesos Costeros y Oceanografía Física de CINVESTAV Mérida se construyó e instaló un datalogger para almacenar las lecturas registradas por los sensores de oleaje, RPM y voltaje durante las pruebas en el mar.

Después de semana y media se logró concluir el ensamble, calibración y pruebas preliminares con el datalogger para finalmente llevar el prototipo a las costas de Puerto Progreso el 1° de diciembre de 2015 donde permaneció operando durante 4 horas con 50 minutos. Aun cuando estructuralmente el WEC operó sin complicaciones y se lograron obtener los primeros resultados en campo con este modelo, se detectaron algunos detalles que se deben corregir en el WEC. Los resultados obtenidos se muestran a continuación en las gráficas de las siguientes figuras:

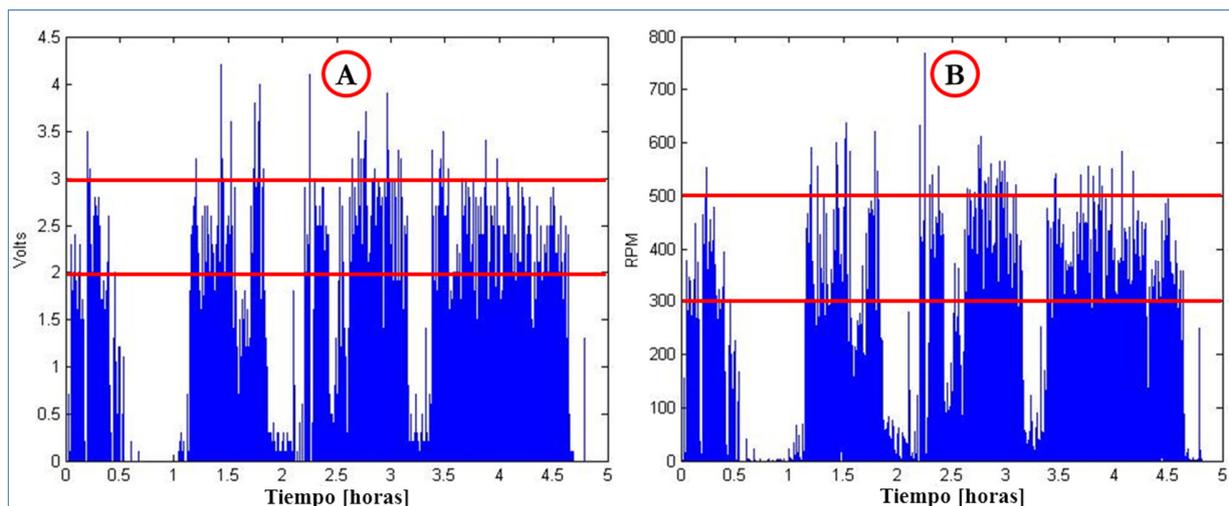


Figura 48.- Voltaje y RPM alcanzadas con el modelo 1:20 del WEC MICO-1T durante las pruebas en campo

En la figura 48-A se muestra el voltaje obtenido por el generador eléctrico del WEC donde se observa que la mayor parte de las lecturas registradas oscilaron entre 2 y 3 Volts, con un máximo de 4.2 Volts. Si consideramos que el generador eléctrico instalado en el modelo es de 6 V, entonces se estima que bajo estas condiciones de operación el generador trabajó al 42 % de su capacidad con un máximo del 70 %. Sin embargo, se debe tener en cuenta que el prototipo es un modelo a escala mientras que el oleaje utilizado era a tamaño real, por lo tanto la producción energética que se puede obtener con un oleaje a la misma escala del WEC seguramente será menor.

Mientras que en la figura 48-B se presentan las revoluciones por minuto (RPM) alcanzadas con cada ola que llegó al sistema de captación (boya) y transmitidas por el sistema de conversión (brazo) hacia el eje de tracción del generador. En la gráfica se puede observar que la mayor parte de los registros oscilo entre 300 y 500 RPM con una máxima de 750 RPM.

Finalmente, la figura 49 muestra la energía generada por el WEC durante su operación en el mar, en esta grafica se puede observar que la mayor parte de las lecturas osciló entre 0.5 y 0.8 Watts con una potencia de generación máxima de 1.78 Watts.

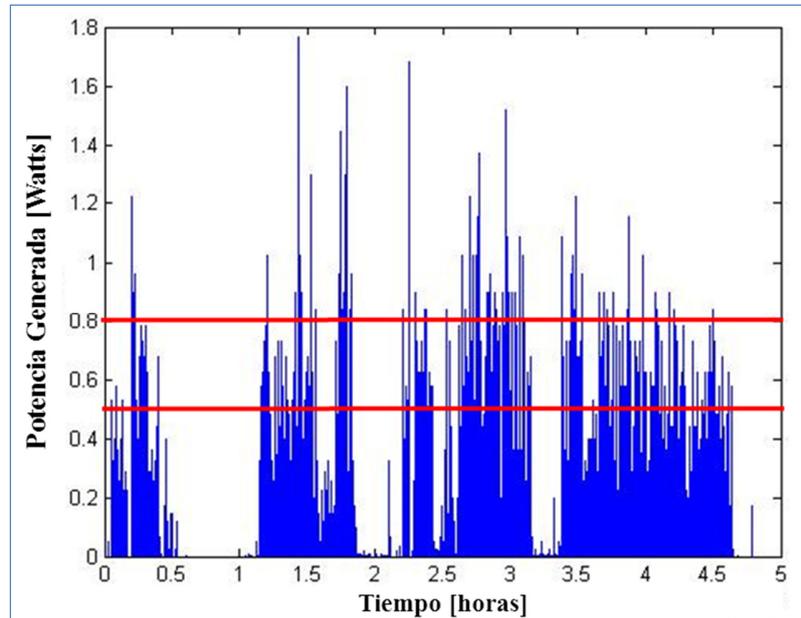


Figura 49.- Potencia generada con el modelo 1:20 del WEC MICO-1T durante las pruebas en campo

En las tres graficas se puede observar que existen lapsos de tiempo en los cuales el registro de datos es de cero o cercano a cero, estos fueron eventos donde el sistema de captación y conversión (brazo de palanca y boya) presentó algunos problemas durante las pruebas, los cuales se describen a continuación.

- El primer evento fue debido a una falla en el carrete compuesto, el cual es el elemento que transmite la energía del brazo de palanca al eje de tracción del generador. Este evento fue provocado por el constante choque del oleaje con el peso de restitución del WEC lo cual indujo un movimiento pendular ocasionando que la sogá de sujeción se enredara, y aun cuando la boya permanecía captando la energía del oleaje, el generador ya no recibía impulso.
- El segundo evento correspondió a que el brazo retráctil de la palanca se aflojó por la constante vibración de la estructura del WEC, lo cual originó que la boya actuara como amortiguador absorbiendo el movimiento generado por las olas.
- Mientras que el tercer y cuarto evento se debió a que el rodamiento del carrete compuesto se pegó impidiendo la transmisión de energía hacia el eje de tracción, por lo cual el generador disminuyó drásticamente la energía generada.
- El quinto evento se debió a que la constante vibración y empuje de las olas sobre la boya originaron que los opresores de sujeción se aflojaran provocando que la boya saliera de su posición original.

Por lo tanto, de acuerdo a los resultados observados durante la operación del WEC en campo se recomendó reforzar el brazo de boya o sustituir el brazo retráctil por un sistema fijo, ya que el sistema de fijación mediante opresores de este elemento fue el primero en fallar. Así mismo el carrete compuesto debe ser aislado pues al entrar en contacto directo con el agua el lubricante de los rodamientos tiende a incrementar su viscosidad provocando que el peso de restitución no funcione adecuadamente.

Los resultados y las observaciones de campo con este modelo sirvieron para mejorar el modelo 1:10 del WEC MICO-1T que se llevaría a campo posteriormente. Por lo tanto, en el modelo 1:10 se protegió el peso de restitución al colocarlo dentro de un tubo vertical que evitaba el choque directo del oleaje, también se aisló el carrete compuesto al anexarle una carcasa y el brazo retráctil de la boya se reforzó con tornillería de mayor tamaño.

### V.2.2.- Resultados de campo con el modelo 1:10 del WEC MICO-1T

El modelo a escala 1:10 del WEC MICO-1T fue instalado el día 27 y puesto en marcha el día 28 de enero de 2016 en las costas de Puerto Morelos en Quintana Roo México, por cuestiones técnicas fue instalado a 1.6 m de profundidad a 30 m de la playa donde el oleaje tiene una incidencia NNE-NE, sin embargo, las condiciones de diseño del sistema eran de 0.6 a 1 m de profundidad y oleaje paralelo a la boya. Por otro lado los parámetros evaluados incluyeron: voltaje, corriente, presión y temperatura con una frecuencia de registro de 20 muestras por segundo.

Las actividades en campo con este dispositivo finalizaron el día 16 de marzo de 2016, por lo cual el WEC estuvo operando en promedio 7 semanas. Las primeras dos semanas estuvieron a cargo del grupo del Instituto de Ingeniería quienes realizaron la instalación, puesta en marcha y revisión de operación del WEC. Posteriormente la operación se quedó a cargo del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología, Unidad Puerto Morelos. Durante estas 5 semanas restantes se presentó el frente frío número 41 (28 de febrero) donde se registraron vientos hasta de 10 m/s NNE.

A continuación, en la tabla 12 se muestra un resumen con los principales datos del registro obtenido durante la operación del WEC, el cual es parte del análisis realizado por el grupo del ICMYL-PM.

**Tabla 12.- Información generada en campo con el WEC MICO-1T 1:10**

Descripción	Datos Obtenidos
Número de registros	63,494,424
Registros eliminados	685,233
Registros restantes	62,809,191
Porcentaje de datos útiles	98.92 %
Registros con valor cero	11,832,097
Porcentaje de valores cero	18.84 %
Horas de funcionamiento	1,107
Horas registradas	966
Horas sin registro	141
Porcentaje de datos analizados	80.08 %

El procesamiento de datos obtenidos en campo se realizó mediante el programa LabView con el cual se obtuvieron los resultados presentados en la tabla 13, donde se estimó que la energía generada por el WEC fue de 0.01 kW-h con una eficiencia de generación de 1.3 %.

**Tabla 13.-** Potencia y eficiencia de generación del WEC MICO-1T obtenida en campo.

	Voltaje (V)	Corriente (A)	Pg (W)	Pg (kW/m)	Pd (kW/m)	Eficiencia (%)	H (m)	T (s)
Máximo	62.021	1.986	123.160	0.062	4.648	1.325	0.54	14.65
Promedio	28.500	0.916	29.29	0.015	2.098	0.910	0.15	9.43

Al finalizar el periodo de pruebas en campo con el MICO-1T se realizó la inspección de los componentes estructurales donde se observó que el mayor sobreesfuerzo estructural estuvo en el sistema de captación, ya que la unión entre el brazo y la boya presentó mayor desgaste (Figura 50).



**Figura 50.-** Pieza de unión boya-brazo del WEC MICO-1T desgastada por fricción

En la figura 51 se muestran gráficamente los datos registrados por el datalogger, donde en el recuadro verde se aprecia una disminución del voltaje, corriente y potencia debido a la inestabilidad que sufrió la boya durante periodo de pruebas. Esta inestabilidad se debió a un desgaste por fricción en la unión de boya, lo cual provocó una reducción de la eficiencia de captación y de la generación de energía.

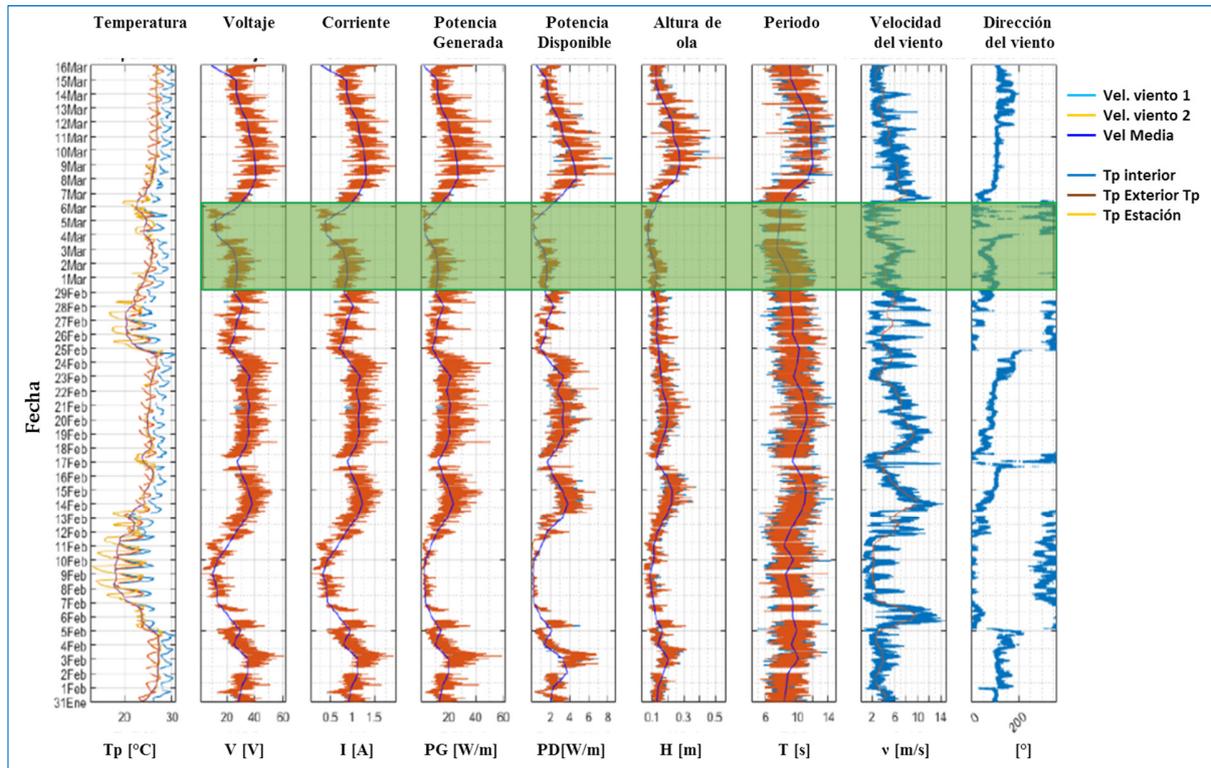


Figura 51.- Pérdida de estabilidad de la boya del WEC MICO-1T

Durante el tiempo que estuvo en operación el WEC se hicieron las siguientes observaciones:

1. El diseño del WEC le confiere buena estabilidad estructural bajo condiciones reales de operación y resistencia ante los frentes fríos.
2. Es imprescindible reforzar el sistema de captación de energía, en específico la unión brazo-boya ya que fue el primer componente en fallar.
3. Es necesario mejorar la jaula de la boya debido a que también presentó algunos problemas durante su operación provocando que saliera de su sitio y quedara a la deriva.
4. Desde los primeros días de operación el WEC empezó a servir como arrecife artificial, ya que algunos peces lo utilizaban como refugio y zona de alimentación.
5. La estructura del WEC también actúa como sustrato para la proliferación de algas.
6. La presencia del WEC como estructura artificial en la costa no ocasionó erosión ni acumulación de sedimentos en las zonas cercanas ni en su base.
7. Tampoco se observó alteración de pastos marinos de la zona.
8. Es necesario integrar un sistema de sujeción para facilitar la instalación del WEC.

A continuación en la figura 52 se muestran algunas imágenes del WEC que permiten visualizar el comportamiento de la estructura como arrecife artificial. La figura 52-A muestra el WEC durante el primer día de operación, mientras que la figura 52-B muestra el día 31 de operación donde se puede observar crecimiento de algas sobre la estructura y peces pequeños alimentándose, finalmente la figura 52-C muestra el día 48 donde se observa un notable crecimiento de algas y peces de mayor tamaño bajo la base.

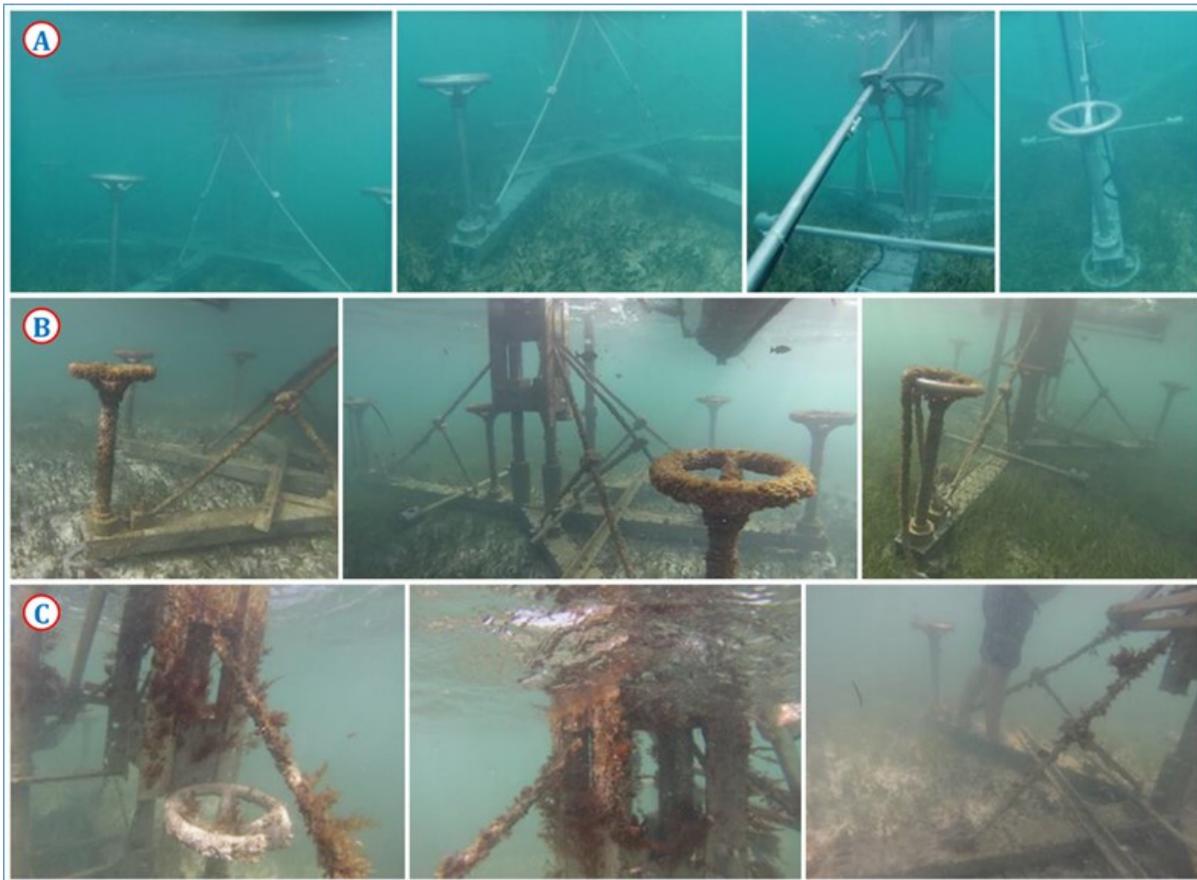


Figura 52.- Vista de la estructura del WEC MICO-1T al inicio y final de las pruebas en campo

### V.2.3.- Resultados de campo con el prototipo 1:1 del WEC DINA-EF

Las principales actividades realizadas con el WEC DINA-EF fueron los trabajos de reconocimiento del sitio de instalación en el muelle el Sauzal, el recorrido por el taller de ensamble e inspección del WEC, la reunión de trabajo en el área de Ingeniería DINA, la realización del Proyecto Ejecutivo y las múltiples reuniones de retroalimentación con las instituciones involucradas en el proyecto. Por lo tanto, los resultados más importantes de las actividades con el WEC DINA-EF fueron la entrega del Proyecto Ejecutivo para el proyecto de energía undimotriz y la modelación numérica, las cuales se describen a continuación:

## Proyecto Ejecutivo.

En función a las primeras reuniones técnicas con personal de DINA se planeó la visita al muelle el Sauzal con la finalidad de ubicar el sitio de instalación y analizar los requerimientos físicos necesarios para instalar el WEC. Durante el reconocimiento del sitio se percibió la necesidad de desarrollar paralelamente el proceso de construcción y el proyecto ejecutivo para acelerar los trámites y permisos ante las instituciones gubernamentales pertinentes.

En base a lo anterior se presentó una propuesta del Proyecto Ejecutivo a DINA donde se enlistó la documentación, trámites y permisos necesarios para dar continuidad al proyecto. Una vez aprobada la propuesta (figura 53) se realizó un análisis de la información y documentación con la que ya se contaba para identificar los rubros que aún faltaban por desarrollar, de este modo se registraron los puntos más importantes en los que se debía trabajar, siendo estos los siguientes:

- Precisar que existen dos fases del proyecto: La primera fase de estudio con visión de 6 a 7 meses comprende el acondicionamiento del sitio para la instalación de una boya con producción de 200 kW, mientras que la segunda fase con visión a 5 años contempla la expansión de un muelle mar adentro para instalar un grupo de WECs y alcanzar una generación comercial de 3 MW.
- Se debe acelerar el trámite de permisos ambientales ya que suelen ser más tardados debido a que no existe tecnología e infraestructura en operación en nuestro país que respalde los estudios científicos, así como tampoco existe dentro de las entidades gubernamentales personal académicamente capacitado para evaluar el desarrollo de este tipo de proyectos.
- Para agilizar el permiso ante la SCT se requiere incluir en el proyecto ejecutivo las memorias de cálculo de hidrodinámica costera (cerca de la obra), especificaciones y funcionamiento del dispositivo WEC, así como la descripción de obra civil para adecuación del sitio.

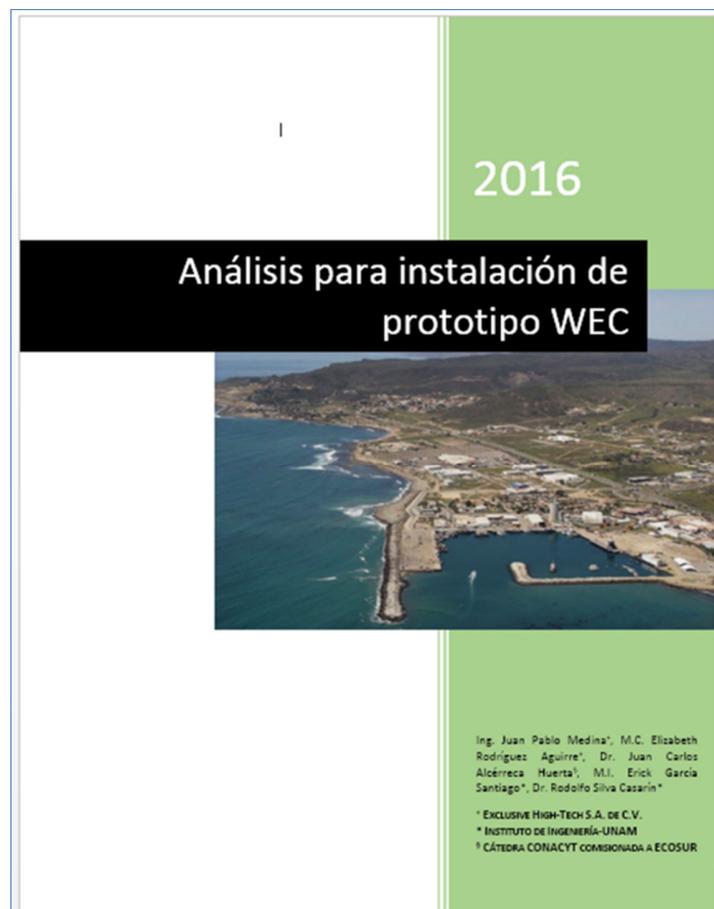


Figura 53.- Caratula del proyecto ejecutivo presentado

- Se requiere agilizar la solicitud de permiso ante la SEMAR.
- Verificar los trámites de interconexión a la red eléctrica ante la CFE cuando son casos de estudio y no de negocio.
- Describir los métodos de medición, monitoreo y mantenimiento del WEC.
- Integrar los resultados de la modelación numérica y precisar que a lo largo de la primera etapa los modelos numéricos se estarán recalibrando de acuerdo a los datos recabados en campo.

### Modelación numérica.

Como ya se describió anteriormente la modelación numérica se desarrolló en dos partes; la mecánica y la hidráulica. La parte mecánica estuvo a cargo del área de Ingeniería de DINA-Guadalajara quienes diseñaron un nuevo sistema para el brazo de boya, mientras que la parte hidráulica estuvo a cargo del Instituto de Ingeniería de la UNAM donde se simuló la interacción entre el oleaje y la estructura del WEC (cimentación de concreto y brazo con boya).

Tras algunas simulaciones se observó que al colocar una estructura artificial con pared vertical en la costa el desplazamiento del oleaje se altera provocando perturbaciones que inducen erosión en las playas cercanas. Por lo tanto era estrictamente necesario modificar el diseño de la cimentación para eliminar el problema de erosión que podría ocasionar la base del WEC, de este modo se optó por sustituir la cimentación cubica (figura 54-A) por una estructura de cuatro pilotes cilíndricos que mediante rieles sujetan y deslizan la boya (figura 54-B) permitiendo su desplazamiento vertical con cada ola.

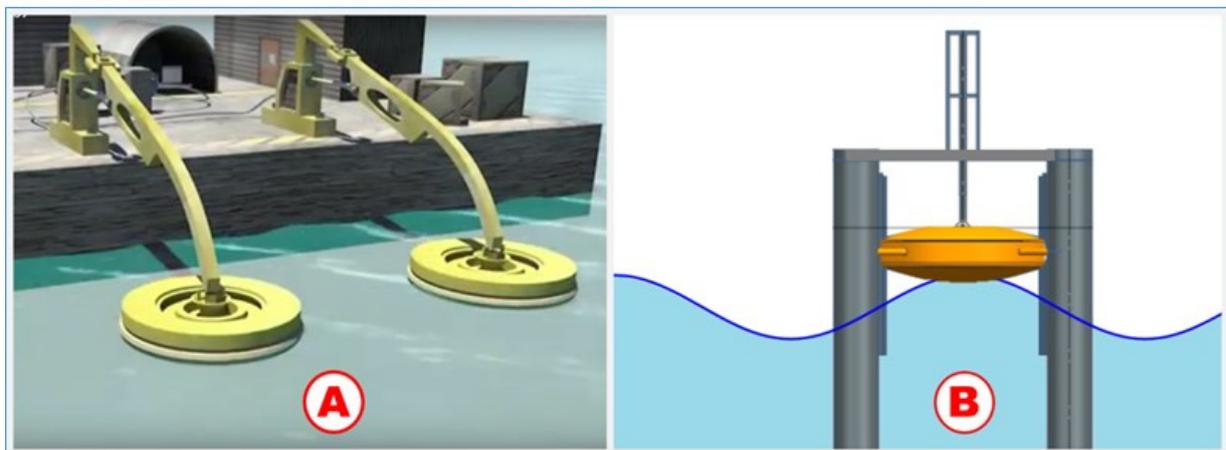


Figura 54.- Modificación de la cimentación del WEC DINA-E después de la modelación numérica

La optimización del diseño cimentación-boya aún se encuentra en desarrollo, por lo que su construcción sigue pendiente aun cuando el sistema de conversión y generación ya está concluido al 100%.

---

## Capítulo VI:

# Conclusiones y Aportaciones

---

A continuación se enlistan las conclusiones y las aportaciones obtenidas con cada actividad desarrollada durante el proyecto doctoral.

### VI.1.- Conclusiones

- a) Las 4 zonas con mayor potencial undimotriz de México son: Zona 1 (Baja California) con rango de 8 a 14 kW/m, Zona 2 (Jalisco, Colima, Michoacán, Guerrero, Oaxaca y Chiapas) con rango de 6 a 11 kW/m, Zona 3 (Quintana Roo y Yucatán) con rango de 4 a 6 kW/m y Zona 4 (Tamaulipas) de 3 a 4 kW/m.
- b) Los mejores sitios para la instalación de Convertidores de Energía del Oleaje son: la Península de Baja California, Michoacán y Guerrero ya que son los sitios costeros de México con mayor potencial energético durante todo el año.
- c) Las tormentas incrementan en promedio 2 kW/m el potencial energético undimotriz.
- d) El potencial energético promedio del oleaje en México oscila entre 8 y 14 kW/m.
- e) El WEC UFCAP alcanza el máximo flujo de aire cuando la cámara OWC está sumergida al 50 %.
- f) Las cámaras OWC captan mayor energía con periodos largos.
- g) El WEC UFCAP tiende a ser más eficiente cuando la altura del oleaje supera  $\frac{1}{4}$  de la altura de la cámara de aire y el diámetro de la cámara es menor a  $\frac{1}{16}$  de la longitud de onda.
- h) Se construyó un modelo a escala 1:32 del WEC UFCAP, sin embargo no se concluyó su optimización, solo se inició su etapa evaluación donde se percibió la necesidad de modificar la escala de la turbina.
- i) Las pruebas en campo con el modelo 1:20 del MICO-1T mostraron buena estabilidad estructural, pero baja eficiencia de generación.

- j) Durante la operación en campo el modelo 1:20 del MICO-1T utilizando un generador de 6 V generó 4.6 V, lo que indica que el generador operó al 70 % de su capacidad, con una potencia de 1.78 W.
- k) Durante las pruebas en laboratorio el modelo 1:10 del MICO-1T alcanzó eficiencias del 40 %, sin embargo por diversas circunstancias en campo solo alcanzó eficiencias del 1.3 %.
- l) El modelo 1:10 del MICO-1T puede operar con rangos de marea de 0.6 m y alturas de ola de 0.5 m.
- m) En las pruebas de laboratorio el modelo 1:20 del MICO-2T alcanzó eficiencias del 30 % bajo condiciones ideales de operación.
- n) El MICO-2T alcanza la máxima eficiencia cuando la palanca primaria es  $1/3$  de la longitud de onda y la palanca secundaria es 1.2 veces la palanca primaria, mientras que el diámetro de las boyas deben ser menores a la altura de ola, por lo cual estas son las condiciones ideales de operación.
- o) Las actividades con el WEC DINA-EF permitieron conocer las bases técnicas y trámites legales que se deben cumplir para implementar proyectos de aprovechamiento de energía del oleaje.
- p) El principal problema en México para desarrollar proyectos de aprovechamiento undimotriz es la excesiva lentitud en la revisión de documentos y otorgamiento de permisos
- q) Se concluyó que los trámites suelen ser más tardados en nuestro país debido a que no existe tecnología o infraestructura en operación que respalde estos estudios científicos.
- r) Otro de los problemas encontrado fue que las entidades gubernamentales no cuentan con personal académicamente capacitado para evaluar éste tipo de proyectos.
- s) Se generaron las bases técnicas que deben desarrollarse antes de la construcción de un WEC, así como los permisos legales y ambientales necesarios para su instalación.
- t) La explotación masiva de la energía del oleaje en México con la tecnología actualmente disponible no es viable, se requiere desarrollar sistemas más eficientes que puedan operar en zonas de bajo a medio potencial energético.
- u) La construcción e instalación de dispositivos WEC tiene una huella ecológica aceptable.
- v) Todos los modelos WEC evaluados en campo y en laboratorio aun requieren mejoras en su diseño.
- w) No se logró demostrar directamente que la energía del oleaje puede ser utilizada en diversos procesos costeros.

## VI.2.- Aportaciones y Alcances

- a) Se generó una base de datos con los resultados obtenidos en laboratorio donde se encuentran las condiciones mecánicas e hidrodinámicas ideales para los distintos modelos WEC's evaluados.
- b) Se desarrolló una síntesis del potencial energético disponible en las costas Mexicanas para identificar los sitios con mayor energía undimotriz comparando su altura y periodo de oleaje.
- c) Se realizó un mapa con la estimación de los sitios más idóneos para la operación de cada WEC a fin de obtener el máximo potencian energético.
- d) Se generó información de los requerimientos durante la instalación y puesta en marcha de los WEC's bajo condiciones reales de operación: el primero fue un modelo a escala 1:20 evaluado en Puerto Progreso, Yucatán, el segundo fue un modelo a escala 1:10 probado en Puerto Morelos y el tercero fue un modelo escala 1:1 con miras a evaluar en el Sauzal Baja California.
- e) Después de las pruebas en campo se generó una base de datos con la información recabada durante el desarrollo de estas, que incluye una descripción mecánica del WEC y las recomendaciones para incrementar la eficiencia de generación.
- f) Se propusieron recomendaciones y adecuaciones estructurales de los WEC para facilitar su instalación y mantenimiento, mismas que son aplicables a futuros sistemas de captación.
- g) Los materiales utilizados: aluminio, acero inoxidable, PVC, acrílico y poliuretano marino presentaron buena resistencia a la corrosión y frentes fríos, además actuaron como sustrato para la proliferación de algas, pero no tuvieron buena resistencia al desgaste por fricción.
- h) El monitoreo permitió evaluar la operación del sistema y la eficiencia del WEC ante tormentas y frentes fríos, los cuales servirán para hacer adecuaciones futuras en campo y/o laboratorio.
- i) Las bases de datos podrán ser utilizadas para calibrar modelos numéricos de transformación de oleaje y aprovechamiento energético que permitan un ahorro de tiempo y recursos económicos evaluando el costo-beneficio de la implementación de estos sistemas.
- j) Se espera que las actividades y metodologías utilizadas en esta investigación resulten aplicable para futuros proyectos undimotrices del país y que como se ha mencionado anteriormente, permita contar con una base técnica y científica en la que pueda fundamentarse la toma de decisiones administrativas y políticas para proyectos de desarrollo energético.

---

## Capítulo VII:

# Propuestas y Recomendaciones

---

Tras haber analizado los resultados obtenidos con cada uno de los modelos evaluados tanto a nivel laboratorio como en campo, se detectaron las principales necesidades de cada WEC para mejorar su operación y su generación de energía. Por lo tanto, a continuación se describen las propuestas y recomendaciones que permitirán corregir las fallas que limitaron el óptimo funcionamiento de los WEC's.

### VII.1.- Recomendaciones para el WEC MICO

#### Recomendaciones para el modelo 1:20 del WEC MICO-2T.

Los resultados de laboratorio con el MICO-2T permitieron encontrar algunos puntos clave que pueden mejorar la operación del WEC, por lo que a continuación se proponen algunas recomendaciones al sistema:

- Es necesario evaluar la eficiencia de generación del WEC utilizando boyas con diferente forma, longitud y diámetro, ya que durante estas pruebas solo se utilizó la boya cilíndrica por lo que no se sabe si el sistema puede ser más eficiente al cambiar el tipo de boya.
- Se recomienda evaluar la operación del WEC y su producción energética al cambiar el ángulo de incidencia de oleaje debido a que durante las pruebas solo se contempló un oleaje perpendicular a la boya, sin embargo es sabido que en condiciones reales la incidencia del oleaje cambia de forma natural lo que puede afectar la estructura del WEC o bien la producción energética.
- Se propone mejorar la sujeción de jaula de la boya, ya que si la tornillería se afloja el sistema actuará como amortiguador del oleaje provocando pérdidas en la captación de energía. Por lo tanto se recomienda sustituirlo por una boya de sujeción fija.
- Es necesario evaluar la distancia óptima entre cada WEC para considerar la instalación de una granja energética con una mínima alteración del oleaje y de las zonas aledañas.
- Se recomienda cambiar el sistema de acoplamiento actual (tornillería) por un sistema estructural fijo como soldadura o concreto para evitar posibles fallas generadas por la vibración.
- Se requiere anexar en la estructura del WEC un sistema de sujeción que permita mover el dispositivo de forma fácil y segura sin arriesgar el dispositivo ni la seguridad del personal.

## Recomendaciones para el modelo 1:20 del WEC MICO-1T.

Las pruebas en campo con este modelo permitieron identificar los primeros problemas de operación que presentó el WEC, ya que aunque su operación fue de solo unas horas el sistema tuvo fallas que suspendieron completamente la producción de energía. Por lo cual a continuación se proponen algunas mejoras para evitar estos errores en modelos futuros.

- Es necesario aislar el peso de restitución, ya que el constante choque del oleaje produce un movimiento pendular que provoca fallas al transmitir la energía hacia el generador, para solucionarlo basta colocar el peso de restitución dentro de un tubo que lo aisle del oleaje pero que a su vez le permita desplazarse libremente.
- Se requiere aislar el carrete compuesto que acciona al eje de tracción del generador, ya que el lubricante que este utiliza tiende a aumentar su viscosidad cuando está en contacto con el agua provocando una reducción de las RPM que recibe el generador de energía.
- Se propone cambiar el brazo retráctil de la boya por un brazo fijo, ya que la sujeción con opresores no es suficientemente resistente ante la fuerza de empuje ejercida por el oleaje, lo cual provoca que la palanca se afloje y actúe como amortiguador absorbiendo el movimiento generado por las olas.
- Es recomendable cambiar la sujeción estructural de tornillería por una sujeción fija de soldadura, esto evitará puntos débiles en uniones y acoplamientos estructurales del modelo, particularmente en los elementos expuestos continuamente a la acción del oleaje como es el caso de la boya, pues durante las pruebas éste elemento se aflojó y salió de su posición original provocando que el generador dejara de producir energía.
- Se requiere integrar un sistema de sujeción al WEC, el cual permita enganchar el dispositivo para ser trasladado de forma segura dentro o fuera del agua.

## Recomendaciones para el modelo 1:10 del WEC MICO-1T.

Las pruebas en campo con el modelo 1:10 del MICO-1T permitieron visualizar puntos débiles del sistema, por lo cual se proponen las siguientes recomendaciones para mejorar la operación del WEC e incrementar su eficiencia:

- Es necesario incluir un sistema de sujeción a la estructura del modelo con la finalidad de facilitar su instalación en campo, ya que de lo contrario se compromete la composición estructural del modelo.
- Se debe identificar el centro de masa del WEC para darle equilibrio durante su transferencia al agua cuando haya sido ensamblado en tierra, ya que esta fue la principal causa de que el modelo no pudiera ser colocado en el sitio idóneo de instalación.
- Se requiere reforzar la unión entre brazo y boya del sistema de captación de energía, debido a que durante las pruebas en campo fue el componente estructural de mayor impacto en la baja generación de energía.

- Se propone cambiar el diseño de la jaula de boya, ya que el sistema movable al fallar opera como elemento de absorción de la energía del oleaje, lo que reduce drásticamente la eficiencia de generación. Por lo tanto se recomienda tener un sistema de sujeción estático.
- Se requiere cambiar el excesivo uso de tornillería como método de sujeción estructural, pues la constante vibración del oleaje induce a que la tornillería falle en algún momento, en su lugar se recomienda usar una estructura fija mediante soldadura de piezas.
- Se recomienda cambiar el material de construcción del WEC, principalmente la cimentación y postes que están contruidos en aluminio, el cual se podría cambiar por concreto. Esto permitirá reducir costos y aumentar la estabilidad del sistema.
- Es necesario integrar un sistema de seguridad que inmovilice el brazo de boya cuando se requiera hacer alguna reparación o mantenimiento del WEC, ya que el constante movimiento del oleaje dificulta cualquier maniobra e incluso compromete la seguridad del personal.

## VII.2.- Recomendaciones para el WEC UFCAP

### Recomendaciones para el modelo 1:17 del WEC UFCAP

Los resultados obtenidos durante las distintas etapas de prueba con este modelo del UFCAP permitió ubicar los requerimientos y necesidades del sistema para mejorar su operación, de igual manera se realizaron algunas de estas adecuaciones en busca de su optimización. Por lo tanto a continuación se enlistan las recomendaciones más importantes para este WEC:

- Es necesario modificar el sistema de flotación de las cámaras OWC, ya que durante las pruebas se observó que el peso de los conductos de aire desequilibraban la cámara ocasionando su hundimiento. Este problema se puede solucionar de 3 maneras: la primera es cambiando el punto de flotabilidad donde está unido el flotador, para que la cámara tenga mayor porcentaje de hundimiento, la segunda es cambiar el tamaño del flotador para que soporte un mayor peso de las mangueras y la tercera es cambiar el sistema de anclaje de tal manera que los sensores eviten la inclinación de la cámara.
- Se requiere reforzar la tapa de la cámara, debido a que durante las pruebas se observó un abombamiento generado por el aumento de la presión del aire interno al pasar la ola. La recomendación para solucionar este problema es cambiar la tapa por una de mayor grosor.
- Se recomienda sustituir el conducto de aire aéreo por un conducto sumergido, esto evitara en gran medida la inestabilidad de la cámara permitiendo su flotabilidad de forma más estable y al mismo tiempo se resguardará el conducto.
- Es necesario mejorar las válvulas unidireccionales de aire instaladas en la tapa de la cámara, ya que se detectó que tienen pequeñas fugas bidireccionales que reducen el flujo de aire.
- Es estrictamente necesario modificar la escala del modelo 1:17 para poder evaluarlo adecuadamente en el canal de olas del Instituto de Ingeniería, ya que los resultados indican que el tamaño del modelo es muy grande para el tamaño el canal de oleaje.

- Se requiere evaluar la distancia óptima entre cámaras OWC para instalar un sistema integral a fin de incrementar la potencia de generación con la mínima alteración del oleaje.
- Como ya se cuenta físicamente con el modelo 1:17 del WEC y a esta escala no podrá ser evaluado en el laboratorio, se recomienda llevarlo a campo para evaluar su funcionamiento en condiciones reales y optimizar su operación. Una opción son las costas del Caribe Mexicano donde es posible apoyarse con personal de CINVESTAV o del ICMYL con quienes ya se han trabajado proyectos similares.

### **Recomendaciones para el modelo 1:32 del WEC UFCAP**

Los primeros resultados obtenidos con el modelo 1:32 del UFCAP incluyó la evaluación del sistema durante su operación, lo cual permitió identificar las necesidades para mejorar el funcionamiento del WEC, algunas de estas son las siguientes:

- Se recomienda cambiar la escala de la turbina a un tamaño más pequeño, ya que el flujo de aire generado por el WEC no es suficiente para mantener en funcionamiento la turbina y el generador de energía.
- Es necesario adecuar el acoplamiento entre la turbina y el conducto de aire, ya que la distancia entre ambos produce una pérdida de velocidad en el flujo de aire. Por lo tanto se deben hacer pruebas para definir la distancia óptima con la cual se pueda generar la mayor cantidad de energía.
- Se requiere ajustar la parte interna del acoplamiento de la turbina ya que genera turbulencia y dificulta el aprovechamiento máximo del flujo de aire.
- Se requiere integrar válvulas unidireccionales en los conductos de aire dentro de la cámara OWC con la finalidad de incrementar el flujo de aire que llega a la turbina aumentando así la generación de energía.

### **VII.3.- Recomendaciones para el WEC DINA-EF**

Las actividades de campo realizadas con el WEC DINA-EF permitieron definir los principales aspectos que están retrasando los trámites para su instalación y puesta en marcha, por lo tanto, las recomendaciones para este WEC se describen a continuación:

- Se recomienda cambiar la cimentación tipo cajón por la cimentación tipo pilotes, ya que los resultados de la modelación numérica indicaban que la pared vertical de la cimentación tipo cajón alteraría las playas aledañas, por lo tanto la solución es sustituirla por una cimentación de pilotes con el cual el oleaje pasará por la estructura del WEC.
- Se debe sustituir el brazo de la boya original por una boya de rieles que pueda desplazarse verticalmente por la cimentación de pilotes, esto asegura que no habrá alteración del medio marino y costero circundante.

- Se requiere rediseñar el pistón de la boya para asegurar que podrá operar sin complicaciones al sumar la altura de ola y marea máximas para el sitio de instalación, incluyendo tormentas de los últimos 20 años.
- Es necesario construir un puente elevado que comunique la zona del sistema de captación con la zona del sistema de generación de energía, ya que durante el desarrollo del proyecto no debe removerse ningún elemento rocoso de la escollera.
- En cuanto a trámites legales se requiere agilizar las solicitudes ante la Secretaría de Marina y la Secretaría de Comunicaciones y Transportes.
- En el proyecto ejecutivo se deben integrar las memoras de cálculo de hidrodinámica costera, las especificaciones y funcionamiento del WEC, así como la descripción de obra civil, para asegurar que no se dañara el muelle existente ni se dañará el ambiente marino.

#### VII.4.- Propuestas Generales

- El potencial undimotriz en México oscila entre 8 y 14 kW/m, si se compara con el potencial de países como Chile, Australia, Portugal, e Irlanda donde la potencia supera los 60 kW/m parece baja, sin embargo el uso de granjas WEC y sistemas híbridos hacen de su aprovechamiento una opción más viable.

---

## Referencias

---

- Allan G., Gilmartin M., et al. (2011). “Levelised costs of Wave and Tidal energy in the UK: Cost competitiveness and the importance of “banded” Renewables Obligation Certificates” Energy Policy. 23-39.
- Annual report 2010. Implementing agreement on ocean energy systems, Energy Technology Network
- Amundarain M. (2012). La energía renovable procedente de las olas. Ikastorratza. E-Revista de didáctica 8. (ISSN: 1988-5911).
- Bouali B., Larbi S., (2013). “Contribution to the Geometry Optimization of an Oscillating Water Column Wave Energy Converter” Energy Procedia. 565-573.
- Boström C. (2011). Electrical system for wave energy conversion. Digital Comprehensive Summaries of Uppsala Dissertations from the Faculty of Science and Technology, Sweden. ISBN 978-91-554-7982-4.
- Carrica P., Fu H., Stern F. (2011). “Computations of self-propulsion free to sink and trim and of motions in head waves of the KRISO Container Ship (KCS) model” Applied Ocean Research. 309-320.
- CEFEP (2006). Página WEB del Centro de Estudios de las Finanzas Públicas, Sistema de indicadores [www.cefp.gob.mx](http://www.cefp.gob.mx)
- Chen Z., Etal (2013). A review of offshore wave energy extraction system. Advances in mechanical Engineering, Volume 2013, Article ID 623020, 9 pages.
- Cooper B, Kazer S. (2006). “The potential nature conservation impacts of wave and tidal energy extractions by marine renewable developments”. Report from ABP Marine Environmental Research Ltd for CCW Policy Research.
- Dorell D., Song S., Cossar C. (2012). “Comparison of Permanent Magnet Generators for a Very Low Speed Renewable Energy Application”. 978-1-4673-0142-8/12.
- Dragica Lj., Etal, (2003). Hydrogen generation from water electrolysis – possibilities of energy saving. Department of Physical Chemistry, Vinca Institute of Chemistry, 1100, University of Belgrade, Faculty of Chemistry, Belgrade, Yugoslavia. Elsevier, Journals of Power Sources 118 (2003) 315-319.
- Estrada G., Islas S.J., (2010). Energías Alternas: Propuesta de Investigación y Desarrollo Tecnológico para México (Academia Mexicana de Ciencias), México, 136 págs.
- Falcão, A. (2010). Wave energy utilization: A review of the technologies. Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, No. 3, April 2010, pp. 899-918.
- Falcão A.F., Candido J., et al. (2012). “Hydrodynamics of the IPS buoy wave energy converter including the effect of non-uniform acceleration tube cross section” Renewable Energy. 105-114.
- Falcão A.F., Henriques. J.C., et al (2012). “Dynamics and optimization of the OWC spar buoy wave energy converter” Renewable Energy. 369-381.

- Frid C., Andonegi E., et al. (2012). “The environmental interactions of tidal and wave energy generation devices” *Environmental Impact Assessment Review*. 133-139.
- García S.E. (2014). Optimización de un dispositivo undimotriz de tipo boya flotante, tesis para obtener el grado de Maestro en Ciencias, Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología – Instituto de Ingeniería de la UNAM, México.
- Gunn K., Stock C. (2012). “Quantifying the global wave power resource” *Renewable Energy*. 296-304.
- Habaibeh A., Su D., et al. (2010). “An innovative approach for energy generation from waves” *Energy Conversion and Management*. 1664-1668.
- Hayward J., Behrens S., et al. (2012). “Economic modelling of the potential of wave energy” *Renewable Energy*. 238-250.
- Heikkinen H., Lampinen M., et al (2013). “Analytical study of the interaction between waves and cylindrical wave energy converters oscillating in two modes” *Renewable Energy*. 150-160.
- IEA-OEs (2008) Annual Report, International Energy Agency Implementing Agreement on Ocean Energy Systems (IEA-OES), edited by A. Brito-Melo and G. Bhuyan, February 2009.
- Keske C., Evans S., Iverson T. (2012). “Total Cost Electricity Pricing: A Market Solution for Increasingly Rigorous Environmental Standards” *The Electricity Journal*. 1040-6190.
- Leijon M., Danielsson O., et al (2006). An electrical approach to wave energy conversion. *Renewable Energy*. Vol. 31:9, pp. 1309-1319.
- López G.J. (2009). Cuantificación de energía de una planta mareomotriz, Ingeniería, Investigación y Tecnología, Vol. XI. Num.2. 2012 233-245, ISSN 1405-7743 FI-UNAM. México.
- Martinelli L., Zanuttigh B., Kofoed J.P. (2011). “Selection of design power of wave energy converters based on wave basin experiments” *Renewables Energy*. 3124-3132.
- Mendoza B., Silva C., et al. (2010). “Wave energy conversion using a blow-jet system”. Engineering Institute, National University of Mexico.
- Padilla L. S. (2000), La población en la región costera de México en la segunda mitad del siglo XX, Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía de la UNAM. Número 41.
- Pérez Peña Abril Ichel (2013). Estimación del clima marítimo y la energía del oleaje disponible en las costas mexicanas. Tesis de Maestra, Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. 124 p.
- Perkins S.D. y Fernández Z. (2008). “Evaluation of Mexico’s 1975-2000 energy plan”. *Energy Economics*, Vol. 30, No. 5, September 2008, pp. 2569-2586.
- Penié I., Czitrom S. (2003). SIBEO: Use of wave energy for coastal management. ISSN 2072-800x.
- Portilla J., Sosa J. Y Cavalieri I. Wave energy resources: Wave climate and exploitation. *Renewable Energy*. 2013 Vol. 57, pp. 594-605.
- Rourke O., Boyle F., Reynolds A. (2010). “Tidal energy update 2009”. *Applied Energy*, Vol. 87, No. 2, February 2010, pp. 398-409.
- Sánchez D.R. (2005). “Diagramas de procesos para la transformación de las energías renovables”. *Revista del Instituto Mexicano de Ingenieros Químicos* 46(5-6), 19-25 (2005).

- Sánchez D.R., Silva C.R. (2012). Hidrógeno del mar. Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas, 15(1):49-61, 2012.
- SENER. (2014). “Estrategia Nacional de Energía 2014 - 2028”. Secretaría de Energía, Publicado en el Diario Oficial de la Nación en febrero de 2014. México.
- SENER. (2014). “Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía 2014-2018”. Secretaria de Energía, Publicado en el Diario Oficial de la Federación el 28 de abril de 2014. México.
- SENER. (2018). Balance Nacional de Energía 2017. Secretaria de Energía, Primera edición 2018. México.
- Silva, R., Martínez, M.L., Hesp, P.A., Catalan, P., Osorio, A.F., Martell, R., Fossati, M., Miot da Silva, G., Mariño-Tapia, I., Pereira, P. (2014). Present and future challenges of coastal erosion in Latin America. Journal of Coastal Research 71, 1-16.
- Taha Z., Sugiyono, Sawada T. (2010). “A comparison of computational and experimental results of Wells turbine performance for wave energy conversion” Applied Ocean Research. 83-90.
- Waveplam (2009). State of the Art Analysis, A Cautiously optimistic Review of the Technical Status of Wave Energy Technology, Hydraulics & Maritime Research Centre, 70 pp.
- Zai-Sha Mao, Chao Yang, Jiayong Chen (2012). “Mathematical modeling of a hydrophilic cylinder floating on water” Journal of Colloid and Interface Science. 463-468.
- Zhang D., Li W., Lin Y., Bao J. (2012). “An overview of hydraulic systems in wave energy application in China” Renewable and Sustainable Energy Reviews. 4522-4526.
  
- BOEM, Bureau of Ocean Energy Management. Ocean Wave Energy. [Citado el 14 de octubre de 2016]. Disponible en World Wide Web: <http://www.boem.gov/Renewable-Energy-Program/Renewable-Energy-Guide/Ocean-Wave-Energy.aspx>
- CONABIO, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, [Mares Mexicanos](http://www.biodiversidad.gob.mx/pais/mares/). [Citado el 21 de abril de 2017]. Disponible en World Wide Web: <http://www.biodiversidad.gob.mx/pais/mares/>
- [Eduambiental](http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/curso/contenidos/docpdf/capitulo22.pdf), Programa de actividades de educación ambiental, Energía del oleaje. [Citado el 25 de marzo de 2017]. Disponible en World Wide Web: <http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/curso/contenidos/docpdf/capitulo22.pdf>
- SENER. Secretaria de Energía, Balance Nacional de Energía 2017. [Citado el 08 de enero de 2019]. Disponible en World Wide Web: [https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/414843/Balance\\_Nacional\\_de\\_Energ\\_a\\_2017.pdf](https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/414843/Balance_Nacional_de_Energ_a_2017.pdf)

## Anexo A:

# Diagramas de los Sistemas WEC

## Diagrama del WEC MICO-1T

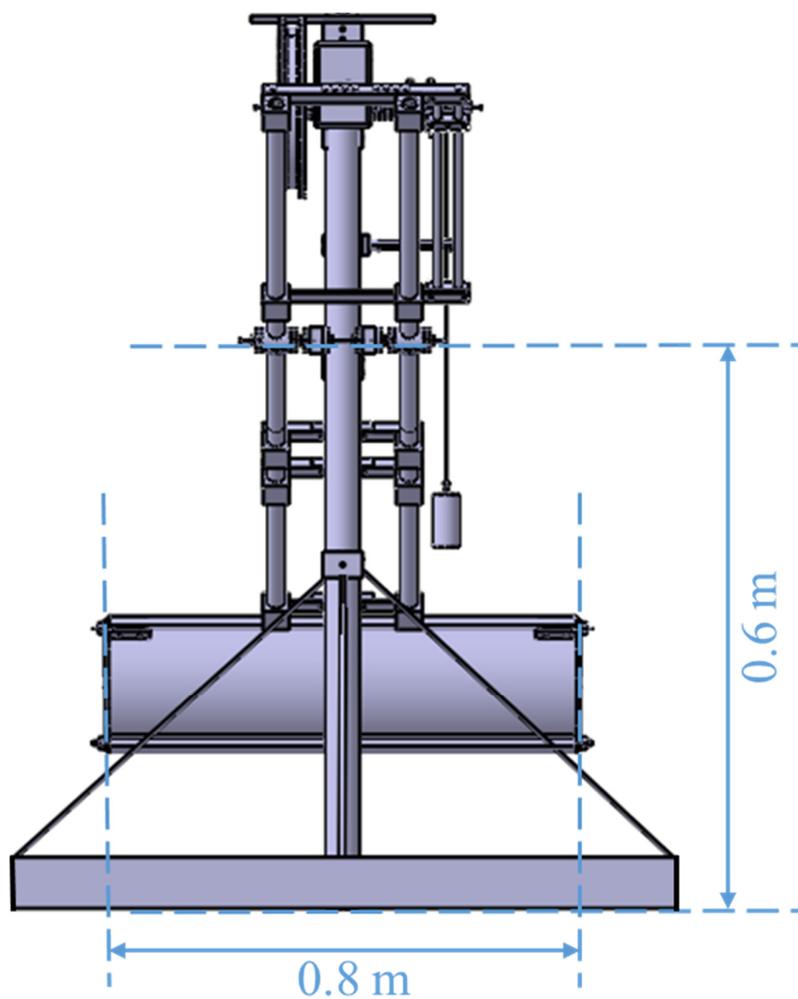


Figura 55.- Vista trasera del WEC MICO-1T.

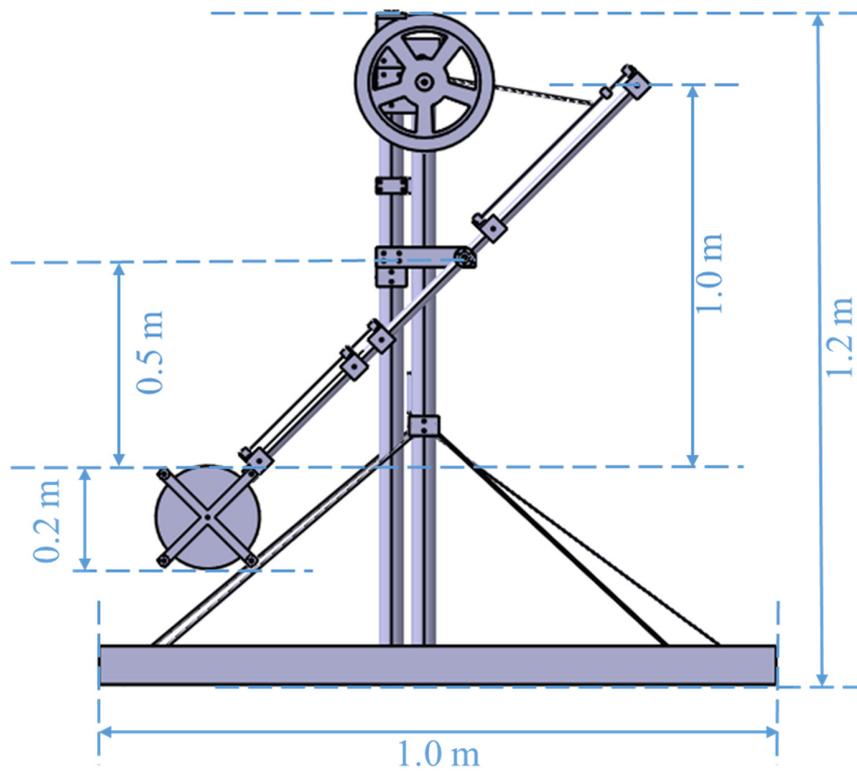


Figura 56.- Vista lateral del WEC MICO-1T.

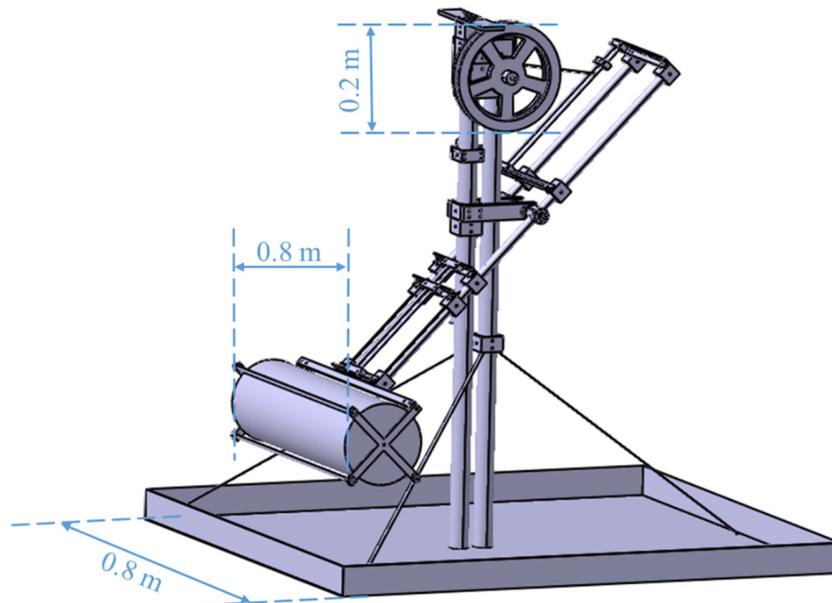


Figura 57.- Vista lateral-frontal del WEC MICO-1T.

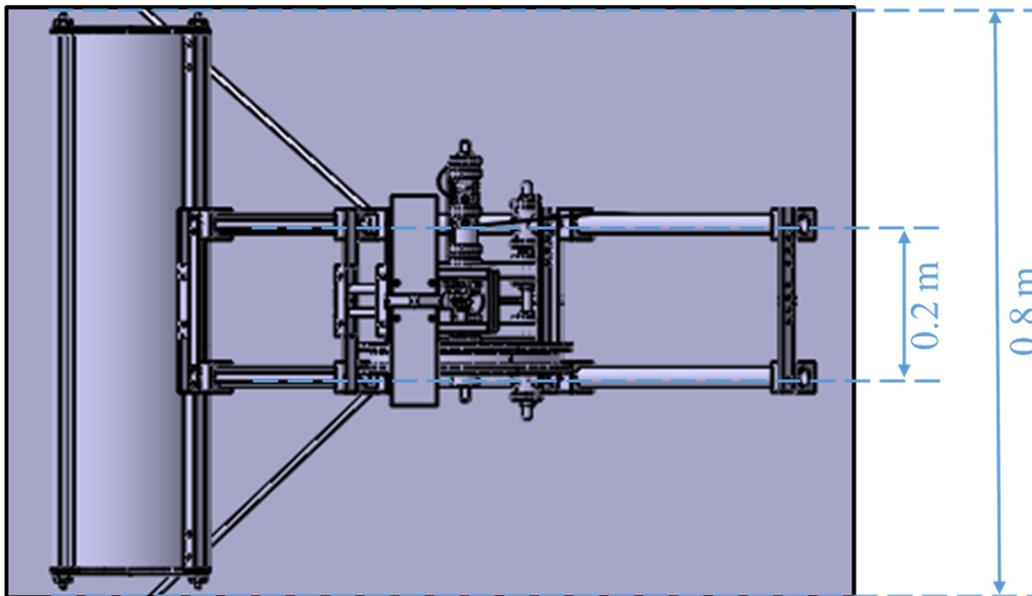


Figura 58.- Vista aérea del WEC MICO-1T.

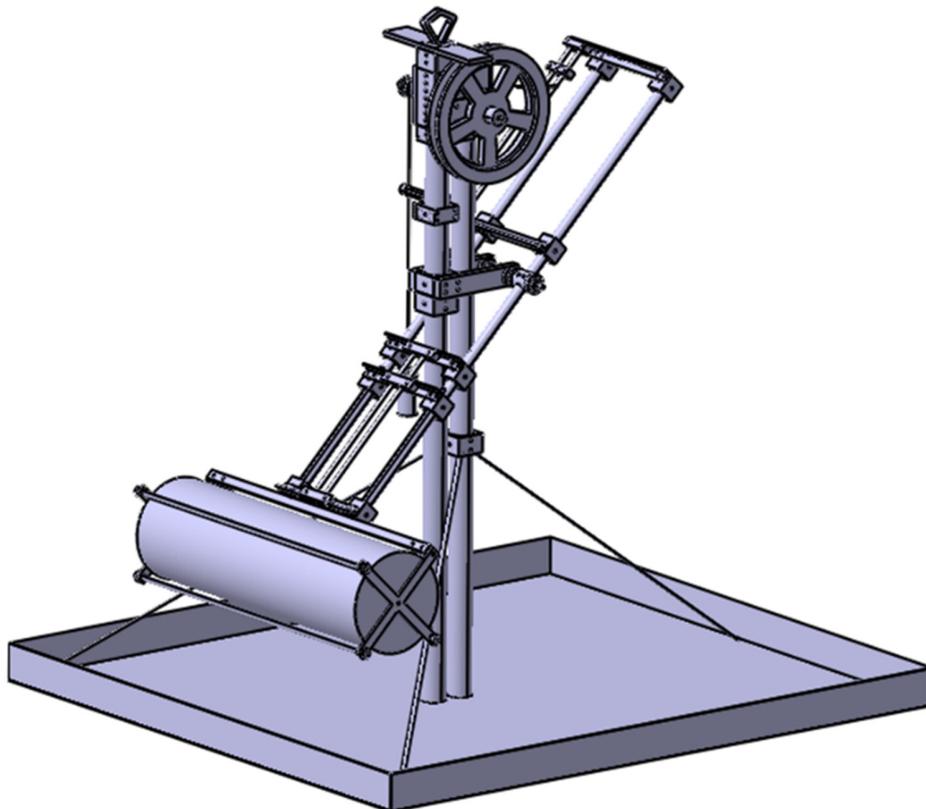


Figura 59.- Vista frontal del WEC MICO-1T.

## Diagrama del WEC MICO-2T

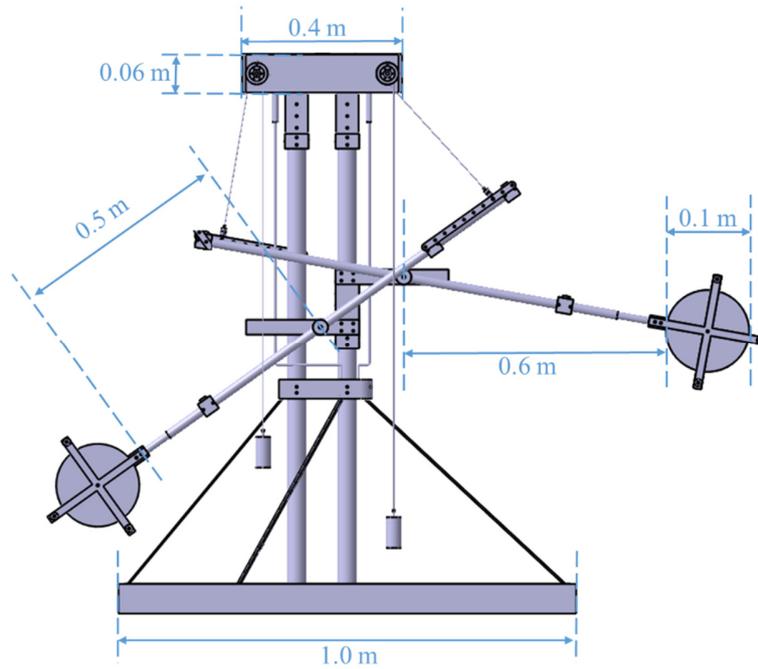


Figura 60.- Vista lateral del WEC MICO-2T.

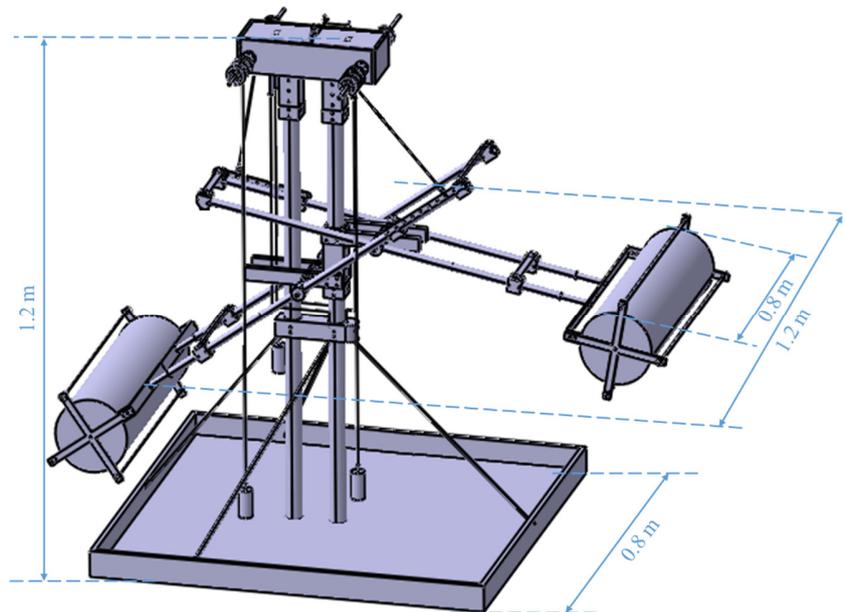


Figura 61.- Vista diagonal del WEC MICO-2T.

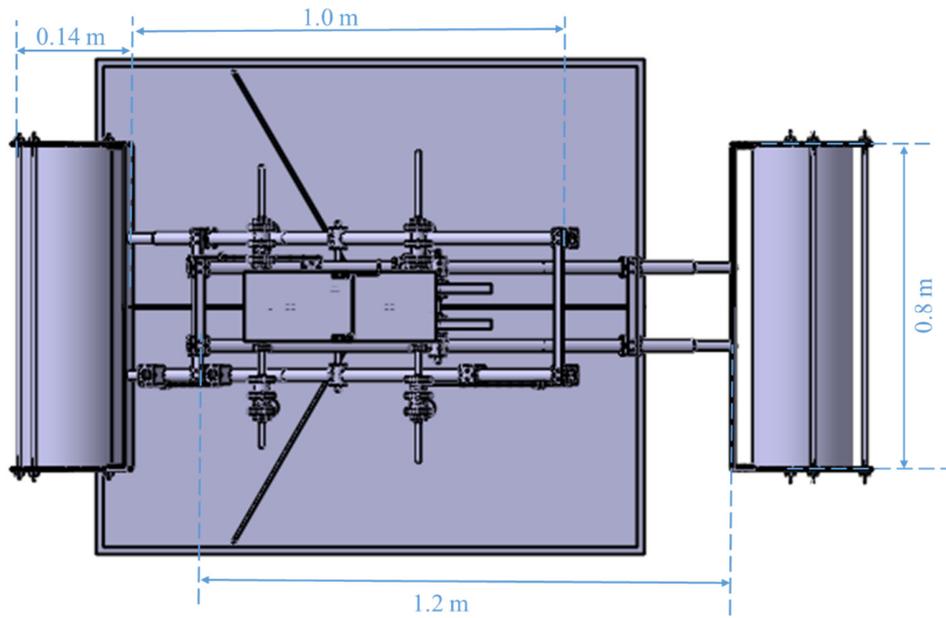


Figura 62.- Vista aérea del WEC MICO-2T.

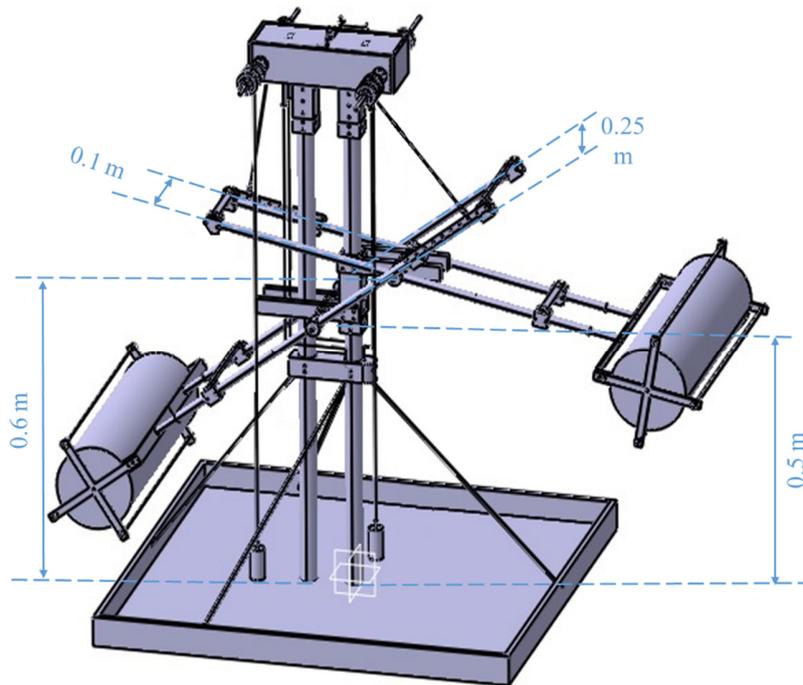


Figura 63.- Vista lateral del WEC MICO-2T.

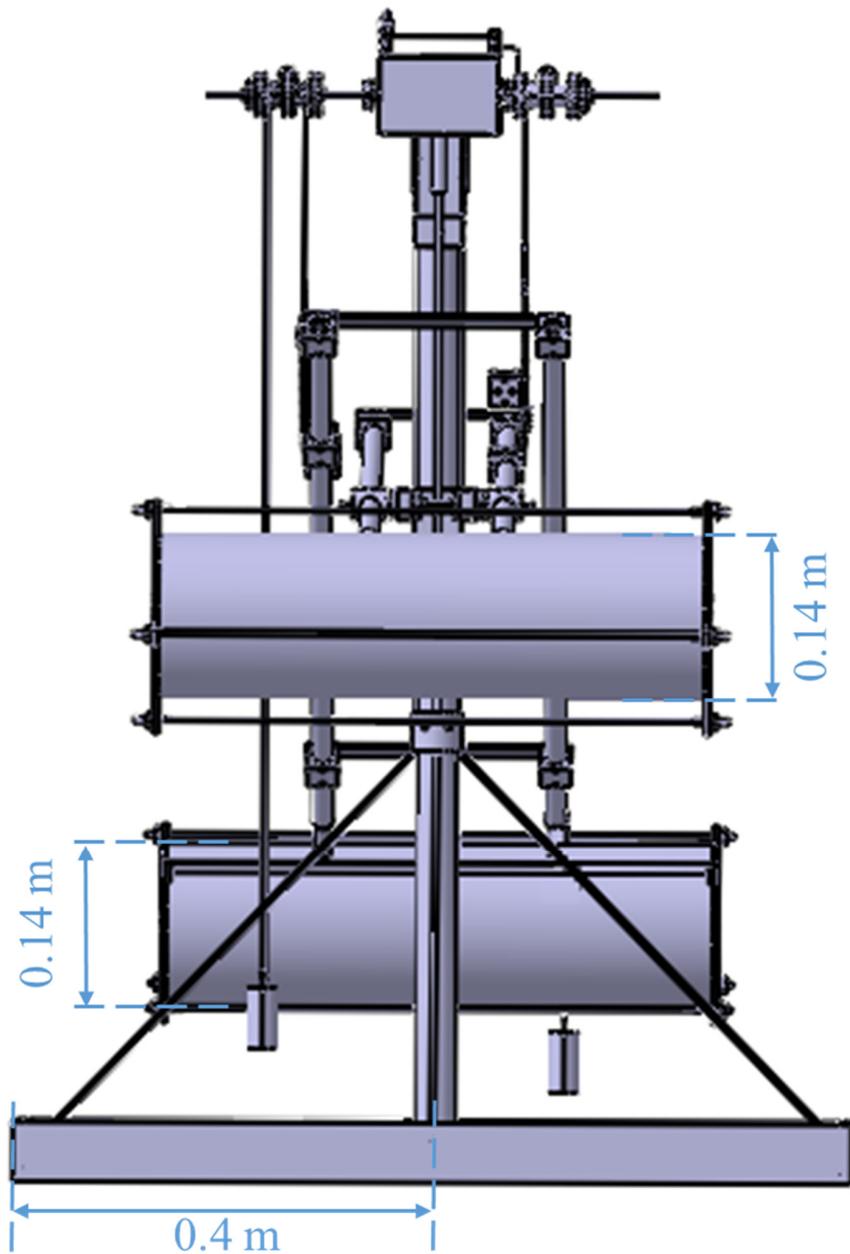


Figura 64.- Vista frontal del WEC MICO-2T.

## Diagrama del WEC UFCAP

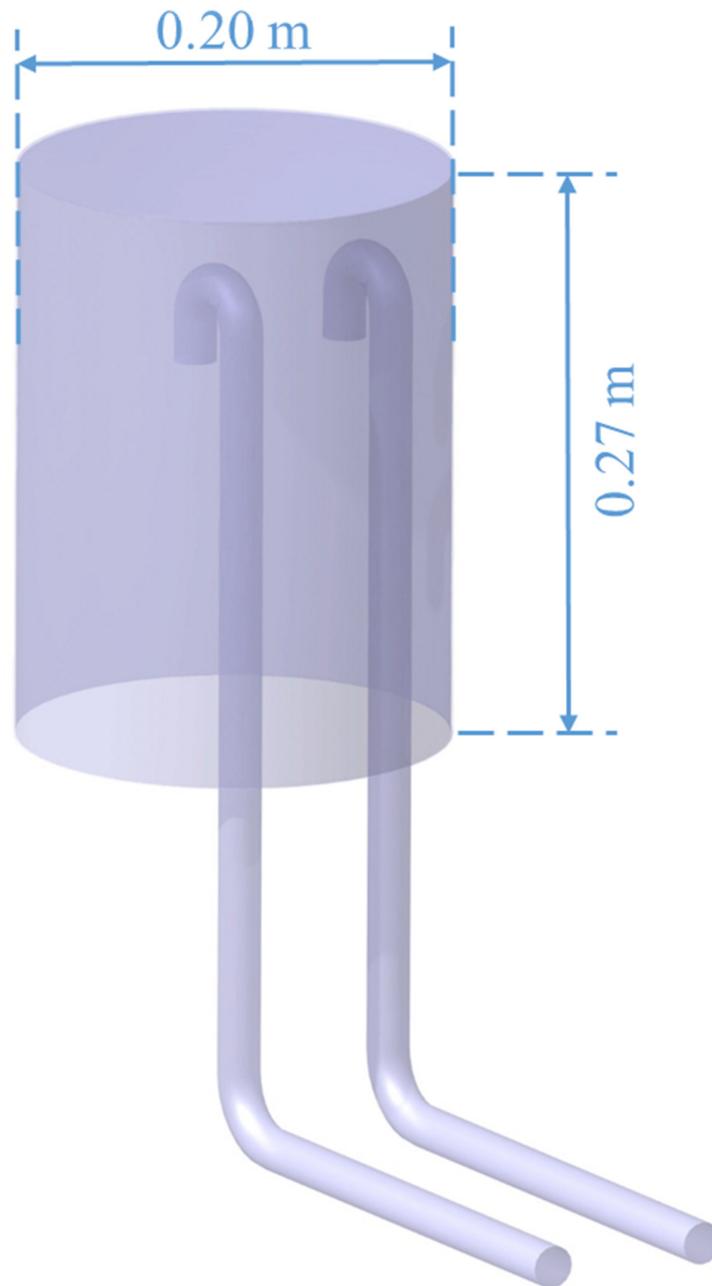


Figura 65.- Vista lateral del WEC UFCAP 1:32

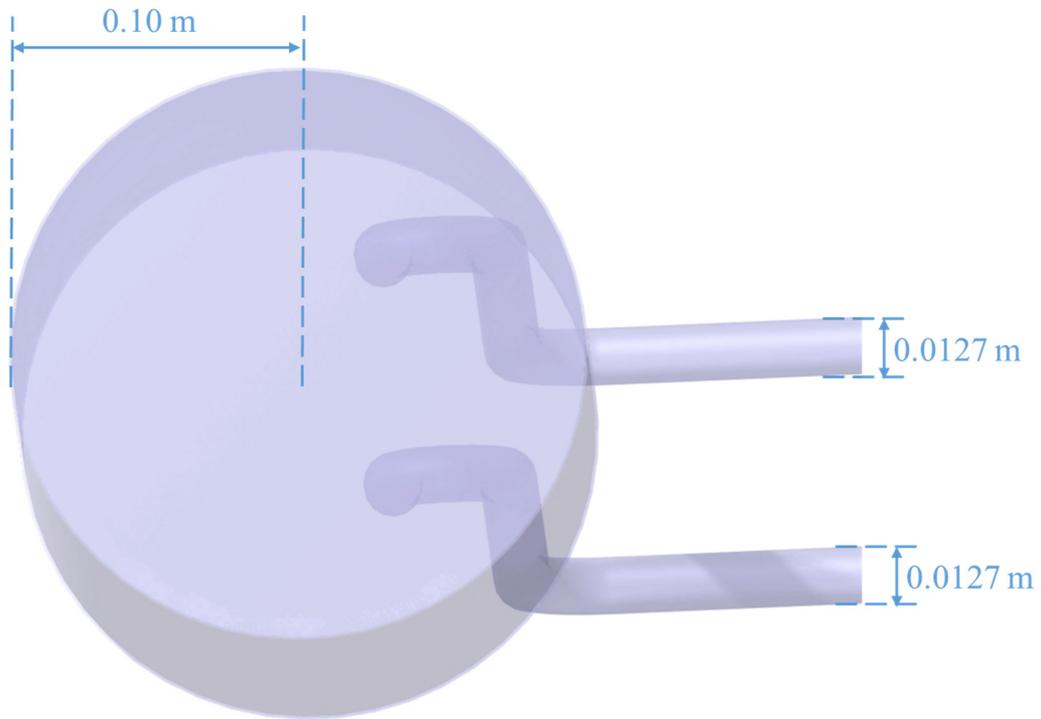


Figura 66.- Vista superior del WEC UFCAP 1:32

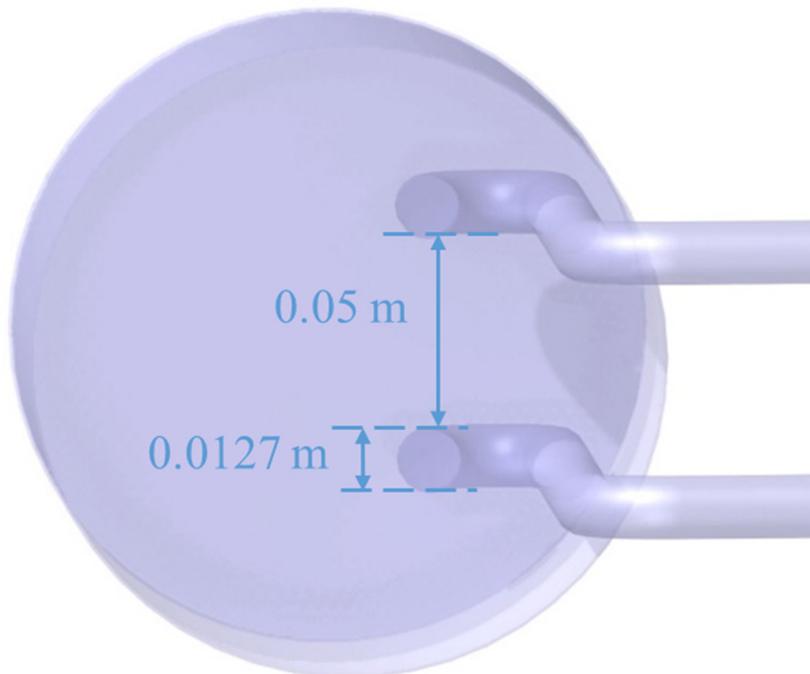


Figura 67.- Vista inferior del WEC UFCAP 1:32

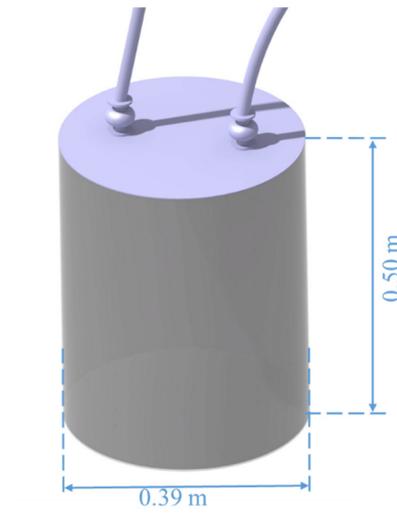


Figura 68.- Vista lateral del WEC UFCAP 1:17

## WEC DINA-EF

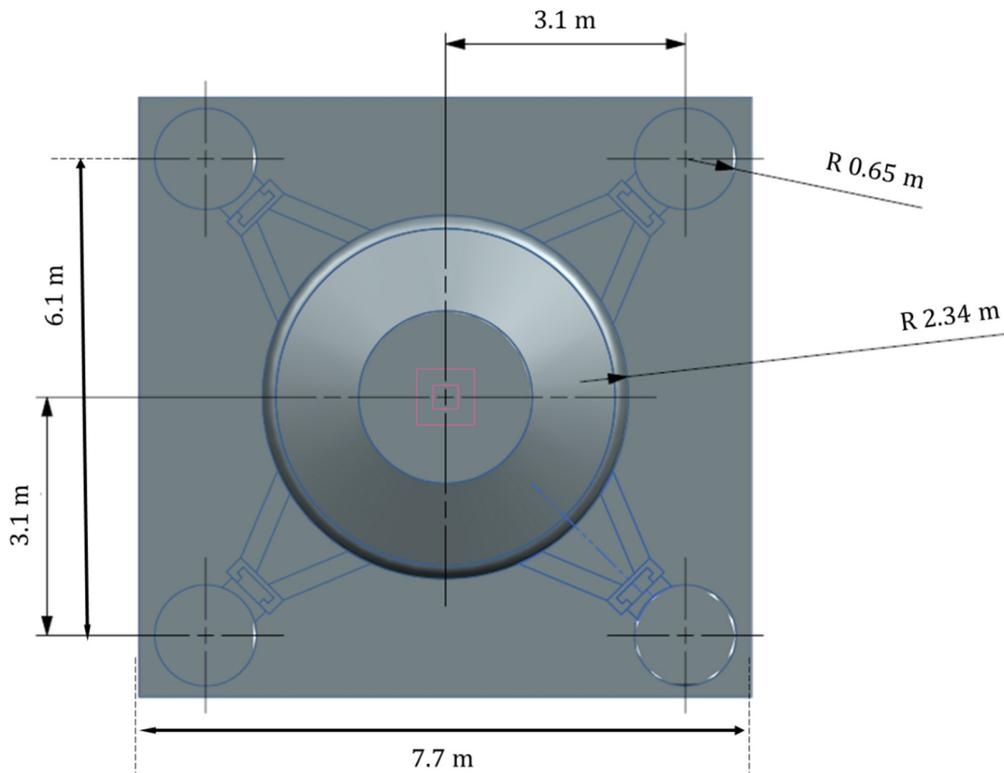


Figura 69.- Dimensiones de la cimentación del WEC DINA-EFII

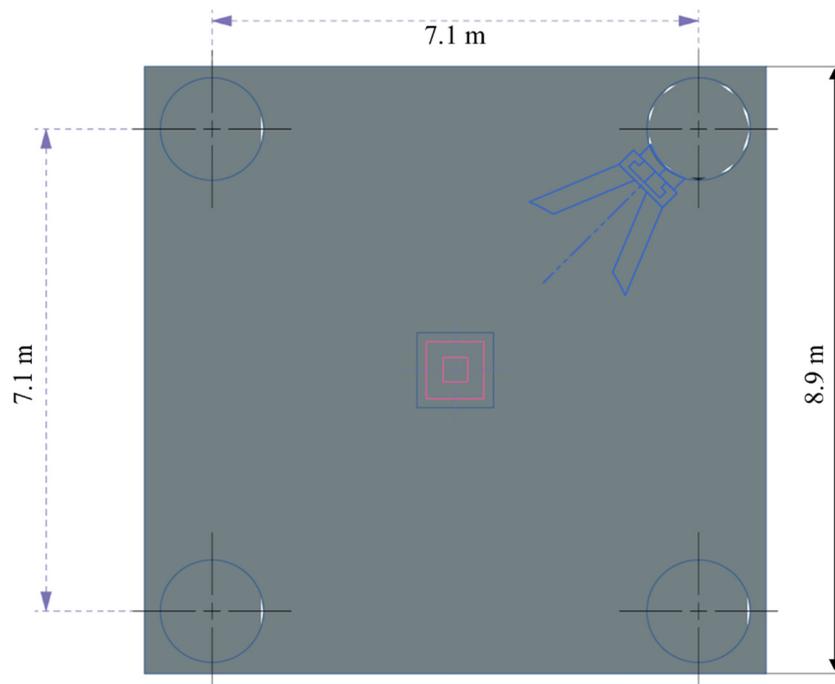


Figura 70.- Espaciamiento entre postes de cimentación del WEC DINA-EFII

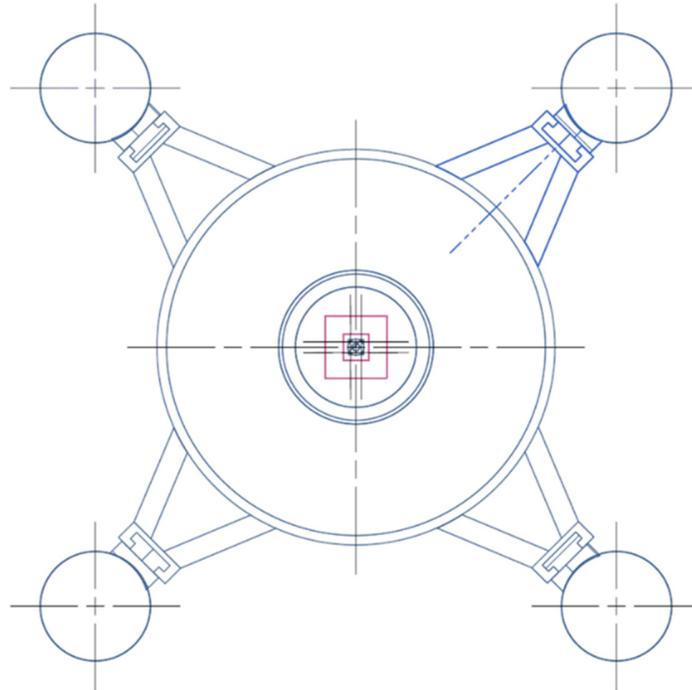


Figura 71.- Vista aérea de la cimentación y boya del WEC DNA-EFII

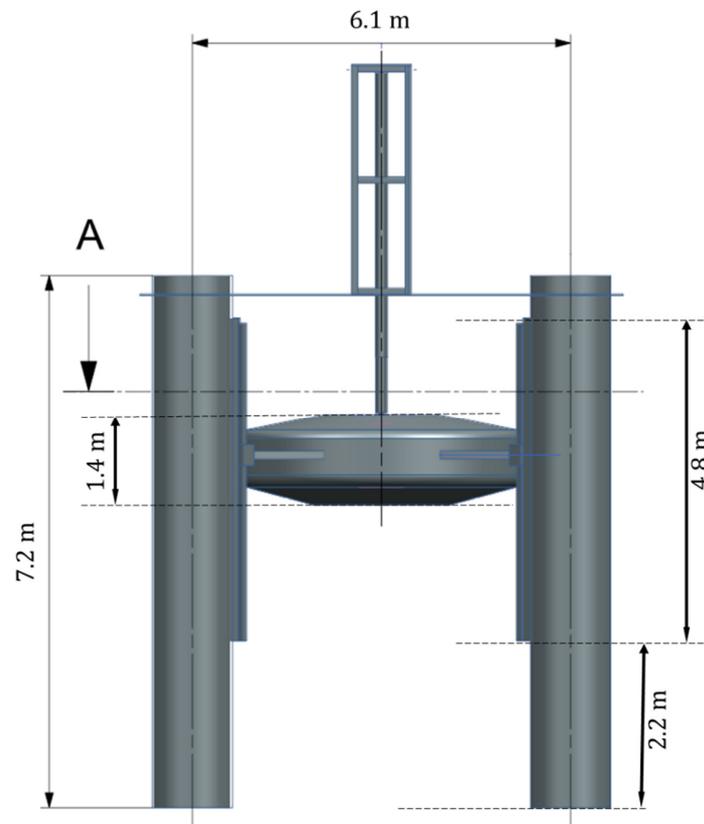


Figura 72.- Vista lateral de la cimentación del WEC DINA-EFII

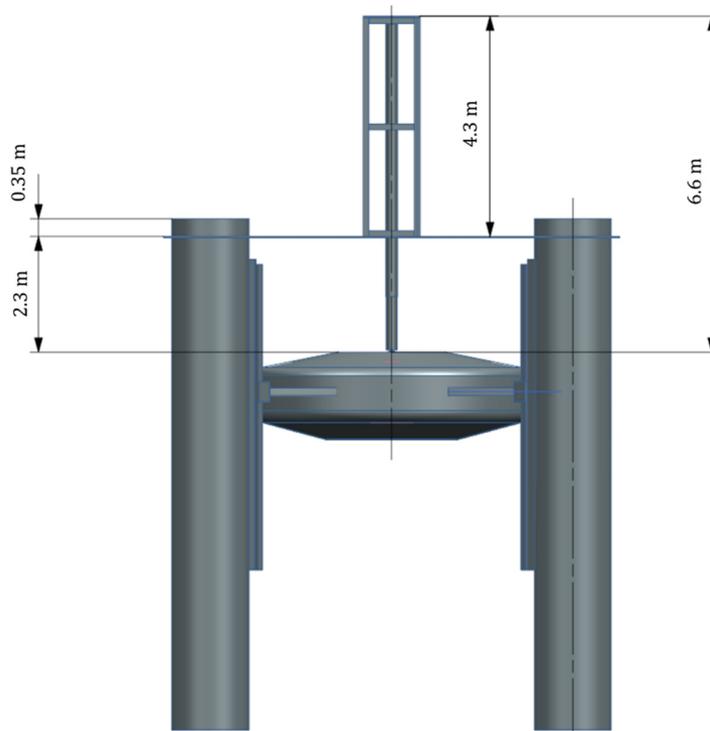


Figura 73.- Vista lateral de la cimentación del WEC DINA-EFII

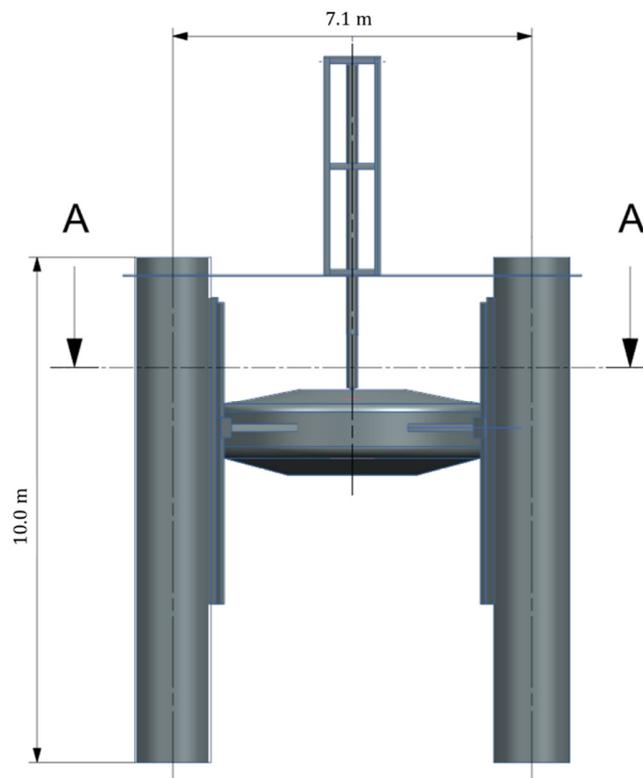


Figura 74.- Vista lateral de postes de cimentación del WEC DINA-EFII

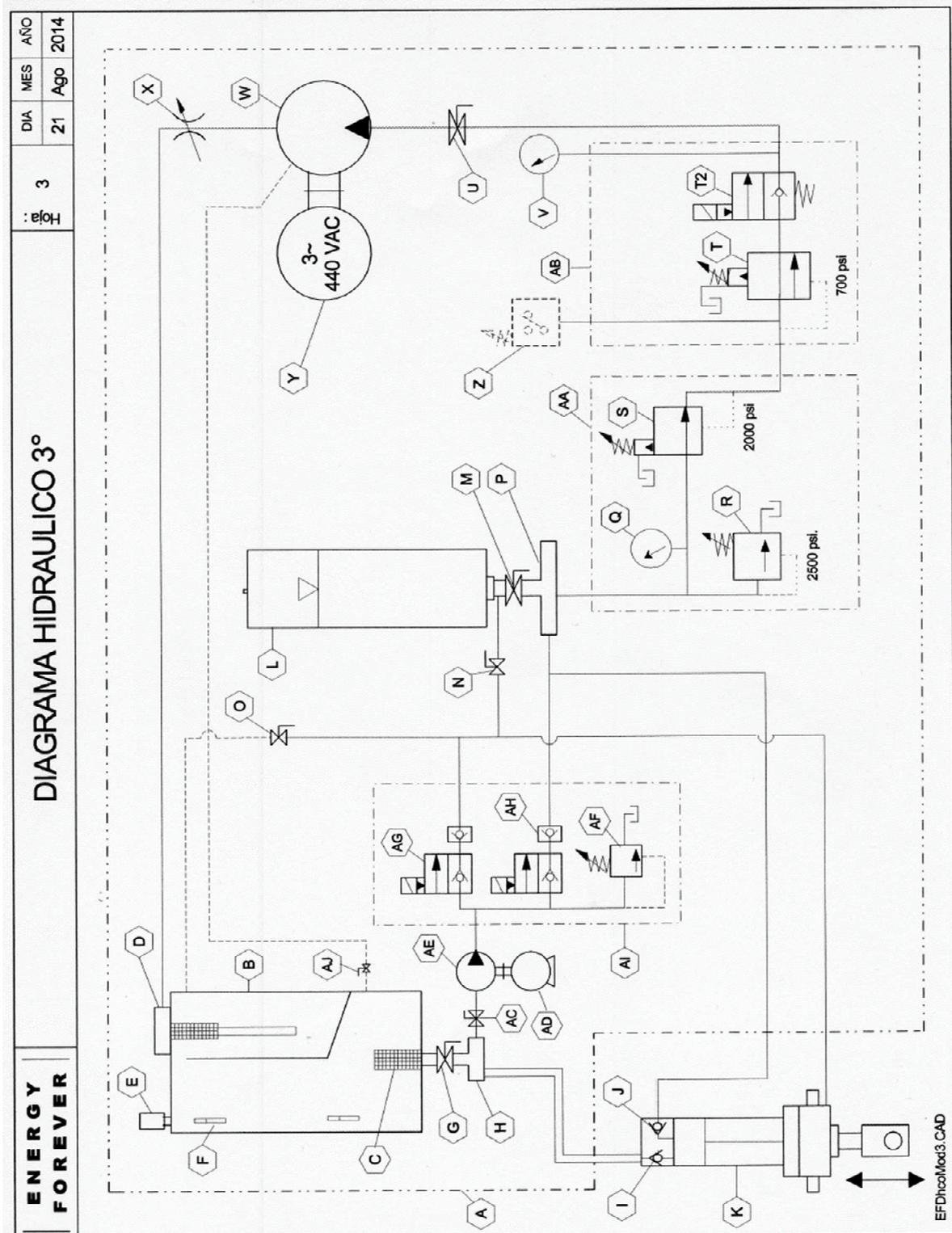


Figura 75-. Diagrama hidráulico del sistema conversión-generación del WEC DINA-EF

---

## Anexo B:

# Impactos Asociados a la Instalación y Operación de un WEC

---

La utilización de la energía del oleaje tiene diversos beneficios tanto ambientales como sociales. Así por ejemplo, en poblaciones de costas aisladas y pequeñas islas resulta una alternativa muy conveniente, además hay una reducción en la cantidad de gases emitidos a la atmósfera durante el transporte y uso del petróleo, mientras que en las líneas de conducción de electricidad se reducen pérdidas, costos de distribución e impacto visual. Además este tipo de estructuras suelen ser muy atractivas para los organismos acuáticos, convirtiéndose en sistemas artificiales de arrecifes y hábitat de muchas especies locales [Brooke 2003].

Sin embargo, además de las ventajas por la instalación de este tipo de dispositivos también existen desventajas e impactos que deben ser analizados a detalle antes y después de la instalación de un WEC, ya que dependiendo de una serie de aspectos como la morfodinámica de la playa, las condiciones hidrodinámicas, el diseño del WEC, el flujo de viento, la precipitación pluvial, la flora y fauna local entre otros, determinarán el grado de alteración del sitio. Por lo tanto en función del tipo de estructura a implementar los impactos pueden ser los siguientes:

### Impacto Ambiental

La principal alteración física y ambiental de la costa y la biodiversidad marina se tiene durante la etapa de construcción e instalación ya sea en la costa o mar a dentro [Brooke 2003], por lo cual los aspectos más importantes son:

- **Cambios en los patrones del flujo de sedimentos.** Dependiendo del tipo y tamaño de la estructura, pueden causar cambios en el flujo de sedimentos por lo que se requiere hacer estudios específicos que describan la interacción entre la estructura física y el medio marino.
- **Erosión costera:** La presencia de una estructura también puede modificar los patrones de oleaje locales y producir una acumulación o déficit de sedimentos en la base de la estructura y en los alrededores.
- **Sitios de construcción y mantenimiento:** Para este caso el principal impacto es visual y acústico debido a la maquinaria y herramientas utilizadas durante las maniobras de construcción y mantenimiento.
- **Recreación:** En zonas turísticas el principal impacto es visual, además la presencia de una estructura costera limita el uso del agua y playa para fines recreativos y deportivos convirtiéndose en una zona aislada.

- **Peligros para la navegación:** La presencia de una estructura puede limitar el tránsito de embarcaciones, sin embargo las luces de una planta de energía pueden servir como punto de referencia para los navegantes.
- **Biota marina:** Puede ser que durante la instalación de una planta tenga un impacto negativo, sin embargo, a largo plazo puede tener un impacto positivo al servir como refugio y generar un hábitad artificial para muchas especies marinas.
- **Pesca:** Los dispositivos diseñados para operar en aguas profundas podrían afectar las zonas de pesca, sin embargo los dispositivos instalados cerca de la costa pueden ayudar a la maricultura.
- **Especies en peligro de extinción:** Las estructuras grandes pueden actuar como una barrera impidiendo el paso de mamíferos poniendo en riesgo su hábitad alimenticio y de reproducción.

De forma general, la instalación de una estructura costera engloba una gran cantidad de aspectos importantes a evaluar, algunos beneficiaran más que otros sin embargo siempre se deberá procurar que los beneficios sean mayores.

### **Impacto Social**

La instalación de un sistema para captar energía undimotriz tiene una gran repercusión en la contribución del suministro energético local y nacional con menos impactos. Además permite que los sitios con estos sistemas en operación sean producto de fuentes de empleo, mejorando la economía local, conjuntamente con un notable avance tecnológico y un reconocimiento de status social.

Los principales impactos sociales se ven reflejados durante la construcción, operación, mantenimiento y desinstalación de un dispositivo undimotriz, ya que involucran aspectos económicos, culturales ideológicos y visuales principalmente durante su construcción y desinstalación.

### **Impacto Tecnológico**

A nivel mundial el desarrollo de sistemas para la captación de energía del oleaje es relativamente nuevo en comparación con otras fuentes de energía como las convencionales, por estas razones hay pocos desarrollos científicos implementados para su uso regular en la sociedad.

Los avances tecnológicos logrados en éste proyecto se espera puedan ser utilizados para establecer una base científica, metódica y práctica en proyectos undimotrices. Además, la construcción y puesta en marcha del prototipo en condiciones reales de operación permite encaminar a las futuras investigaciones para el aprovechamiento de la energía undimotriz en México.

---

## Anexo C:

# Posibles Usos de la Energía Undimotriz

---

Como es sabido, la energía cinética y potencial del oleaje puede ser aprovechada para aplicarse en múltiples procesos costeros, y con ello dar solución a distintas necesidades humanas, algunas de las cuales se describen a continuación.

### **Generación de energía eléctrica**

Con la implementación de dispositivos undimotrices se puede captar una parte de la energía contenida en el oleaje y transformarla en energía eléctrica, de tal forma que pueda ser utilizada para las distintas actividades humanas, llámese domésticas, industriales, hospitalarias, recreativas, etc.

### **Bombeo de agua**

La energía del oleaje también puede ser utilizada en sistemas de bombeo de agua desde la costa hasta los sitios en recuperación que han sido afectados por cambios topográficos. El bombeo de agua es una herramienta para el saneamiento de áreas marinas contaminadas, la acuicultura y la recuperación de lagunas costeras, como es el caso del proyecto SIBEO realizado por Penié y Czitron en 2003.

### **Generación y almacenamiento de hidrogeno**

Otro de los usos potenciales que pueden ser aplicados con la energía del oleaje es la generación de hidrogeno para sustituir el uso de hidrocarburos y uranio como fuente de energía. El hidrogeno tiene la ventaja de ser almacenable para su transporte y posterior uso, además de ser reciclable, tal como lo describe Sánchez en su estudio realizado en 2012.

### **Desalación de agua de mar**

Con el crecimiento de la población y la mejora de la calidad de vida aumenta exponencialmente la demanda de agua y energía reduciendo drásticamente las reservas, así mismo en zonas costeras donde la disponibilidad de agua dulce es muy limitada, es necesario recurrir a la desalación de agua del mar para abastecer paulatinamente el crecimiento de la demanda. En este sentido la energía del oleaje puede aplicarse directamente para el bombeo del agua o para generar energía eléctrica y accionar el sistema de bombeo durante el proceso de desalinización y distribución.



Erick Iván García Santiago

e-mail: [erickigs@hotmail.com](mailto:erickigs@hotmail.com) y [EGarciaS@iingen.unam.mx](mailto:EGarciaS@iingen.unam.mx)

