



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**POSGRADO EN CIENCIAS DEL MAR Y LIMNOLOGÍA**  
**INSTITUTO DE INGENIERÍA**  
Oceanografía Física

**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DE UN PROTOTIPO UNDIMOTRÍZ SOMETIDO A  
CONDICIONES REALES DE OPERACIÓN EN LA PENÍNSULA DE YUCATÁN.**

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

PRESENTA:  
**MIRIAM CAMPOS ZARATE**

DIRECTOR DE TESIS:  
DR. RODOLFO SILVA CASARÍN – Instituto de Ingeniería, UNAM

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTORAL  
DR. MIGUEL ÁNGEL ALATORRE MENDIETA – Instituto de Ciencias del Mar y  
Limnología, UNAM  
DRA. CECILIA ELIZABETH ENRÍQUEZ ORTÍZ – Facultad de Ciencias, UNAM  
DRA. MARÍA LUISA MARTÍNEZ VÁZQUEZ – Instituto de Ecología, CONAHCYT  
DR. EDGAR GERARDO MENDOZA BALDWIN – Instituto de Ingeniería, UNAM

**MÉXICO, D. F. SEPTIEMBRE 2023**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

## Contenido

1. Objetivo general.....	8
2. Objetivos particulares.....	8
3. Introducción .....	8
4. Recursos energéticos disponibles. ....	12
4.1. Fuentes no renovables .....	13
4.2. Fuentes renovables .....	13
4.3. Energía del océano.....	16
5. El oleaje como fuente de energía .....	27
5.1. Antecedentes en el uso de las olas como fuente de energía .....	28
5.2. La situación en México .....	32
5.3. Clasificación de los convertidores de energía WEC.....	34
5.3.1. Clasificación según su ubicación: .....	35
5.3.2. Clasificación según su tamaño y orientación:.....	36
5.3.3. Clasificación según su principio de funcionamiento:.....	37
5.4. Generación y eficiencia de algunos WEC que se han desarrollado .....	40
5.5. Impacto ambiental de los WEC .....	45
6. Caracterización del oleaje .....	49
6.1. Descripción de las olas .....	49
6.1.1. Parámetros característicos de las ondas.....	52
6.1.2. Clasificación de las ondas de acuerdo con la profundidad .....	54
6.1.3. Clasificación de las ondas de acuerdo con el periodo $T$ , fuerza generadora y fuerza restauradora .....	54
6.2. Clasificación del oleaje .....	56
6.2.1. Oleaje local o <i>Sea</i> .....	57
6.2.2. Oleaje distante o <i>Swell</i> .....	58
6.3. Propagación del oleaje .....	59
6.4. Transformación del oleaje.....	60

---

6.4.1. Someramiento.....	61
6.4.2. Refracción.....	61
6.4.3. Difracción.....	62
6.4.4. Reflexión.....	62
6.5. Energía de la ola.....	64
6.6. Potencia de la ola.....	65
6.7. Estado de mar.....	66
6.8. Generalidades estadísticas.....	66
7. Materiales y Métodos.....	67
7.1. Instrumentación.....	72
7.2. Zona de prueba.....	76
7.3. Obtención y registro de datos.....	77
8. Procesamiento de datos.....	78
9. Análisis y discusión de resultados.....	81
9.1. Descripción del evento A.....	88
9.2. Descripción del evento B.....	90
9.3. Conclusión.....	96
10. Bibliografía.....	98
Anexo 1.....	102
Anexo 2.....	113
Regimen Medio LPM0.....	115
Regimen Medio LPM1.....	118
Regimen Medio LPM2.....	121
Regimen Medio LPM3.....	124
Regimen Medio LPM4.....	127
Régimen extremal.....	129
Calulo de la potencia.....	131

- Fig. 1. Concentración de dióxido de carbono en la atmósfera. Adaptado de, Carbon Dioxide Measurements NOAA ESRL Carbon Cycle, Global monitoring Laboratory, 2021, <https://gml.noaa.gov/ccgg/data/> [2]. ..... 9
- Fig. 2. Mapa mundial de consumo de energía procedente de combustibles fósiles. Adaptado de Consumo de energía procedente de combustibles fósiles (% del total), Banco Mundial, 2015, <http://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.COMM.FO.ZS/countries?display=map>. ..... 10
- Fig. 3. Cuota estimada de energía renovable de la producción mundial de energía. Adaptado de Participación estimada de la energía renovable en la producción mundial de electricidad, Global Status Report, REN21, 2015, <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/> ..... 11
- Fig. 4. Esquema la utilidad de la biomasa marina para generar energía y otros productos. Adaptado de El cultivo de macroalgas marinas como una fuente renovable y limpia para producir bioetanol como biocarburante, Peteiro, et al, 2012 (Peteiro et al., 2015). ..... 18
- Fig. 5. Mapa de Salinidad en la superficie de los océanos. Adaptado de Aquarius Sea Surface Salinity 2011-2014 – Flat Maps, NASA, 2016, <https://svs.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/details.cgi?aid=4233> (SVS, 2017) ..... 20
- Fig. 6. **l.zq.** Esquema de funcionamiento de un PRO, **Der.** Esquema de funcionamiento de un RED. Adaptado de Salinity Power Plants May be the Next Eco-Power Generating Tech, 2017, <https://www.fastcompany.com/1185670/salinity-power-plants-may-be-next-eco-power-generating-tech> (Fastcompany). ..... 21
- Fig. 7. a) Ciclo abierto, b) Ciclo cerrado. Adaptado de Ocean Thermal Energy Conversion, Harrison, 2010, <http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/harrison2/> (Harrison, 2010) ..... 23
- Fig. 8. Mapa amplitud de altura de la superficie del océano M2 en m. Adaptado de Global Inverse Tide Model, 2017 [https://www.esr.org/polar\\_tide\\_models/Model\\_TPXO71.html](https://www.esr.org/polar_tide_models/Model_TPXO71.html) (Earth and Space Research, 2017). ..... 25
- Fig. 9. Mapa mundial de la disponibilidad media anual de energía del oleaje en kW por metro de ancho de ola. Adaptado de Quantifying the global wave power resource, Gunn, Stock-Williams, 2012 (Gunn & Stock-Williams, 2012)..... 27
- Fig. 10. Boya diseñada por Masudo basada en OWC. Adaptado de Modelling of wave energy Conersion, Falcão, 2014 (Falcão, 2014). ..... 28
- Fig. 11. Embarcación diseñada por Yoshio Masudo basada en OWC. Adaptado de Modelling of wave energy Conersion, Falcão, 2014 (Falcão, 2014). ..... 29
- Fig. 12. **l.zq.** Planta de energía de Olas, Tapchan, Noruega en 1985, **Der.** Planta Tapchan destruida. Adaptado de Toftestallen, Coastal and Oceanic photography in full storm- and in beautiful weather, 2015, [http://www.tunliweb.no/SM/alb\\_havet.htm](http://www.tunliweb.no/SM/alb_havet.htm) ..... 30

Fig. 13. Prototipo LIMPET, Escocia. Adaptado de A review of oscillating water columns, Heath, 2012 (Heath, 2012).....	31
Fig. 14. <b>Izq.</b> planta PICO, Japón. Adaptado de Pico Wave Plant, 2017, <a href="http://www.wavec.org/en/projects/pico_plant.files/54/pico_plant.html">http://www.wavec.org/en/projects/pico_plant.files/54/pico_plant.html</a> . (WAVEC, 2017); <b>Der.</b> Planta Bottom-standing OWC, India. Adaptado de Découvrir et comprendre, 2017, <a href="https://www.edf.fr/groupe-edf/producteur-industriel/energies-renouvelables/hydraulique/edf-hydraulique-bretagne-normandie/l-usine-maremotrice-de-la-rance/decouvrir-et-comprendre.files/52/decouvrir-et-comprendre.html">https://www.edf.fr/groupe-edf/producteur-industriel/energies-renouvelables/hydraulique/edf-hydraulique-bretagne-normandie/l-usine-maremotrice-de-la-rance/decouvrir-et-comprendre.files/52/decouvrir-et-comprendre.html</a> , (EDF, 2016). .....	31
Fig. 15. Blow-Jet durante pruebas. Adaptado de Wave Energy Conersion Using a BLOW-JET System, Mendoza, et al, 2011 (Chávez et al., 2010).....	33
Fig. 16. Localización de los WEC. Adaptado de Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment, López, et al, 2013 (López et al., 2013) .....	35
Fig. 17. Clasificación de WEC según su orientación. Adaptado de Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment, López, et al, 2013 (López et al., 2013).....	37
Fig. 18 Clasificación de algunos WEC según sus características. Adaptado de Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment, López, et al, 2013 (López et al., 2013). .....	39
Fig. 19. Porcentaje de desarrollo para cada WEC. Adaptado con los mismos datos de Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment, López, et al, 2013 (López et al., 2013). .....	40
Fig. 20. Representación de la estructura del oleaje aleatorio. Adaptado de Practical methods for observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics, Pierson, et al, 1971 (Pierson Jr et al., 1971). .....	51
Fig. 21. Representación sinusoidal y parámetros de las olas. ....	53
Fig. 22. Clasificación de las ondas de acuerdo con diferentes características. Adaptado de Análisis y descripción estadística del oleaje, Silva, 2005 (Silva Casarín, 2005). .....	55
Fig. 23. Área de generación del oleaje y tipo de oleaje que origina. Adaptado de Types of ocean surface waves, wave classification, Toffoli, Bitner-Gregersen, 2017 (Toffoli & Bitner-Gregersen, 2017). .....	57
Fig. 24. <b>Izq.</b> Oleaje tipo Sea, <b>Der.</b> Oleaje tipo Swell.....	59
Fig. 25. Transformación del oleaje. Adaptado de Hydrodynamics of coastal regions, Svendsen-Jonsson, 1976 (Svendsen et al., 1976).....	64
Fig. 26. Esquema original MICO T1. Adaptado de Laboratorio de Investigación Sexto Sol, García, 2014 . .....	69

Fig. 27. MICO T1 con adaptaciones finales. <b>1</b> Base de solera, <b>2</b> Trepano para suelo arenoso, <b>3</b> Vigas de soporte, <b>4</b> Poste para base de chasis, <b>5</b> Ángulos de aluminio para colocación de instrumentación, <b>6</b> Chasis de generación de mayor tamaño.....	71
Fig. 28. Componentes del banco de adquisición de datos del MICO T1. a) Sensor de presión Keller PR-36X. b) Semiconductor LM-335Z. c) Sensor de corriente Tamura L03S050D15. d) Equipo para captura de datos cRIO-9024. e) Tarjeta de conversión analógica-digital NI-9205. f) Acces Point Moxa AWK-3121 .....	72
Fig. 29. Panel solar y luz de señalización instalados en el chasis de generación del MICO-1T. ....	73
Fig. 30. Banco de resistencias.....	74
Fig. 31. Diagrama del sistema de adquisición de datos.....	75
Fig. 32. UASA (Unidad Académica Sistemas Arrecifales) Puerto Morelos, Q. Roo. Adaptado de Google Earth, 2023, <a href="https://earth.google.com/web/@0,-57.634,0a,22251752.77375655d,35y,0h,0t,0r">https://earth.google.com/web/@0,-57.634,0a,22251752.77375655d,35y,0h,0t,0r</a> .....	76
Fig. 33. Aplicación para el procesamiento de archivos de salida del sistema de captura. ....	78
Fig. 34. Vista del programa de captura en funcionamiento.....	79
Fig. 35. Opciones de configuración del programa de captura.....	80
Fig. 36. Ubicación de los sensores de presión. Der. parte frontal del MICO-1T, Izq. parte posterior .....	81
Fig. 37. Rosa de oleaje estacional del centro de la laguna arrecifal. ....	83
Fig. 38. Rosa de los vientos del 30 de enero de 2016 al 16 de marzo de 2016. ....	84
Fig. 39. Incidencia de las olas sobre el MICO-1T durante el evento de mayor generación de energía <b>A</b> .....	89
Fig. 40. Incidencia de las olas sobre el MICO-1T durante el evento <b>B</b> .....	92
Fig. 41. Vista de la boya con movimiento oscilatorio respecto a los brazos que la unen a la estructura principal. ....	93
Fig. 42. Daños en la sujeción de la boya con el brazo. ....	94
Fig. 43. <b>1.</b> Día 1 en el sitio de emplazamiento. <b>2.</b> Día 31 en funcionamiento, se observa crecimiento de algas sobre la estructura y peces pequeños alimentándose. <b>3.</b> Día 48, se observa aumento en el tamaño de las algas y peces de mayor tamaño que irrumpieron bajo la base. ....	96
Fig. 44. Batimetría de la laguna arrecifal y ubicación de equipos. ....	114
Fig. 45. Rosa de oleaje LPM0. ....	115

---

Fig. 46. Rosas de oleaje mensual de LPM0.....	116
Fig. 47. Rosa de oleaje LPM1. ....	118
Fig. 48. Rosas de oleaje mensual de LPM1.....	119
Fig. 49. Rosa de oleaje LPM2. ....	121
Fig. 50. Rosas de oleaje mensual de LPM2.....	122
Fig. 51. Rosa de oleaje LPM3. ....	124
Fig. 52. Rosas de oleaje mensual de LPM3.....	125
Fig. 53. Rosa de oleaje LPM4. ....	127
Fig. 54. Rosas de oleaje mensual de LPM4.....	128
Fig. 55. Distribución temporal de la potencia por metro de frente de ola en kw/m para toda la serie de LPM3. ....	132
Fig. 56. Altura significativa de LPM1 con un altura umbral de 0.77 m. ....	133
Fig. 57. Altura significativa de LPM3 con una altura umbral de 2.7 m. ....	133

## 1. Objetivo general

Determinar la eficiencia y los efectos hidrodinámicos de un convertidor de energía tipo flotante a partir de las oscilaciones asociadas al oleaje.

## 2. Objetivos particulares

- Construir y colocar el dispositivo en condiciones reales de operación
- Determinar de qué manera el dispositivo puede alterar el oleaje y la dinámica costera
- Establecer una metodología para el diseño funcional y de protección de sistemas flotantes de generación de energía.
- Emitir recomendaciones respecto de posibles mejoras en el funcionamiento hidráulico y la estructura de los dispositivos, a fin de mejorar su eficiencia y estabilidad.
- Proponer recomendaciones para la optimización de sistemas multipropósito

## 3. Introducción

La economía mundial demanda cada día más energía para seguir con el crecimiento económico, mejorar el nivel de vida y disminuir la pobreza de la población. Pero las actuales tendencias en su uso no son sostenibles. A medida que aumenta la población mundial; que ahora es de 7100 millones aproximadamente y para 2050 se estima que será de más de 9000 millones, las economías se industrializarán y las fuentes de energía no renovable se tornarán más escasas y costosas [1]. Además, desde la revolución industrial, el CO<sup>2</sup> atmosférico aumento en un 50% desde 1975 (

Fig. 1)[2].

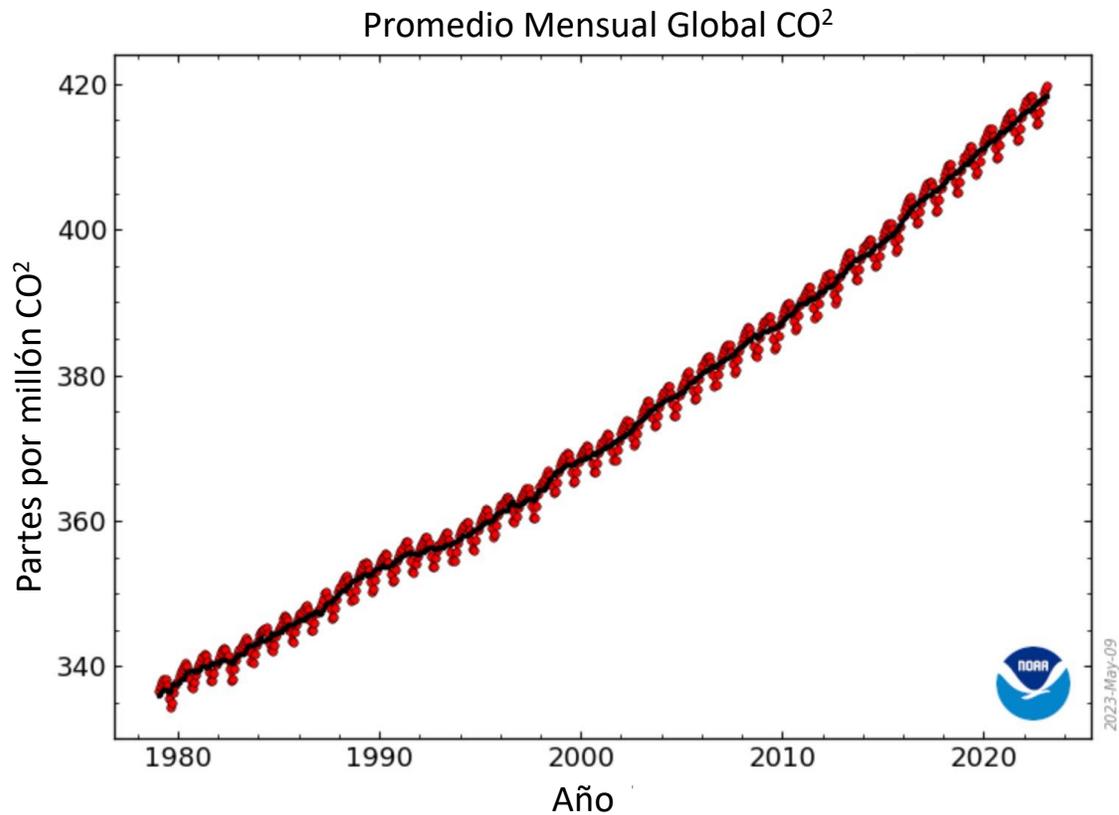
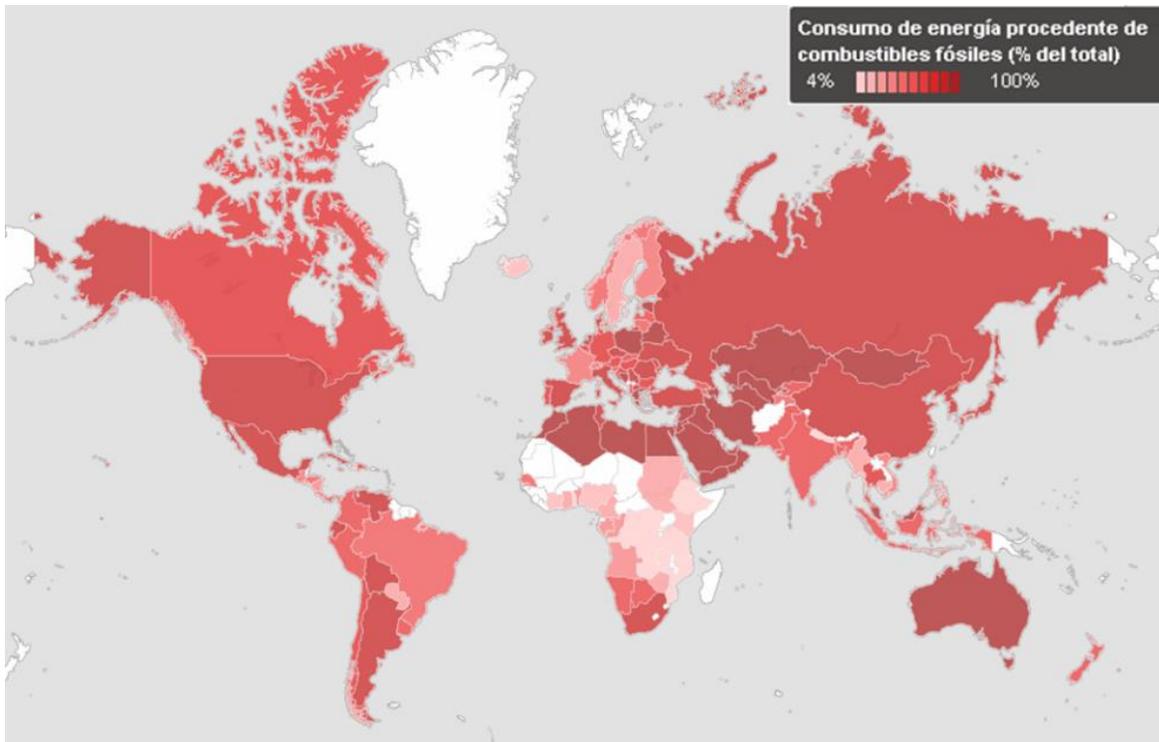


Fig. 1. Concentración de dióxido de carbono en la atmósfera. Adaptado de, *Carbon Dioxide Measurements NOAA ESRL Carbon Cycle, Global monitoring Laboratory*, 2021, <https://gml.noaa.gov/ccgg/data/> [2].

A nivel mundial, de acuerdo con cifras del Banco Mundial en 2012, fueron empleados 81.2 % del consumo total de energía proveniente de fuentes fósiles. Para el caso de México, esta cifra se sitúa un 90.1 % del consumo energético proveniente de fuentes fósiles, ver Fig. 2. Durante el período 1990 a 2011 hubo un incremento en el consumo de energía estimado en 2 %. Para México, la situación es crítica, ya que el yacimiento Cantarell, el más importante, ha disminuido su producción desde 2008 [1].



*Fig. 2. Mapa mundial de consumo de energía procedente de combustibles fósiles.*  
Adaptado de Consumo de energía procedente de combustibles fósiles (% del total), Banco Mundial, 2015,  
<http://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.COMM.FO.ZS/countries?display=map>. [1].

En un escenario mundial caracterizado por una creciente demanda de energía y la presión sobre las fuentes fósiles es cada vez más intensa, se está provocando el encarecimiento de sus derivados, la progresiva disminución de sus reservas, así como el avance del efecto invernadero, entre otras. Si se desea alcanzar un sistema energético sostenible, es imprescindible que una parte del consumo mundial de energía se satisfaga a partir de fuentes renovables. Sumado a esto, México ratificó su compromiso con el Protocolo de Kioto en 2012 [3] y en 2016 reafirmó su apoyo en el Acuerdo de París con el cual se compromete a reducir las emisiones de CO<sub>2</sub> para combatir el cambio climático y el calentamiento global [4].

El esfuerzo que se hace en investigación para migrar a fuentes de energía menos contaminantes y de carácter renovable, demuestra que el cambio es factible y que pueden sustituir de una forma significativa el uso de hidrocarburos. Por ello se han

creado fondos, centros de investigación y proyectos en diferentes partes del mundo para desarrollar tecnología enfocada al aprovechamiento de fuentes alternativas de energía que ya se comienzan a escuchar con más frecuencia. Tales son los casos de las energías geotérmica, eólica, solar, oceánica, por mencionar algunas. A pesar de la disminución de las reservas del petróleo, hasta 2013 las energías renovables solo tenían una participación del 22.8% consumo mundial de energía eléctrica (Fig. 3) y de éstas solo el 10% proviene de fuentes renovables modernas y el restante 90% de la biomasa. La capacidad instalada de energías renovables aumentó 8.3% en 2013 lo que representó el 56% de la adición neta a la capacidad eléctrica global [5].

Participación estimada de la energía renovable en la producción mundial de electricidad, finales del 2014

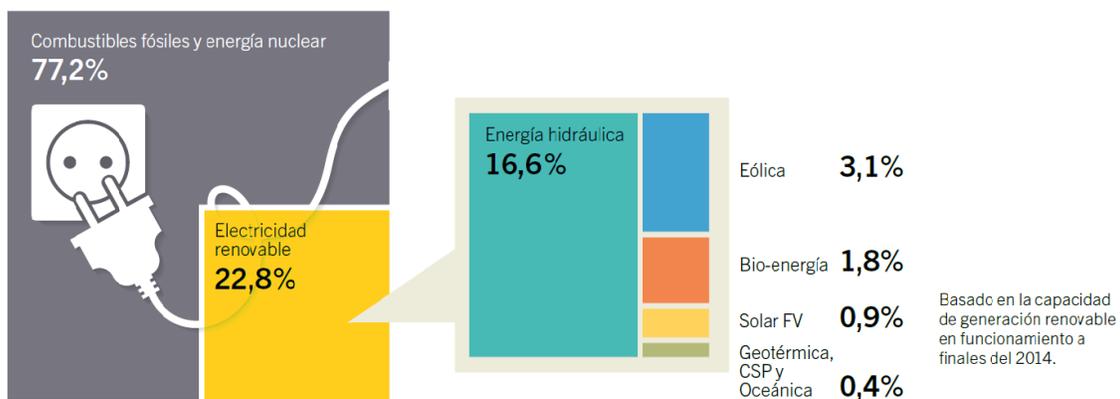


Fig. 3. Cuota estimada de energía renovable de la producción mundial de energía. Adaptado de *Participación estimada de la energía renovable en la producción mundial de electricidad*, Global Status Report, REN21, 2015, <https://www.ren21.net/reports/global-status-report/> [5].

En la transición hacia un futuro de energía no contaminante, se necesita explorar los caminos para todas las formas de energía renovable para que se desarrolle y despliegue totalmente este potencial, además que sea competitiva y funcione de manera sostenible.

En los últimos años se ha dado un gran crecimiento y reducción de costos con algunas energías renovables, especialmente la energía eólica y la energía solar

fotovoltaica. Las perspectivas de implementación de estas tecnologías ya son una realidad. Sin embargo, esto todavía no es el caso para otras formas de energía renovable. La energía del océano es un ejemplo notable de un recurso renovable con un potencial enorme, pero forma sólo una parte muy pequeña en el mix energético mundial hasta la fecha [5].

El gran potencial de los océanos del mundo para satisfacer las futuras necesidades de energía es muy vasto. El reto de aprovechar esta gran reserva de energía no contaminante y renovable *per se* ha despertado la curiosidad, así como la ambición de la humanidad durante mucho tiempo. Este sigue siendo el caso hoy en día, en medio de notables innovaciones, avances en la investigación y desarrollo relacionados con las tecnologías energéticas oceánicas.

En particular, esta investigación se centró en la energía de las olas que puede ser aprovechada para suministrar electricidad y la eficiencia de conversión de esta energía, con el diseño del Módulo Independiente de Captura de Olas de Un Tiempo MICOT1 a escala 1:10, que surgió a partir del modelo a escala 1:20 y con el cual se obtuvo una eficiencia de 37 % [6].

#### 4. Recursos energéticos disponibles.

El ser humano está rodeado de energía. Todo lo que se mueve y se transforma o lo que se puede percibir en la naturaleza es producto de algún tipo de energía. Cuando se habla de energía se hace referencia a aquella propiedad que permite a cualquier objeto realizar algún trabajo.

Los recursos energéticos se dividen en fuentes no renovables, cuyos recursos se encuentran limitados en la naturaleza, y fuentes renovables.

#### 4.1. Fuentes no renovables

Las fuentes no renovables son todos aquellos recursos que se encuentran en una cantidad limitada en el planeta, y que con el tiempo desaparecen al conformar un sistema en el que solo hay salidas por gasto y ninguna entrada. Esto se debe a que la mayoría de estos recursos se originan por la acción de los agentes geológicos internos y por tanto su síntesis es extremadamente lenta, lo que origina que su tasa de consumo sea muy superior a su tasa de síntesis, convirtiéndolos en un recurso limitado. [7]. Estas fuentes de energía son el petróleo, el gas natural y la energía nuclear.

#### 4.2. Fuentes renovables

Las energías renovables que se destacan mayormente han constituido una parte importante de la energía utilizada por los humanos desde la edad media, la hidráulica y posteriormente la eólica y la solar. La navegación a vela, los molinos de viento o de agua y las disposiciones constructivas de los edificios para aprovechar la radiación del sol, son buenos ejemplos de ello.

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), a través del Reporte Global de las Energías Renovables, establece que México invirtió 2,500 millones de dólares, lo equivalente a 1% de la inversión mundial total, siendo el país del G-20 con las menores inversiones, a pesar de contar con un potencial de 70% en el nivel de insolación, alta intensidad de vientos, capacidad para instalar plantas hidráulicas pequeñas y ocupar el cuarto lugar a nivel internacional para campos geotérmicos, según el Centro de Investigación para el Desarrollo A.C. (CIDAC) [8].

En 2014 las energías renovables representaron aproximadamente el 58,5% de las adiciones netas en la capacidad mundial de generación de energía. Las energías hidráulica, eólica y solar tendieron a dominar el mercado. Hacia el final 2014, las energías renovables constituyeron un estimado del 27,7% de la capacidad

generadora de energía del planeta, misma que es suficiente para abastecer cerca del 22,8% de la electricidad mundial [5].

Las 7 principales fuentes de energía renovable son:

- Energía solar

La energía solar es la fuente de energía más abundante, proporciona un suministro ilimitado de energía que se puede aprovechar para generar calor y electricidad.

Casi toda la energía de la que se dispone proviene del Sol. Él es responsable del movimiento de las masas de aire, de la evaporación de las aguas superficiales, de la formación de nubes, de las lluvias y, por consiguiente, de los saltos de agua. Su calor y su luz son la base de numerosas reacciones químicas indispensables para el desarrollo de la flora y de la fauna que con el paso de los siglos han originado el carbón o el petróleo. La radiación solar tiene otras formas de energía renovable, como el viento, las olas o la biomasa que no son más que manifestaciones indirectas de ésta [5].

- Energía eólica

La energía eólica se ha utilizado históricamente para tareas mecánicas que requerían de mucho esfuerzo físico, como moler grano o elevar agua de pozos. En estos casos la energía final que se usaba era la energía mecánica, sin embargo, con el paso de los años el objetivo que se buscaba era el de producir energía eléctrica a partir del viento [9].

- Energía hidráulica

La energía hidráulica se produce por el almacenamiento de agua en embalses y lagos. Si en un momento dado el agua se desplaza a un nivel inferior de altura, esta energía almacenada se transforma en energía cinética y luego en energía eléctrica al pasar por una central hidroeléctrica.

Este tipo de energía lleva años explotándose. Los agricultores, desde la Grecia antigua han utilizado molinos de agua para moler trigo y producir harina. Localizados en los ríos, los molinos de agua recogen el agua en movimiento en cubos situados alrededor del molino. La energía cinética del agua en movimiento gira el molino y se convierte en la energía mecánica que mueve el molino [10].

- Energía geotérmica

La geotermia se refiere a la energía térmica natural existente en el interior de la Tierra. Los romanos utilizaron el calor bajo la corteza terrestre para dar calefacción a sus edificaciones y calentar agua. En la práctica, es el estudio y utilización de la energía térmica que se desplaza desde el interior de la corteza terrestre hacia los niveles superficiales, dando origen a los sistemas geotérmicos. La energía geotérmica es una fuente limpia, y su uso más importante es la generación de electricidad por lo que, desde 1913, se ha producido exitosamente a escala comercial [11].

- Energía de la biomasa

La biomasa fue la fuente de energía más utilizada por la humanidad hasta la Revolución Industrial, cuando fue sustituyéndose por el uso de combustibles fósiles. Actualmente, es considerada una de las posibles alternativas energéticas frente a la inminente crisis petrolera; pero su aplicación es polémica, pues para su producción llegan a utilizarse tierras y cultivos con alto valor de producción de alimentos, como el maíz, soya, frijol, y otras semillas.

En un principio, la biomasa es un recurso renovable, ya que puede cultivarse para reemplazar lo que se utiliza. Sus emisiones de gases de efecto invernadero son más bajas que las de los combustibles fósiles, a reserva de que haya suficiente regeneración de cultivos para absorber el dióxido de carbono liberado [12].

### 4.3. Energía del océano

Muchas personas piensan que esta tecnología es nueva, pero los dispositivos capaces de extraer energía del océano han existido por mucho tiempo. Muchos de los diseños más recientes se basan en diseños que fueron desarrollados hace más de medio siglo.

Los mares y océanos cubren las tres cuartas partes de la superficie de nuestro planeta. Éstos representan un enorme depósito de energía, siempre en movimiento. La energía oceánica constituye una fuente inagotable de energía cinética y es una de las menos utilizadas. Los océanos pueden proveernos de energía mediante el movimiento de las olas, las mareas astronómicas, la diferencia de temperatura entre las capas del océano, diferencias de salinidad, los vientos marinos, la biomasa marina que se originan por la radiación solar, las corrientes marinas y los campos gravitatorios entre el sol, la tierra y la luna. Las energías undimotriz de las olas y la de las mareas pueden ser utilizadas para mover una turbina y generar electricidad [13].

La energía oceánica tiene el potencial de proporcionar una cantidad substancial de nuevas fuentes de energía renovables en el mundo. Sin embargo, esta energía aún es muy costosa para su aprovechamiento, debido principalmente a las condiciones corrosivas del océano, los altos costos de conducción de la energía y los eventos extremos que pueden destruir las plantas de producción. Además, es una tecnología relativamente nueva que aún precisa de investigación para reducir sus costos y mejorar la eficiencia de extracción de energía.

En 2014 la capacidad de energía oceánica, en su mayoría generación de energía mareomotriz, se mantuvo en 530 MW. Virtualmente, todas las instalaciones nuevas están en una fase piloto o de demostración. Por otro lado, dos compañías prominentes en el desarrollo de la energía mareomotriz, enfrentaron fuertes vientos en contra. El Foro de Energía Oceánica de la Unión Europea se lanzó con el objeto de unir a diferentes organizaciones para que cooperen y ayuden a resolver los

problemas relacionados con este tipo de energía. Así mismo, el desarrollo tecnológico sigue en marcha en varios sitios de prueba. Los dispositivos para extraer la energía de olas y mareas fueron, de entre todas las tecnologías para la energía oceánica, los que registraron mayores avances hasta la fecha [5].

Las formas de energía del océano son 1) el viento marino, 2) la biomasa marina, 3) el gradiente salino, 4) el gradiente de temperatura, 5) las corrientes marinas y de mareas, 6) de las mareas y 7) de las olas. A continuación, se describe cada una de estas formas de energía del océano y se da especial énfasis a la energía de las olas en un capítulo a parte ya que el eje central de este trabajo es el de aprovechar este tipo de energía.

#### *4.3.1.1. Energía del viento marino*

La energía eólica marina es una variante de la energía eólica, no es propiamente oceánica, pues la produce el viento que sopla sobre la superficie del mar. La diferencia radica en que los aerogeneradores son colocados en el mar u océano en lugar de en Tierra firme. De esta manera se aprovechan mejor las corrientes de aire, se evitan los accidentes geográficos y reduce el impacto ambiental, aunque aumenta el riesgo de corrosión de los equipos. Entre sus inconvenientes está el alto costo de transporte de esta energía, ya que se deben tender cableados sobre la corteza marina, lo que obliga a disponer de importantes infraestructuras.[14].

Las primeras propuestas de parques eólicos marítimos tuvieron lugar en los años setenta. La primera turbina que se instaló fue en 1991 en Nogersud, mar Báltico, en Suecia, con una potencia de 220 kW (actualmente está fuera de funcionamiento). El primer parque marítimo fue de carácter demostrativo en Vindeby, Dinamarca y comenzó su producción en 1991 [15].

### 4.3.1.2. Energía de la biomasa marina

Las algas han ganado atención durante los últimos años como una posible fuente de aceites para la producción de biodiesel Fig. 4. Sin embargo, otras formas de biomasa marina, podrían tener implicaciones importantes para la producción de energía.

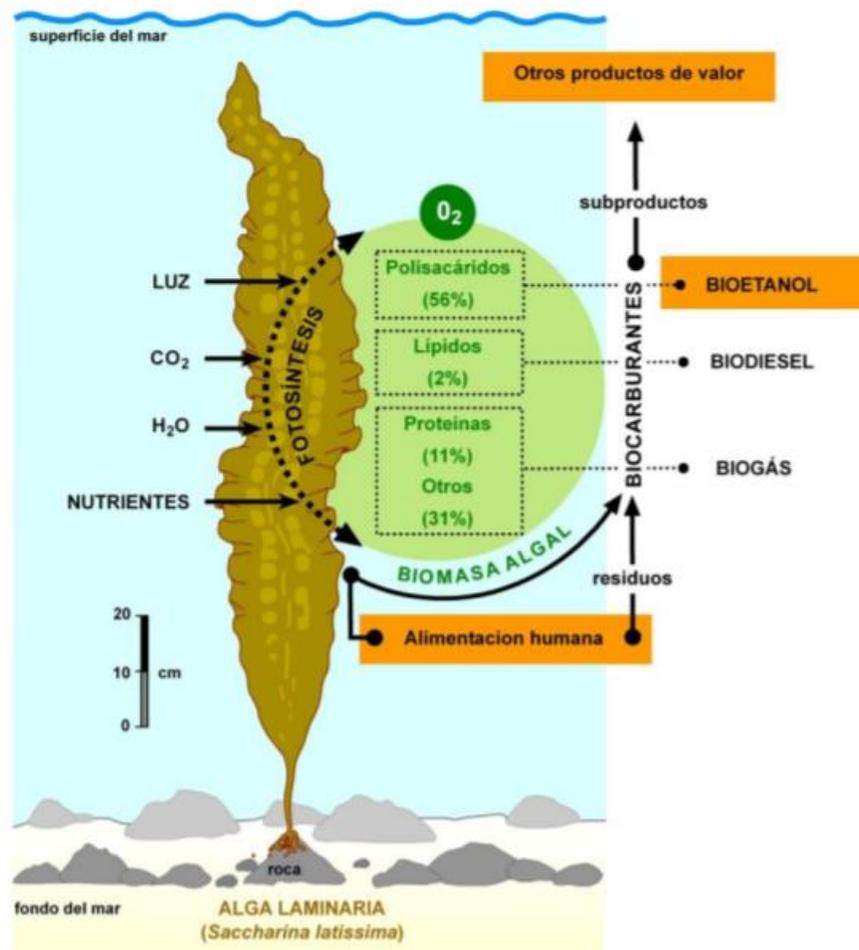


Fig. 4. Esquema la utilidad de la biomasa marina para generar energía y otros productos. Adaptado de *El cultivo de macroalgas marinas como una fuente renovable y limpia para producir bioetanol como biocombustible*, Peteiro, et al, 2012 [16].

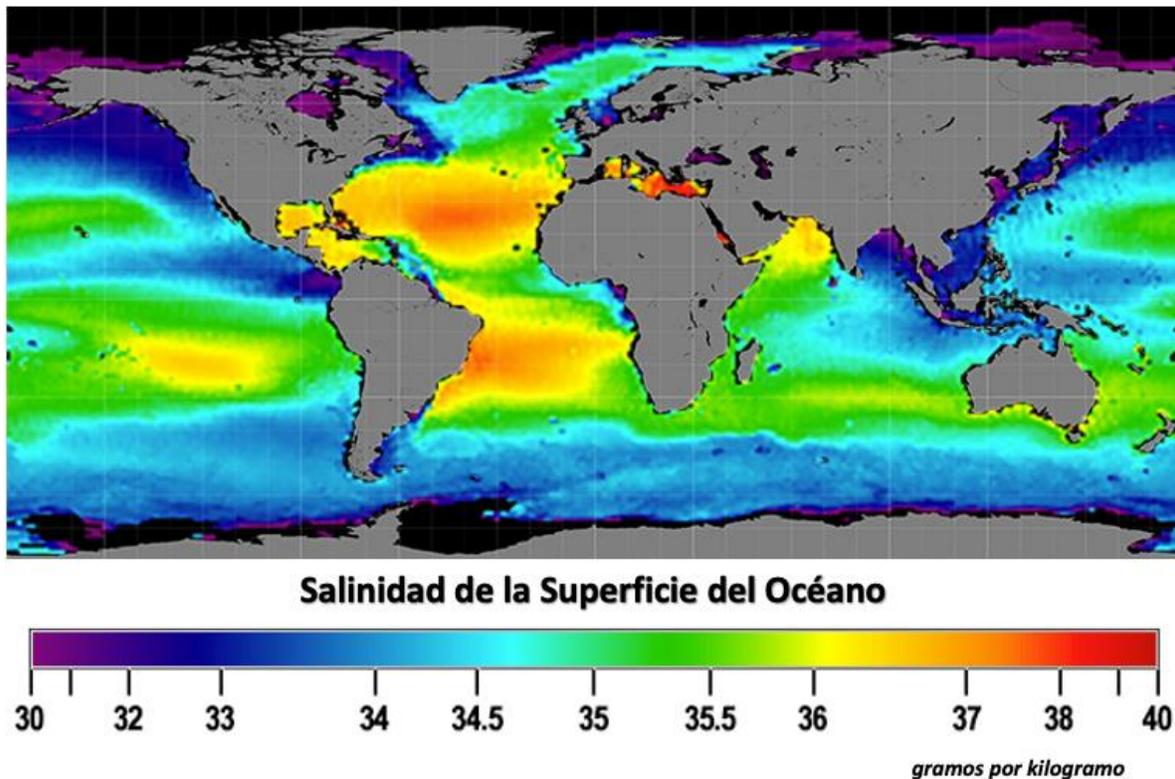
El uso de la biomasa marina podría eludir muchos de los problemas de la tierra y el uso de agua dulce asociados con la biomasa terrestre [17].

En cuanto a la producción, para ciertas microalgas se llegarían a producir por cada dos metros cúbicos de agua hasta 6 kg al día de biomasa. Esto es miles de veces más que el cultivo anual de soja, girasol o palma, con mucho menos área y de forma menos agresiva.

Se ha calculado que cada kilogramo de biomasa derivada de algas ofrece 5,700 kilocalorías; tanto como el carbón. Entonces, serían capaces de alimentar plantas térmicas de electricidad cuyo CO<sub>2</sub> emitido serviría para alimentar de forma retroactiva a las algas. Por ello, se considera que las algas son la única fuente de biodiesel capaz de sustituir al petróleo en el futuro [18].

#### ***4.3.1.3. Energía por gradiente salino***

La energía disponible de gradientes salinos se concentra en regiones entre los trópicos y el Ecuador, principalmente en aguas del Océano Atlántico, en el mediterráneo y el Caribe. En México, el aprovechamiento de este recurso tiene un gran potencial en el Golfo de México, en el Caribe y en el Mar de Cortés (Fig. 5) [19].



*Fig. 5. Mapa de Salinidad en la superficie de los océanos. Adaptado de Aquarius Sea Surface Salinity 2011-2014 – Flat Maps, NASA, 2016, <https://svs.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/details.cgi?aid=4233> [19]*

Mediante ósmosis es posible extraer energía, aprovechando la potencia osmótica por diferencia de concentración de sales. Ocurre si dos estanques con agua, una salada y otra dulce, se ponen en contacto únicamente a través de una membrana selectiva o semipermeable, esto provocará que fluya el líquido dulce hacia el salado, a través de la membrana, y creará una diferencia de alturas entre los dos estanques.

Básicamente existen dos tecnologías de aprovechamiento del gradiente salino.

- *Retardo de la presión osmótica (Pressure-Retarded Osmosis (PRO))*. Es el método más empleado, este consiste en bombear agua marina a un depósito, donde la presión es inferior a la presión osmótica entre el agua dulce y la salada. El agua dulce fluirá a través de una membrana semipermeable incrementando el volumen o la presión en el depósito. Este aumento de la presión es utilizable por un sistema turbogenerador (Fig. 6).

- *Electrodiálisis inversa* (Reverse electro dialysis, RED). Consiste en utilizar dos membranas selectivas, una de cationes y otra de aniones; el agua salada separada del agua dulce por las membranas, pierden ambos iones, los iones se difunden a través de la membrana y crean una corriente de baja tensión. Con este método se genera directamente electricidad en corriente continua [20] (Fig. 6)

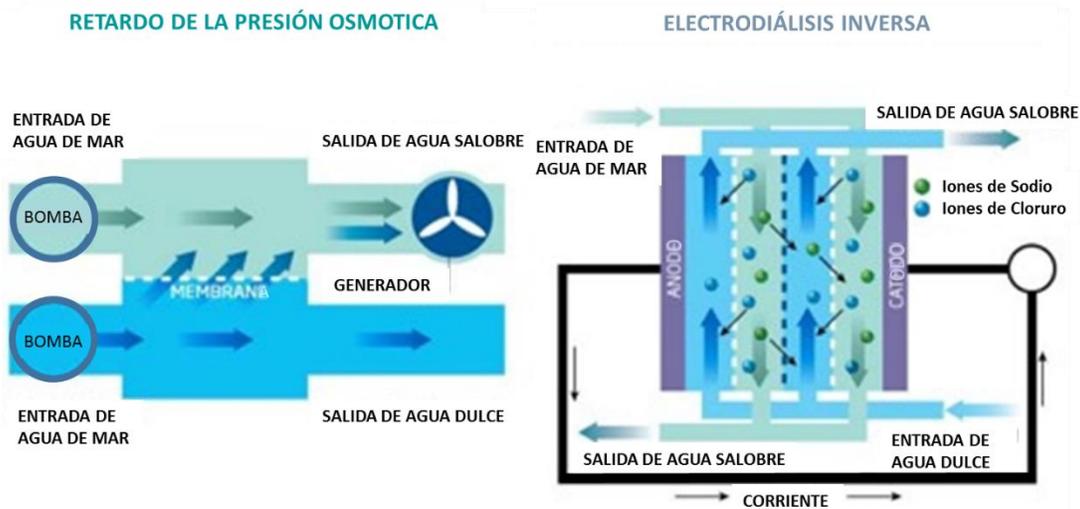


Fig. 6. Izq. Esquema de funcionamiento de un PRO, Der. Esquema de funcionamiento de un RED. Adaptado de *Salinity Power Plants May be the Next Eco-Power Generating Tech*, 2017, <https://www.fastcompany.com/1185670/salinity-power-plants-may-be-next-eco-power-generating-tech> [21].

#### 4.3.1.4. Energía por gradiente de temperatura

La diferencia de temperatura entre el agua superficial y el agua del fondo, es el resultado del grado de penetración de la radiación solar en la columna de agua. Así, en la superficie, la temperatura puede superar los 20°C y es muy variable, mientras que a grandes profundidades suele mantenerse a una temperatura constante en torno a los 4°C. Estos gradientes térmicos pueden aprovecharse en un ciclo termodinámico para la producción de electricidad. La tecnología capaz de convertir estas diferencias de temperatura en electricidad se conoce como Ocean Thermal Energy Conversion, OTEC [22].

Existen tres tipos de sistemas de OTEC:

- Ciclo cerrado: En este sistema el agua caliente de la superficie del mar se bombea con un intercambiador de calor, que vaporiza un fluido con punto de ebullición bajo, como el amoníaco o el freón, ya que presenta mayor eficiencia que sólo emplear agua en el mismo proceso. El vapor en expansión mueve un generador y origina electricidad. El agua fría de capas más profundas se bombea a través de un segundo intercambiador de calor, que convierte de nuevo el vapor en líquido (Fig. 7 b).
- Ciclo abierto: Aquí el agua caliente se coloca en un recipiente de baja presión para que hierva. El vapor en expansión impulsa una turbina conectada a un generador eléctrico. El vapor de agua se condensa de nuevo en un líquido por la exposición a bajas temperaturas de las aguas profundas del océano (Fig. 7 a).
- Híbrido: combina las características de los dos sistemas anteriores. El agua caliente se introduce en una cámara de vacío para su evaporación, con un método similar al de ciclo abierto. El vapor de agua evapora un líquido de bajo punto de ebullición en un circuito de ciclo cerrado que mueve una turbina para producir electricidad [23].

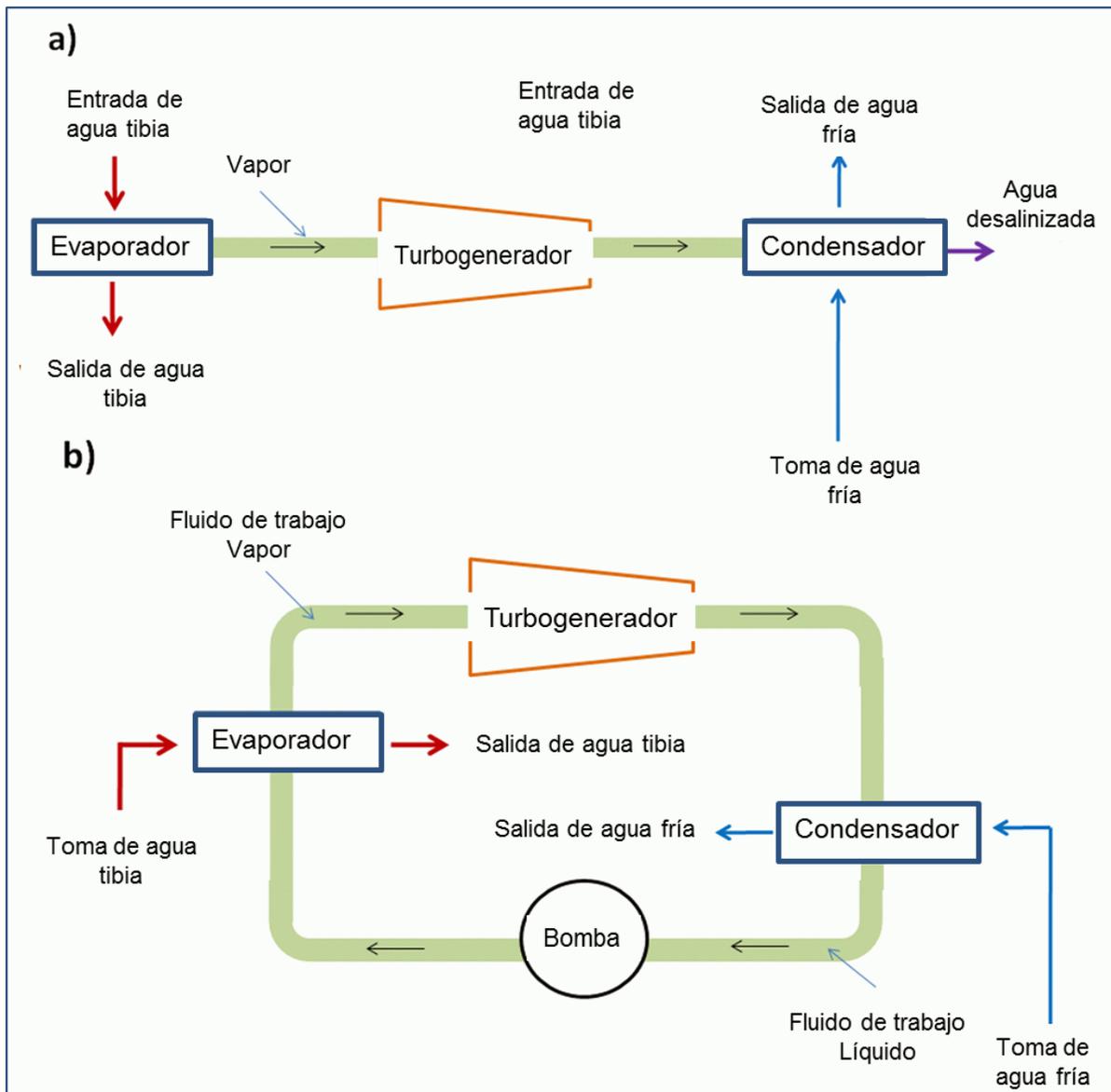


Fig. 7. a) Ciclo abierto, b) Ciclo cerrado. Adaptado de *Ocean Thermal Energy Conversion*, Harrison, 2010, <http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/harrison2/> [24]

#### 4.3.1.5. Energía de las corrientes marinas

Las corrientes marinas son flujos de agua marina, que se mueven en la columna de agua en mares y océanos. Estas se originan por la rotación de la Tierra y la radiación solar. Las corrientes de marea se generan por las diferencias del nivel del agua

generado por las mareas, la ubicación de los continentes, la forma de las costas y suelo marino.

El aprovechamiento de las corrientes marinas es muy parecido a como se procede con el viento, ya que se emplean turbinas similares, pero como la densidad del agua es mucho mayor que la del aire, se requieren dispositivos de menor tamaño, para poder generar la misma potencia. Y la diferencia con las corrientes de marea, es que estas son relativamente constantes, además de que no se requieren embalses para su aprovechamiento. La predictibilidad de las corrientes marinas y el alto factor de carga, son importantes condiciones positivas para su utilización [25].

#### *4.3.1.6. Energía de las mareas o mareomotriz*

La energía mareomotriz, se obtiene de la variación del nivel del mar, ocasionado por la atracción gravitacional que ejerce la luna y el sol, sobre las masas de agua. El comportamiento de las mareas y el desnivel de las mismas dependen de la posición relativa de la Tierra, el Sol y la Luna, que cambia cada día, y de la proporción mares-tierra, de su distribución geográfica, de la topografía local, de la profundidad de las cuencas oceánicas y de fenómenos meteorológicos.

Debido a los movimientos de rotación de la Tierra alrededor de su eje y de la Luna alrededor de la Tierra, existen mareas causadas tanto por el Sol como por la Luna. La amplitud de las mareas, es decir, la diferencia entre el nivel más alto (pleamar) y el más bajo (bajamar), suele ser pequeña en medio del océano, pero puede alcanzar en determinados puntos del globo terráqueo hasta 16 metros (Fig. 8).

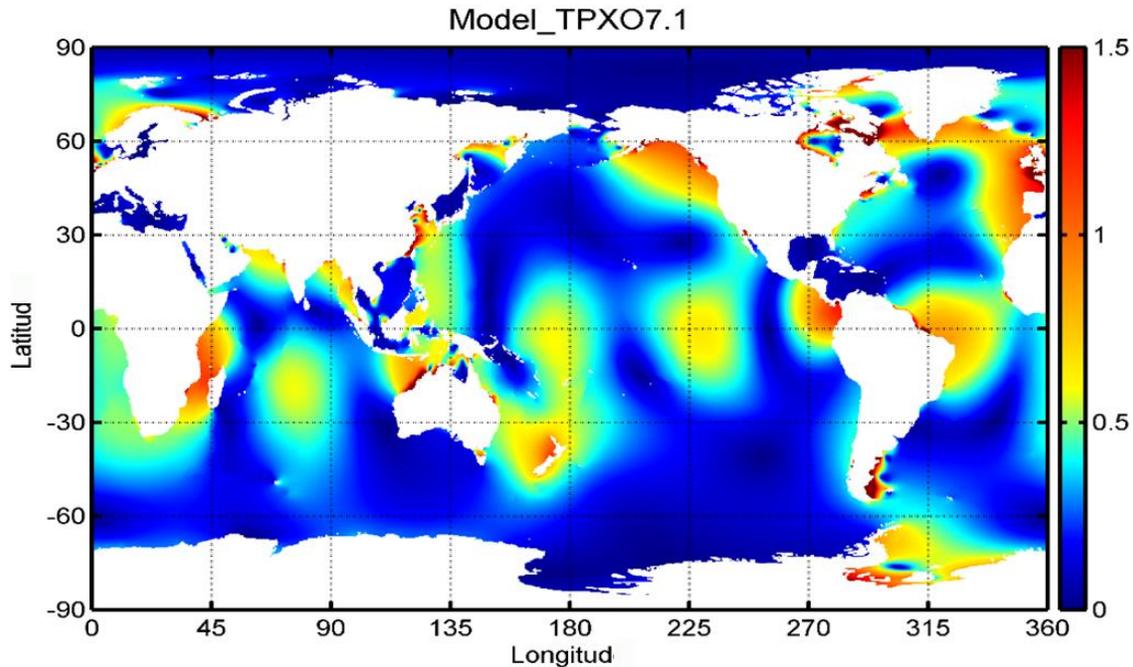


Fig. 8. Mapa amplitud de altura de la superficie del océano M2 en m. Adaptado de *Global Inverse Tide Model*, 2017  
[https://www.esr.org/polar\\_tide\\_models/Model\\_TPXO71.html](https://www.esr.org/polar_tide_models/Model_TPXO71.html) [26].

La amplitud de las mareas, da lugar a que el agua de los mares contenga energía cinética. Esta energía se puede utilizar mediante la construcción de diques, que cierran una bahía para conseguir recoger y almacenar el agua cuando sube la marea. El agua se retiene mediante compuertas hasta la bajamar y se libera en las horas intermareales para que, aprovechando la energía potencial que se origina por el desnivel mar-dique, puedan accionar las turbinas acopladas a un generador y produzcan electricidad.

Hay varios lugares en el mundo que presentan las condiciones óptimas para aprovechar las mareas, para la generación de energía, con variaciones de hasta 16 m. En México existe la posibilidad de aprovechar esta energía en el alto Golfo de California que cuenta con mareas del orden de 6 m [27].

Hoy día, el desarrollo de las turbinas sólo permite aprovechar carreras de marea mayores a 5 m y por el momento, rangos de marea menores a 5 m, que no son convenientes en virtud de que su eficiencia es muy baja [28].

#### *4.3.1.7. Energía de las olas o undimotriz*

La energía de las olas de superficie es la forma más visible de la energía oceánica, posiblemente debido a los efectos destructivos, a menudo espectaculares. Las olas, generalmente, son producto de la acción del viento y por lo tanto una forma indirecta de energía solar.

La energía en las olas del mar se da principalmente de forma irregular, oscilando en todo momento. Como se mencionó anteriormente, la energía solar provoca vientos que soplan sobre los océanos que, a su vez, hacen que se formen las olas, se reúnan y viajen grandes distancias, hacia la costa de los continentes. Existe poca pérdida de energía en las olas de agua profunda del océano, por lo que a medida que viajan a las costas lejanas, siguen absorbiendo más y más energía eólica. Sin embargo, cuando las olas se acercan a aguas relativamente poco profundas, su energía se disipa en gran medida debido a los efectos de fricción con el fondo y esto hace que el entorno dinámico, caótico y muy variable de las olas, rompiendo cerca de la costa y sea lo que más reconocemos de las olas. Las máquinas utilizadas para explotar la energía en esta agua superficial o profunda, se conocen como convertidores de energía undimotriz o WEC por sus siglas en inglés [29].

Las áreas con mayor potencial para la absorción de energía de las olas, son aquellos a lo largo de litorales occidentales continentales con mayores concentraciones en latitudes altas, entre los 30° y 60°, debido a la dirección del viento que circula de oeste a este. Los niveles más altos de energía se dan en las latitudes más altas como en Alaska, Reino Unido, Islandia, Irlanda, España, Portugal, etc. en el hemisferio norte; Chile, Sudáfrica, Australia y Nueva Zelanda en el hemisferio sur y el nivel más bajo de energía disponible, en la costa oeste del Pacífico frente a Canadá y Estados Unidos ver (Fig. 9).

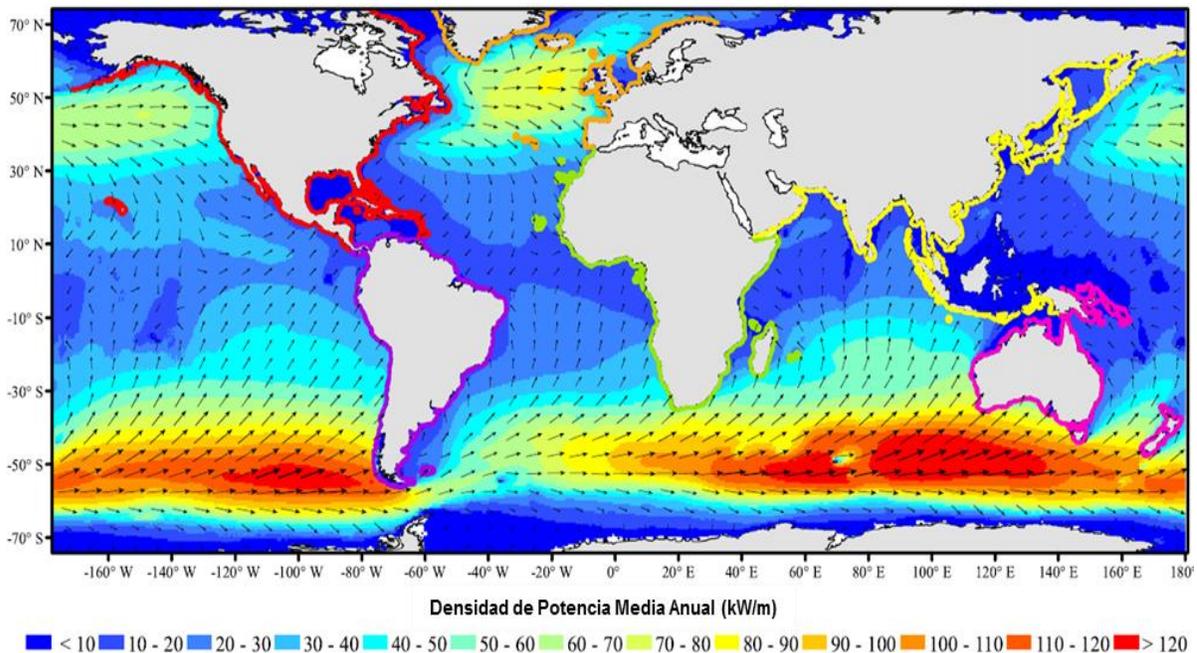


Fig. 9. Mapa mundial de la disponibilidad media anual de energía del oleaje en kW por metro de ancho de ola. Adaptado de *Quantifying the global wave power resource*, Gunn, Stock-Williams, 2012 [30].

A pesar del gran interés que se tiene en México, la energía del oleaje no ha sido explotada y no se cuenta con un atlas nacional de disponibilidad y horas de producción confiable. Además, los dispositivos WEC que se han desarrollado, la mayoría se han quedado en la etapa conceptual y sólo unos pocos han sido probados en condiciones reales.

## 5. El oleaje como fuente de energía

Las técnicas para utilizar la energía del oleaje aprovechan fenómenos básicos que se producen en las olas, como el empuje de la ola, ya que en aguas poco profundas la velocidad horizontal de las olas no varía con la profundidad. La energía de las olas se puede absorber al colocar un obstáculo en donde impacte la ola y este transmita la energía a un pistón; aprovechar la variación de la altura de la ola colocando estructuras flotantes que se mueven con las olas y por último la variación de la presión, bajo la superficie de la ola [30].

### 5.1. Antecedentes en el uso de las olas como fuente de energía

La primera patente en aprovechar este tipo de fuente energética fue presentada en París, Francia, durante la Revolución Francesa en 1789 [31]. Sin embargo, Yoshio Masuda puede ser considerado como el padre de la tecnología de la energía del oleaje moderna, con estudios de este tipo en Japón desde la década de 1940. Él desarrolló una boya de navegación, entre 1964 y 1965 que funciona con la energía de las olas (Fig. 10), equipado con una turbina de aire, lo que más tarde fue nombrado como columna de agua oscilante (OWC) [32].

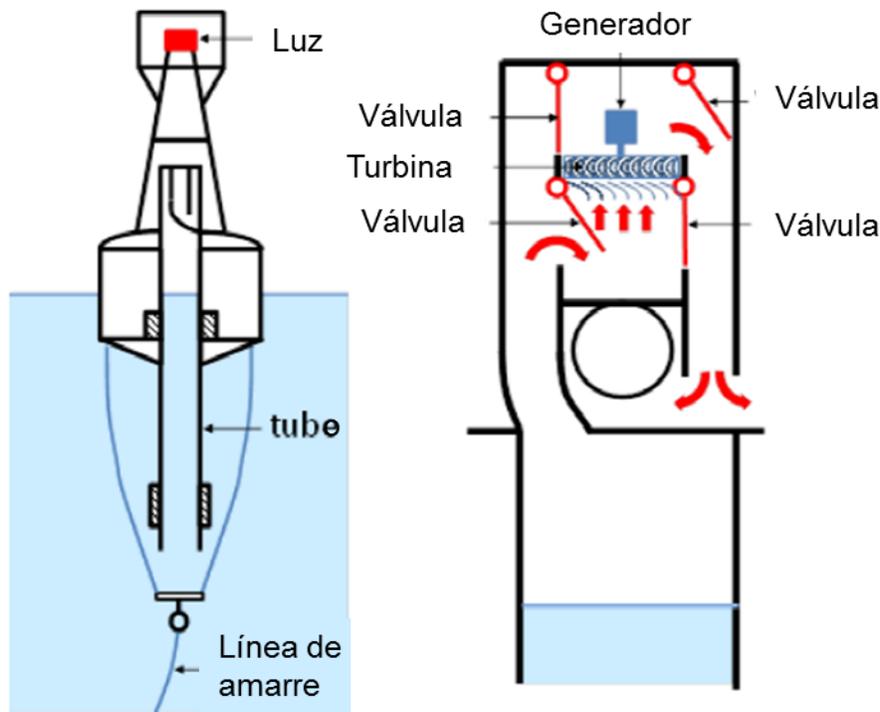


Fig. 10. Boya diseñada por Masuda basada en OWC. Adaptado de *Modelling of wave energy Conversion*, Falcão, 2014 [33].

Estas boyas se comercializaron en Japón desde 1965. Más tarde, Masuda promovió la construcción en 1976 de un dispositivo mucho más grande: una barcaza llamada Kaimei (Fig. 11), equipada con diferentes tipos de turbinas de aire basadas en OWC. Los niveles de salida de potencia obtenidos en el programa de pruebas Kaimei, no fueron un gran éxito probablemente porque esto fue hecho en una etapa temprana,

cuando el conocimiento teórico de la absorción de energía de las olas estaba en su inicio [32].



*Fig. 11. Embarcación diseñada por Yoshio Masudo basada en OWC. Adaptado de Modelling of wave energy Conversion, Falcão, 2014 [33].*

Fue en la década de 1970 cuando el número de las patentes relacionadas con la energía undimotriz aumentó considerablemente, hasta tener más de mil patentes en la actualidad. La crisis del petróleo en 1973, que indujo el cambio más importante en el uso de energías renovables y elevó el interés en la generación de energía a partir de las olas [32].

El Gobierno británico inició en 1975 una investigación importante y un programa de desarrollo de la energía de las olas. Posteriormente, en 1985 se construyó en Noruega un prototipo de 350 kW de potencia nominal en Toftestallen, cerca de Bergen. Este prototipo fue destruido en 1988 por una tormenta de invierno (Fig. 12).



*Fig. 12. Izq. Planta de energía de Olas, Tapchan, Noruega en 1985, Der. Planta Tapchan destruida. Adaptado de Toftestallen, Coastal and Oceanic photography in full storm- and in beautiful weather, 2015, [http://www.tunliweb.no/SM/alb\\_havet.htm](http://www.tunliweb.no/SM/alb_havet.htm) [34].*

En los años siguientes, hasta principios de 1990, la actividad en Europa se mantuvo principalmente a nivel académico siendo el logro más visible de esa época fue un pequeño prototipo llamado LIMPET de 75kW basado en OWC desplegado en la isla de Islay, Escocia. Este prototipo fue puesta en servicio en 1991 [35] (Fig. 13).



Fig. 13. Prototipo LIMPET, Escocia. Adaptado de *A review of oscillating water columns*, Heath, 2012 [35].

Los prototipos OWC de tamaño completo, se construyeron en Noruega, Japón, la India en 1990 (Fig. 14), en Portugal la planta Pico en 1999 (Fig. 14) y Reino Unido en el mismo lapso. El más grande de todos, la planta OSPREY fue destruida por el mar en 1995, poco después de haber sido remolcada y hundida en su lugar cerca de la costa escocesa. En todos estos casos, la estructura es fija [32].



Fig. 14. **Izq.** planta PICO, Japón. Adaptado de *Pico Wave Plant*, 2017, [http://www.wavec.org/en/projects/pico\\_plant.files/54/pico\\_plant.html](http://www.wavec.org/en/projects/pico_plant.files/54/pico_plant.html). [36]; **Der.** *Planta Bottom-standing OWC, India*. Adaptado de *Découvrir et comprendre*, 2017, <https://www.edf.fr/groupe-edf/producteur-industriel/energies-renouvelables/hydraulique/edf-hydraulique-bretagne-normandie/l-usine-maremotrice-de-la-rance/decouvrir-et-comprendre.files/52/decouvrir-et-comprendre.html>, [37].

En la última década han sido significativos los desarrollos para mejorar la eficiencia, fiabilidad y rentabilidad de los sistemas de generación de energía undimotriz. Los avances en la tecnología de plataformas marinas, de extracción de petróleo y gas han eliminado muchas de las barreras técnicas de los primeros sistemas desarrollados entre los años 1974-1984. Varios convertidores piloto producen electricidad, tanto de forma aislada como conectada a la red, en muchos lugares alrededor del mundo [35].

## 5.2. La situación en México

En el caso de México, académicos de la UNAM han hecho diferentes proyectos de investigación para aprovechar la energía del oleaje como el SIBEO, Sistema de Bombeo por Energía del Oleaje patentado, que tiene múltiples aplicaciones, como el saneamiento de áreas marinas contaminadas o para la acuicultura [38]. El REALCO, Sistema Renovador de Agua de Lagunas Costeras. con patente [39], que fue considerado para sanear Laguna Larga, parte del centro turístico de Cayo Coco en Cuba, [40]. Por otro lado, el Instituto de Ingeniería de la UNAM tiene en desarrollo varios dispositivos, tales como el Blow-Jet que conjuga el funcionamiento de un tapchan y un respiradero para generar un chorro de agua que pueda alimentar una turbina (Fig. 15) [41, 42].



*Fig. 15. Blow-Jet durante pruebas. Adaptado de Wave Energy Conersion Using a BLOW-JET System, Mendoza, et al, 2011 [41].*

El WEC, antecedente de este trabajo, captador puntual de tipo boya flotante construido a escala 1:20 consistió en una boya flotante unida a una palanca que transmite la energía de la ola a un generador, denominado MICO 1T Módulo Independiente de Captura de Olas de un Tiempo [43]. El resultado de esta investigación determinó la dimensión óptima para el diámetro de la boya y la longitud de la palanca, así como información sobre los estados de mar para los cuales el dispositivo tendría mejores respuestas[44].

Los resultados experimentales mostraron que el MICO 1T es más eficiente en términos de clima marítimo con alturas de ola que superan el diámetro de la boya y períodos cortos porque se reduce el tiempo de reposo del generador entre cada ola [6]. Con estos resultados se construyó un nuevo modelo a escala 1:10 testado en seco en el Laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM con el fin de comprobar su funcionamiento antes de su colocación en el mar para

pruebas en condiciones reales [45]. Los resultados de esta investigación son presentados en esta tesis.

Actualmente en México no se cuenta con ningún desarrollo piloto o comercial de centrales de generación de electricidad, con alguna forma de energía oceánica. Sin embargo, se han desarrollado algunos prototipos de prueba en diversos institutos nacionales, como en la UNAM, en el CINVESTAV y en el CICESE. Se prevé, que en corto plazo se comiencen a desarrollar los primeros proyectos de generación, debido a la disminución sustancial de los costos de las tecnologías. Como muestra de ello, la CFE, licitó en mayo de 2012 un proyecto piloto para generar energía undimotriz en el país, con una capacidad de 3 MW en las costas de Rosarito, Baja California.

La potencia de olas que tiene el país oscila entre 5 y 30 kW/m aproximadamente. Se cuenta con dos zonas de alto potencial, para la creación de centrales eléctricas, la primera en el Golfo de California y la segunda en el litoral de la Península de Yucatán. Cabe mencionar, que otras fuentes de energía renovable existentes, como la solar, tienen mayor demanda a pequeña escala, por lo que no se descarta, que la energía undimotriz sea mayormente aprovechada a pequeña escala en los litorales de nuestro país. [46].

### 5.3. Clasificación de los convertidores de energía WEC

Los dispositivos que se han desarrollado a través de los años para convertir la energía del oleaje son muy variados. En términos generales se pueden clasificar, de acuerdo con diferentes características como la ubicación, orientación, tamaño y principio de captación de energía. También existen otras clasificaciones, aunque la mayoría de los autores coinciden con clasificarlos de esta manera. A continuación se presenta una descripción de cada uno de ellos.

### 5.3.1. Clasificación según su ubicación:

En función de la distancia a la costa, hay tres tipos de convertidores: dispositivos en la costa, cerca de la costa y en alta mar. Los aspectos más importantes de cada una de ellas son [75]:

- En la costa (Onshore) donde la profundidad es menor a 10 m. En este lugar la mayor parte de la energía de las olas se reduce debido a la fricción con el fondo marino y la ruptura de la ola.
- Cerca de la costa (Nearshore) a una profundidad entre 10 a 35 m y una distancia de 0.5 a 2 km de la costa, la fricción con el fondo marino es la principal fuente de reducción de la potencia de la ola incidente.
- En alta mar (Offshore) donde la profundidad alcanza más de 40 m, las olas tienen mayor energía. (Fig. 16)

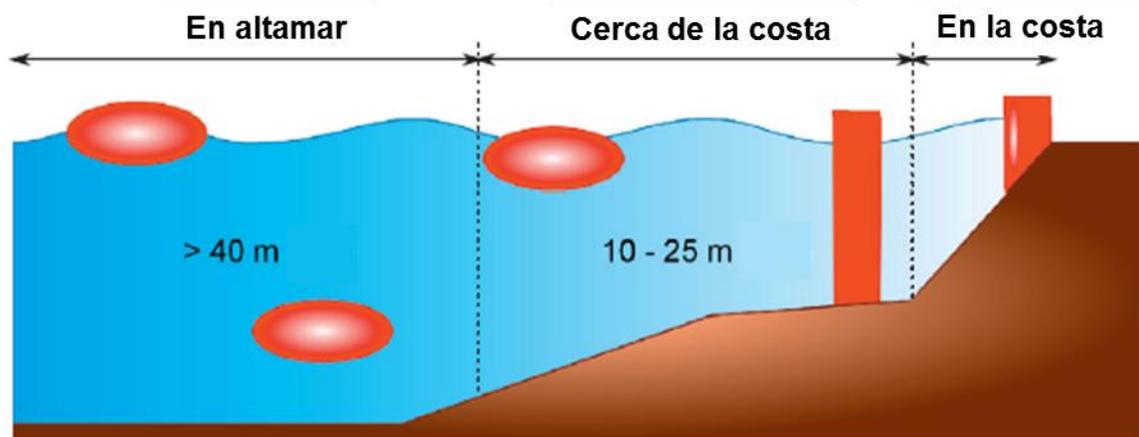


Fig. 16. Localización de los WEC. Adaptado de *Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment*, López, et al, 2013 [47]

No sólo la cantidad de energía de las olas es variada entre la costa y altamar, sino también la energía de las olas no está distribuida de manera uniforme en todos los océanos, como lo vimos en el capítulo **4.3.1.7** (Fig. 9).

### 5.3.2. Clasificación según su tamaño y orientación:

Según el tamaño y la dirección del dispositivo con respecto a la onda incidente, los WEC se pueden clasificar de la siguiente manera:

- a) *Absorbedores puntuales*: son estructuras pequeñas, en comparación con la ola incidente, suelen ser cilíndricas y se agrupan formando una línea. Emplean la fuerza de flotabilidad para inducir un movimiento de tipo pistón, con el movimiento hacia arriba y hacia abajo de las olas, en movimientos rotatorios o movimientos oscilatorios. Recogen la energía en todas las direcciones a través de sus movimientos. Un ejemplo de esto es la tecnología Power Buoy de OPT [48] (Fig. 17a).
- b) *Atenuadores*: Se colocan paralelos a la dirección del avance de las olas. Son estructuras largas que van extrayendo energía de modo progresivo. Están menos expuestos a daños y requieren menores esfuerzos de anclaje que los terminadores. Los Atenuadores están compuestos por una serie de secciones cilíndricas unidas por bisagras flexibles articuladas que permiten a estas secciones individuales poder girar uno respecto al otro. El Pelamis, un prototipo de convertidor, es un ejemplo típico de este tipo de dispositivos (Fig. 17b).
- c) *Terminadores o totalizadores*: se sitúan con orientación perpendicular a la dirección predominante del avance de la ola. Generalmente se utilizan generalmente, cerca de la costa, para aprovechar las órbitas elípticas del oleaje e inducir el movimiento horizontal, de un componente estructural respecto de otro fijo. Estos dispositivos son similares a los atenuadores. Un ejemplo podría ser el convertidor de onda plana Wave Plane converter [75] (Fig. 17c).

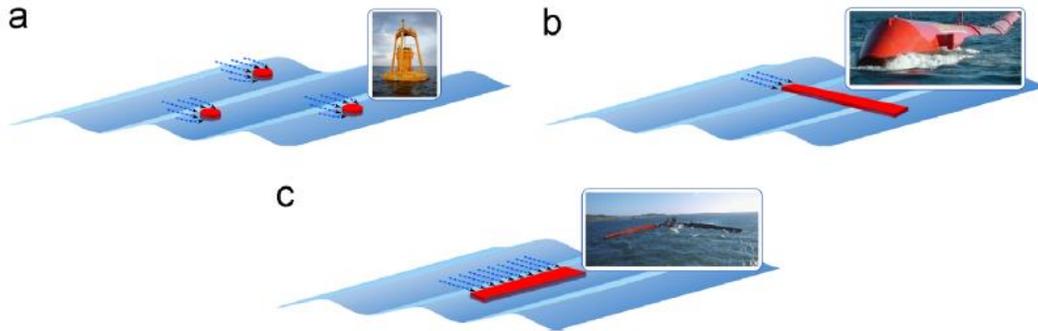


Fig. 17. Clasificación de WEC según su orientación. Adaptado de *Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment*, López, et al, 2013 [47].

### 5.3.3. Clasificación según su principio de funcionamiento:

- a) **Columna de agua oscilante (OWC):** Emplean una cámara parcialmente llena con agua la cual actúa como un pistón, que en su movimiento ascendente comprime el aire sobre éste, haciendo girar las turbinas. El movimiento de las turbinas ocurre igual, durante el descenso de la columna de agua debido al aire que se adentra de nuevo a la cámara.
- b) **Efecto Arquímedes o Presión diferencial:** es un absorbedor puntual sumergido, normalmente se encuentra cerca de la costa y se fija al fondo del mar, que utiliza la diferencia de presión generada entre las crestas de la ola y los valles sobre el dispositivo. Cuando la cresta de la ola pasa sobre el dispositivo, esta presión de la columna de agua comprime el aire que está dentro de él y mueve el dispositivo hacia abajo. Cuando pasa el valle de la ola se reduce la presión del agua y el dispositivo se eleva. Un ejemplo clásico de este tipo de convertidor es el Arquímedes Wave Swing (AWS).
- c) **Cuerpo boyante con referencia fija o móvil:** El movimiento del oleaje induce un movimiento basculante en el dispositivo, dentro del cual una masa por su propio peso inicia un movimiento basculante con respecto a su carcasa y que aprovecha para la generación eléctrica.
- d) **Rebosamiento:** El rebase de una estructura como los diques, puede ser empleado ya que una vez que la ola rompe, la energía se libera en parte como energía potencial. Si se crea un almacén del agua de rebase, que

estaría por encima del nivel medio del mar, su retorno al mar podría inducir el movimiento de turbinas.

- e) **Impacto:** Estos convertidores son articulados o de estructuras flexibles posicionadas perpendiculares a la dirección de la ola. De esta manera, el deflector se mueve hacia adelante y atrás, debido a la onda de impacto. Un ejemplo es el Aquamarine Power Oyster.

La Fig. 18 muestra algunos WEC, de los más conocidos, en función de sus características.

Este proyecto se centra en un dispositivo de cuerpo boyante de una palanca. Este modelo demostró ser el ideal para probarse en condiciones reales. El prototipo inicial se realizó a una escala de 1:20 para poder realizar pruebas en el laboratorio, el modelo de este proyecto tiene una escala 1:10.

Algunos ejemplos de los dispositivos WEC ya patentados incluyen al Pelamis de tipo atenuador, OPT's Power Bouy de tipo absorbedor puntual, Oyster tipo columna de agua oscilante OWC y Wave Dragon de tipo rebase como los que se muestran en la Fig. 18.

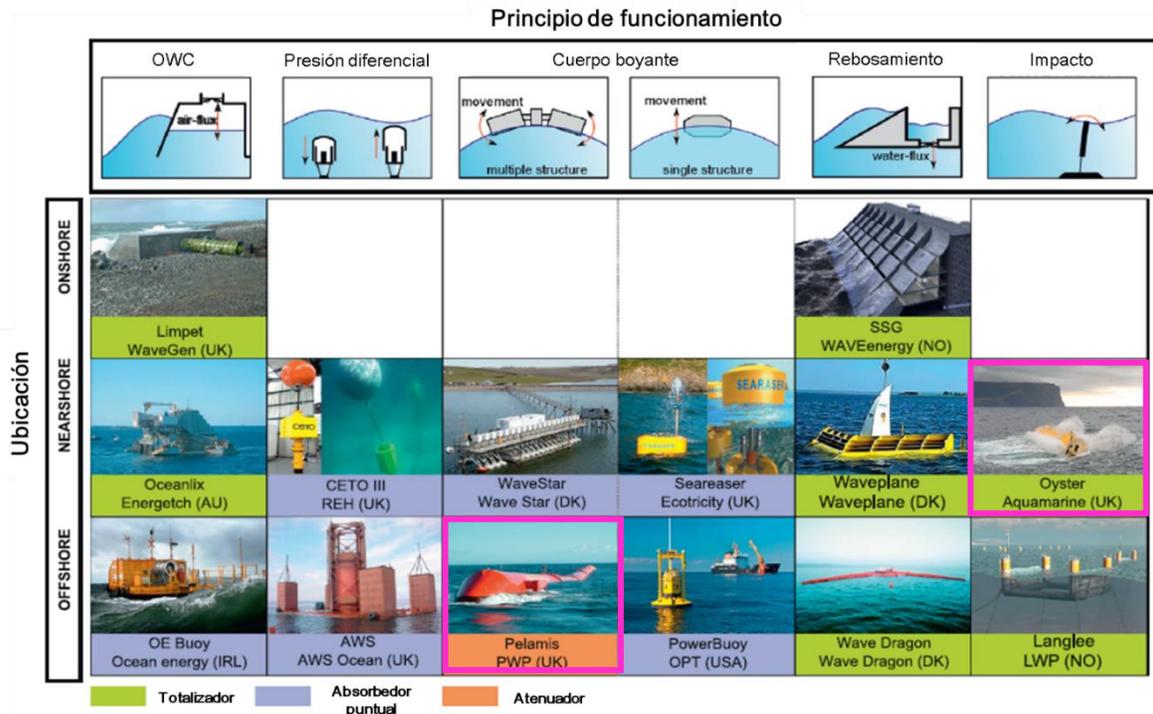


Fig. 18 Clasificación de algunos WEC según sus características. Adaptado de *Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment*, López, et al, 2013 [47].

Se puede decir que hay un gran número y variedad de convertidores de energía de las olas, que varían en concepto tecnológico y de diseño. En el

1. Banco Mundial. *Consumo de energía proveniente de combustibles fósiles (% del total) | Datos / Mapa*. 2015. 2015/10/22; Available from: <http://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.COMM.FO.ZS/countries?display=map>.
2. US Department of Commerce - NOAA. *Global Monitoring Laboratory - Carbon Cycle Greenhouse Gases*. 2021. 08/06/2023; Available from: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html>.
3. EFE, *México ratifica su compromiso contra el cambio climático en la COP18 | Expansión*, in *Expansión*. 2012.
4. United Nations. *El Acuerdo de París | Naciones Unidas*. United Nations 2016; Available from: <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>.
5. REN21. *Global Status Report*. Renewables Global Status Report 2015 2015/10/27; Available from: <http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/>.
6. Santiago, E.I.G., *Optimización de un dispositivo undimotriz de tipo boya flotante*, in *Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología*. 2014, Universidad Nacional Autónoma de México.
7. Mackenzie, L.D.M.J. and J. Susan, *Ingeniería y ciencias ambientales*. 2005, México.

8. CNNMexico. *La energía renovable en México, ¿perdió su atractivo?* - *PlanetaCNN, canal - planetacnn* 2015 2015/10/22; Available from: <http://mexico.cnn.com/planetacnn/2014/01/14/la-energia-renovable-en-mexico-perdio-su-atractivo>.
9. Secretaría de Energía. *Centro Mexicano de Innovación en Energía del Océano*,. 2015/10/23; Available from: <https://www.gob.mx/sener/articulos/centro-mexicano-de-innovacion-en-energia-del-oceano>.
10. National Geographic. *Energía hidroeléctrica*. 2015 2015/10/22; Available from: <http://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/calentamiento-global/hydropower-profile>.
11. CONACYT. *Ciencia y Desarrollo, Artículos*. 2015 2015/10/22; Available from: <http://www.cyd.conacyt.gob.mx/223/Articulos/Mageotermia/Mageotermia3.html>.
12. FAO. *México: Balance energético nacional*. 2015 2015/10/22; Available from: <http://www.fao.org/docrep/t2363s/t2363s0y.htm>.
13. International Energy Agency. *World Energy Outlook 2014 - Executive Summary*. 2014 2015/10/27/18:37:18; Available from: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/world-energy-outlook-2014---executive-summary.html>.
14. The wind Power. *Completar los archivos de los Parques eólicos Offshore*. 2022 2015/10/22; Available from: [http://www.thewindpower.net/country\\_content\\_es.php?id\\_zone=1006](http://www.thewindpower.net/country_content_es.php?id_zone=1006).
15. EWEA. *The European Wind Energy Association*. 2015 2015/10/27; Available from: <http://www.ewea.org/>
16. Peteiro, C., Ó.J. Prado, and M. García-Tasende, *El cultivo de macroalgas marinas como una fuente renovable y limpia para producir bioetanol como biocarburante*. 2015.
17. Biomassmagazine. *Marine biomass could serve as power source | Biomassmagazine.com*. 2015 2015/10/22; Available from: <http://biomassmagazine.com/articles/2298/marine-biomass-could-serve-as-power-source>.
18. Clarke + Modet, *En la cresta de la ola en Biotecnología Azul*. 2023.
19. SVS. *Aquarius Sea Surface Salinity 2011-2014 - Flat Maps*. 2017 2017/05/28; Available from: <https://svs.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/details.cgi?aid=4233>
20. Ball, P. *Blue energy: How mixing water can create electricity*. 2015 2015/10/22; Available from: <http://www.bbc.com/future/story/20150610-blue-energy-how-mixing-water-can-create-electricity>.
21. Fastcompany. *Salinity Power Plants May be the Next Eco-Power Generating Tech*. 2017/05/27; Available from: <https://www.fastcompany.com/1185670/salinity-power-plants-may-be-next-eco-power-generating-tech>. files/24/salinity-power-plants-may-be-next-eco-power-generating-tech.html.
22. OTEC News. *What is OTEC*. OTEC news 2015 2015/10/27; Available from: <http://www.otecnews.org/what-is-otec/>.
23. OES. *What is Ocean Energy - Ocean Thermal Energy*. 2015 2015/10/22; Available from: <http://www.ocean-energy-systems.org/what-is-ocean-energy/ocean-thermal-energy/>.
24. Harrison, S. *Ocean Thermal Energy Conversion*. 2010; Available from: <http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/harrison2/>.
25. Instituto de Investigaciones Eléctricas. *Generación de energía a partir de la fuerza del mar*. 2015 2015/10/22; Available from: <http://www.iie.org.mx/sitioIIE/sitio/control/06/detalle1.php?id=525>.

26. Earth and Space Research. *TPXO6.2: Global Inverse Tide Model*. 2017 2017/05/28; Available from: [https://www.esr.org/polar\\_tide\\_models/Model\\_TPXO71.html](https://www.esr.org/polar_tide_models/Model_TPXO71.html). files/50/Model\_TPXO71.html.
27. Hiriart Le Bert, G. *Revista Digital Universitaria*. 2009 2015/10/22; Available from: <http://www.revista.unam.mx/vol.10/num8/art49/int49-3.htm>.
28. López-González, J., G. Hiriart-Le Bert, and R. Silva-Casarín, *Cuantificación de energía de una planta mareomotriz*. Ingeniería, investigación y tecnología, 2010. **11**(2): p. 233-245.
29. SEAPOW. *Wave Energy - Sea Power*. 2015 2015/10/22; Available from: <http://www.seapower.ie/wave-energy/>.
30. Gunn, K. and C. Stock-Williams, *Quantifying the global wave power resource*. Renewable Energy, 2012. **44**: p. 296-304.
31. Ross, D., *Power from sea wave*. Oxford University Press, 1995.
32. Falcão, A.F.d.O., *Wave energy utilization: A review of the technologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010. **14**(3): p. 899-918.
33. Falcão, A.F., *Modelling of Wave Energy Conversion*. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa., 2014.
34. Tunliweb. *Coastal and Oceanic photography by photographer Svein-Magne Tunli, tunliweb. Big waves in full storm. Pictures, Images, Photographs, Photo Gallery, Photography. Foto, bilder, hav, skjærgård, bølger*. 2022 2015/10/22; Available from: [http://www.tunliweb.no/SM/alb\\_havet.htm](http://www.tunliweb.no/SM/alb_havet.htm).
35. Heath, T.V., *A review of oscillating water columns*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2012. **370**(1959): p. 235-245.
36. WAVEC. *Projects :: Pico Wave Plant*. 2017 2017/05/28; Available from: [http://www.wavec.org/en/projects/pico\\_plant](http://www.wavec.org/en/projects/pico_plant). files/54/pico\_plant.html.
37. EDF. *Découvrir et comprendre*. EDF France 2016 2016/05/03; Available from: <https://www.edf.fr/groupe-edf/producteur-industriel/energies-renouvelables/hydraulique/edf-hydraulique-bretagne-normandie/l-usine-maremotrice-de-la-rance/decouvrir-et-comprendre>. files/52/decouvrir-et-comprendre.html.
38. Czitrom, S.P.R., *Wave energy-driven resonant sea-water pump*. Oceanographic Literature Review, 1998. **1**(45): p. 168.
39. Ruiz, F., et al., *Un dispositivo de bombeo de agua marina activado por oleaje*. Ingeniería hidráulica en México, 1994. **9**(2): p. 45-51.
40. Merino, M. *Sistema de limpieza de lagunas de la UNAM | Swagger*. 2015 2015/10/22; Available from: <http://www.swagger.mx/natural/prueban-en-cuba-sistema-de-limpieza-de-lagunas-de-la-unam>.
41. Chávez, C., et al. *Diseño hidrodinámico y evaluación de un dispositivo marítimo energético, "blow-jet"*. in *Memorias del XXI Congreso Nacional de Hidráulica Guadalajara Jalisco*. 2010.
42. Mendoza-Baldwin, E., et al., *Wave energy conversion using a blow-jet system*. Coastal Engineering Proceedings, 2011. **1**(32): p. 62.
43. García-Santiago, E., et al., *Optimización de un dispositivo undimotriz tipo boya flotante, análisis espectral*. XXVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Santiago, Chile, 2014.
44. García-Santiago, E., et al., *Optimización de un dispositivo undimotriz tipo boya flotante*. XXIII Congreso Nacional de Hidráulica, Puerto Vallarta, Jalisco, México, 2014.

45. García Santiago, E.I., et al., *Technical advances in the development of a floating wec: MICO. Conference: Coastal Structures and Solutions to Coastal Disasters Joint Conference 2015*. 2016.
46. Peña, A.I.P., *Estimacion del clima maritimo y la energía de oleaje disponible en las costas mexicanas*, in *Ingenieria civil-hidraulica*. 2013, UNAM: México.
47. López, I., et al., *Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013. **27**: p. 413-434.
48. Technologies, O.P. *Energizing Ocean Intelligence*. *Ocean Power Technologies 2015* 2015/10/27; Available from: <http://www.oceanpowertechnologies.com/>.
49. EMEC, *European Marine Energy Centre*. 2023.
50. Lemessy, K.G., K. Manohar, and A. Adeyanju. *A review of wave energy conversion and its place in the Caribbean region*. in *The 13th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC 2019), Napoli, Italy*. 2019.
51. Aderinto, T. and H. Li, *Review on power performance and efficiency of wave energy converters*. *Energies*, 2019. **12**(22): p. 4329.
52. Aderinto, T.O., F. Haces-Fernandez, and H. Li. *Design and Potential Application of Small Scale Wave Energy Converter*. in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. 2017. American Society of Mechanical Engineers.
53. Wang, L., J. Isberg, and E. Tedeschi, *Review of control strategies for wave energy conversion systems and their validation: the wave-to-wire approach*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018. **81**: p. 366-379.
54. Galparsoro, I., et al., *A new framework and tool for ecological risk assessment of wave energy converters projects*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021. **151**: p. 111539.
55. Iglesias, G., et al., *Environmental effects*. *Wave and Tidal Energy*, 2018: p. 364-454.
56. Martínez, M.L., et al., *A systemic view of potential environmental impacts of ocean energy production*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2021. **149**: p. 111332.
57. Mendoza, E., et al., *A framework to evaluate the environmental impact of OCEAN energy devices*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2019. **112**: p. 440-449.
58. Boehlert, G.W. and A.B. Gill, *Environmental and ecological effects of ocean renewable energy development: a current synthesis*. *Oceanography*, 2010. **23**(2): p. 68-81.
59. Copping, A.E., et al., *Potential environmental effects of marine renewable energy development—the state of the science*. *Journal of Marine Science and Engineering*, 2020. **8**(11): p. 879.
60. Palomino, M. and J. Almazán, *Descripción, medida y análisis del oleaje*. Universidad politécnica de Madrid, 2000.
61. Silva Casarín, R., *Análisis y descripción estadística del oleaje*. 2005: Universidad Nacional Autónoma de México.
62. Pierson Jr, W.J., G. Neumann, and R.W. James, *Practical methods for observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics*. 1971, DTIC Document.
63. Johnson, R., E. Mansard, and J. Ploeg, *Effects of wave grouping on breakwater stability*. *Coastal Engineering Proceedings*, 1978. **1**(16).
64. Toffoli, A. and E.M. Bitner-Gregersen, *Types of ocean surface waves, wave classification*. *Encyclopedia of maritime and offshore engineering*, 2017: p. 1-8.
65. Wright, J., A. Colling, and D. Park, *Waves, tides, and shallow-water processes*. Vol. 4. 1999: Gulf Professional Publishing.

66. Svendsen, I.A., I.A. Svendsen, and I.G. Jonsson, *Hydrodynamics of coastal regions*. 1976: Den Private ingeniørfond, Technical University of Denmark.
67. Dalrymple, R.A. and R.G. Dean, *Water wave mechanics for engineers and scientists*. 1991: Prentice-Hall.
68. García Santiago, E., et al., *Generación de energía con dos tipos de wec's en México: Resultados experimentales y avances en su implementación*. AMIP, 2015.
69. Guzman, R. *Cuántos kilowatts por hora consume una casa 2023* 2023/02/07; Available from: <https://recibodeluzcfe.mx/blog/cuantos-kilowatts-por-hora-consume-una-casa/>.
70. SEMARNAT, *Consumo de energía por hogar, 2016*. 2017.
71. Pierson Jr, W.J. and L. Moskowitz, *A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of SA Kitaigorodskii*. *Journal of geophysical research*, 1964. **69**(24): p. 5181-5190.
72. WikiWaves. *Ocean-Wave Spectra* 2023; Available from: [https://wikiwaves.org/Ocean-Wave\\_Spectra](https://wikiwaves.org/Ocean-Wave_Spectra).

Anexo 1, se presentan 256 conceptos WEC mundiales que son conocidos por el Consejo Marine Equipment Europea (EMEC) [49] hasta ahora. Sin embargo, como se ha mencionado, de acuerdo con López, et al, 2013 [47] existían más de mil patentes en 2009. En el

1. Banco Mundial. *Consumo de energía procedente de combustibles fósiles (% del total) | Datos / Mapa*. 2015 2015/10/22; Available from: <http://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.COMM.FO.ZS/countries?display=map>.
2. US Department of Commerce - NOAA. *Global Monitoring Laboratory - Carbon Cycle Greenhouse Gases*. 2021 08/06/2023; Available from: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html>.
3. EFE, *México ratifica su compromiso contra el cambio climático en la COP18 | Expansión*, in *Expansión*. 2012.
4. United Nations. *El Acuerdo de París | Naciones Unidas*. United Nations 2016; Available from: <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>.
5. REN21. *Global Status Report*. Renewables Global Status Report 2015 2015/10/27; Available from: <http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/>.
6. Santiago, E.I.G., *Optimización de un dispositivo undimotriz de tipo boya flotante*, in *Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología*. 2014, Universidad Nacional Autónoma de México.
7. Mackenzie, L.D.M.J. and J. Susan, *Ingeniería y ciencias ambientales*. 2005, México.
8. CNNMexico. *La energía renovable en México, ¿perdió su atractivo? - PlanetaCNN, canal - planetacnn* 2025 2015/10/22; Available from: <http://mexico.cnn.com/planetacnn/2014/01/14/la-energia-renovable-en-mexico-perdio-su-atractivo>.
9. Secretaría de Energía. *Centro Mexicano de Innovación en Energía del Océano*,. 2015/10/23; Available from: <https://www.gob.mx/sener/articulos/centro-mexicano-de-innovacion-en-energia-del-oceano>.
10. National Geographic. *Energía hidroeléctrica*. 2015 2015/10/22; Available from: <http://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/calentamiento-global/hydropower-profile>.
11. CONACYT. *Ciencia y Desarrollo, Artículos*. 2015 2015/10/22; Available from: <http://www.cyd.conacyt.gob.mx/223/Articulos/Mageotermia/Mageotermia3.html>.
12. FAO. *México: Balance energético nacional*. 2015 2015/10/22; Available from: <http://www.fao.org/docrep/t2363s/t2363s0y.htm>.
13. International Energy Agency. *World Energy Outlook 2014 - Executive Summary*. 2014 2015/10/27/18:37:18; Available from: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/world-energy-outlook-2014---executive-summary.html>.
14. The wind Power. *Completar los archivos de los Parques eólicos Offshore*. 2022 2015/10/22; Available from: [http://www.thewindpower.net/country\\_content\\_es.php?id\\_zone=1006](http://www.thewindpower.net/country_content_es.php?id_zone=1006).
15. EWEA. *The European Wind Energy Association*. 2015 2015/10/27; Available from: <http://www.ewea.org/>

16. Peteiro, C., Ó.J. Prado, and M. García-Tasende, *El cultivo de macroalgas marinas como una fuente renovable y limpia para producir bioetanol como biocombustible*. 2015.
17. Biomassmagazine. *Marine biomass could serve as power source | Biomassmagazine.com*. 2015 2015/10/22; Available from: <http://biomassmagazine.com/articles/2298/marine-biomass-could-serve-as-power-source>.
18. Clarke + Modet, *En la cresta de la ola en Biotecnología Azul*. 2023.
19. SVS. *Aquarius Sea Surface Salinity 2011-2014 - Flat Maps*. 2017 2017/05/28; Available from: <https://svs.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/details.cgi?aid=4233>
20. Ball, P. *Blue energy: How mixing water can create electricity*. 2015 2015/10/22; Available from: <http://www.bbc.com/future/story/20150610-blue-energy-how-mixing-water-can-create-electricity>.
21. Fastcompany. *Salinity Power Plants May be the Next Eco-Power Generating Tech*. 2017/05/27; Available from: <https://www.fastcompany.com/1185670/salinity-power-plants-may-be-next-eco-power-generating-tech>. files/24/salinity-power-plants-may-be-next-eco-power-generating-tech.html.
22. OTEC News. *What is OTEC*. OTEC news 2015 2015/10/27; Available from: <http://www.otecnews.org/what-is-otec/>.
23. OES. *What is Ocean Energy - Ocean Thermal Energy*. 2015 2015/10/22; Available from: <http://www.ocean-energy-systems.org/what-is-ocean-energy/ocean-thermal-energy/>.
24. Harrison, S. *Ocean Thermal Energy Conversion*. 2010; Available from: <http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/harrison2/>.
25. Instituto de Investigaciones Eléctricas. *Generación de energía a partir de la fuerza del mar*. 2015 2015/10/22; Available from: <http://www.iie.org.mx/sitioIIIE/sitio/control/06/detalle1.php?id=525>.
26. Earth and Space Research. *TPXO6.2: Global Inverse Tide Model*. 2017 2017/05/28; Available from: [https://www.esr.org/polar\\_tide\\_models/Model\\_TPXO71.html](https://www.esr.org/polar_tide_models/Model_TPXO71.html). files/50/Model\_TPXO71.html.
27. Hiriart Le Bert, G. *Revista Digital Universitaria*. 2009 2015/10/22; Available from: <http://www.revista.unam.mx/vol.10/num8/art49/int49-3.htm>.
28. López-González, J., G. Hiriart-Le Bert, and R. Silva-Casarín, *Cuantificación de energía de una planta mareomotriz*. Ingeniería, investigación y tecnología, 2010. **11**(2): p. 233-245.
29. SEAPOWER. *Wave Energy - Sea Power*. 2015 2015/10/22; Available from: <http://www.seapower.ie/wave-energy/>.
30. Gunn, K. and C. Stock-Williams, *Quantifying the global wave power resource*. Renewable Energy, 2012. **44**: p. 296-304.
31. Ross, D., *Power from sea wave*. Oxford University Press, 1995.
32. Falcão, A.F.d.O., *Wave energy utilization: A review of the technologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010. **14**(3): p. 899-918.
33. Falcão, A.F., *Modelling of Wave Energy Conversion*. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa., 2014.
34. Tunliweb. *Coastal and Oceanic photography by photographer Svein-Magne Tunli, tunliweb. Big waves in full storm. Pictures, Images, Photographs, Photo Gallery, Photography. Foto, bilder, hav, skjærgård, bølger*. 2022 2015/10/22; Available from: [http://www.tunliweb.no/SM/alb\\_havet.htm](http://www.tunliweb.no/SM/alb_havet.htm).

35. Heath, T.V., *A review of oscillating water columns*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2012. **370**(1959): p. 235-245.
36. WAVEC. *Projects :: Pico Wave Plant*. 2017 2017/05/28; Available from: [http://www.wavec.org/en/projects/pico\\_plant\\_files/54/pico\\_plant.html](http://www.wavec.org/en/projects/pico_plant_files/54/pico_plant.html).
37. EDF. *Découvrir et comprendre*. EDF France 2016 2016/05/03; Available from: [https://www.edf.fr/groupe-edf/producteur-industriel/energies-renouvelables/hydraulique/edf-hydraulique-bretagne-normandie/l-usine-maremotrice-de-la-rance/decouvrir-et-comprendre\\_files/52/decouvrir-et-comprendre.html](https://www.edf.fr/groupe-edf/producteur-industriel/energies-renouvelables/hydraulique/edf-hydraulique-bretagne-normandie/l-usine-maremotrice-de-la-rance/decouvrir-et-comprendre_files/52/decouvrir-et-comprendre.html).
38. Czitrom, S.P.R., *Wave energy-driven resonant sea-water pump*. Oceanographic Literature Review, 1998. **1**(45): p. 168.
39. Ruiz, F., et al., *Un dispositivo de bombeo de agua marina activado por oleaje*. Ingeniería hidráulica en México, 1994. **9**(2): p. 45-51.
40. Merino, M. *Sistema de limpieza de lagunas de la UNAM | Swagger*. 2015 2015/10/22; Available from: <http://www.swagger.mx/natural/prueban-en-cuba-sistema-de-limpieza-de-lagunas-de-la-unam>.
41. Chávez, C., et al. *Diseño hidrodinámico y evaluación de un dispositivo marítimo energético, "blow-jet"*. in *Memorias del XXI Congreso Nacional de Hidráulica Guadalajara Jalisco*. 2010.
42. Mendoza-Baldwin, E., et al., *Wave energy conversion using a blow-jet system*. Coastal Engineering Proceedings, 2011. **1**(32): p. 62.
43. García-Santiago, E., et al., *Optimización de un dispositivo undimotriz tipo boya flotante, análisis espectral*. XXVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Santiago, Chile, 2014.
44. García-Santiago, E., et al., *Optimización de un dispositivo undimotriz tipo boya flotante*. XXIII Congreso Nacional de Hidráulica, Puerto Vallarta, Jalisco, México, 2014.
45. García Santiago, E.I., et al., *Technical advances in the development of a floating wec: MICO. Conference: Coastal Structures and Solutions to Coastal Disasters Joint Conference 2015*. 2016.
46. Peña, A.I.P., *Estimacion del clima maritimo y la energía de oleaje disponible en las costas mexicanas*, in *Ingenieria civil-hidraulica*. 2013, UNAM: México.
47. López, I., et al., *Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. **27**: p. 413-434.
48. Technologies, O.P. *Energizing Ocean Intelligence*. Ocean Power Technologies 2015 2015/10/27; Available from: <http://www.oceanpowertechnologies.com/>.
49. EMEC, *European Marine Energy Centre*. 2023.
50. Lemessy, K.G., K. Manohar, and A. Adeyanju. *A review of wave energy conversion and its place in the Caribbean region*. in *The 13th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC 2019), Napoli, Italy*. 2019.
51. Aderinto, T. and H. Li, *Review on power performance and efficiency of wave energy converters*. Energies, 2019. **12**(22): p. 4329.
52. Aderinto, T.O., F. Haces-Fernandez, and H. Li. *Design and Potential Application of Small Scale Wave Energy Converter*. in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. 2017. American Society of Mechanical Engineers.
53. Wang, L., J. Isberg, and E. Tedeschi, *Review of control strategies for wave energy conversion systems and their validation: the wave-to-wire approach*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. **81**: p. 366-379.

54. Galparsoro, I., et al., *A new framework and tool for ecological risk assessment of wave energy converters projects*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021. **151**: p. 111539.
55. Iglesias, G., et al., *Environmental effects*. Wave and Tidal Energy, 2018: p. 364-454.
56. Martínez, M.L., et al., *A systemic view of potential environmental impacts of ocean energy production*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021. **149**: p. 111332.
57. Mendoza, E., et al., *A framework to evaluate the environmental impact of OCEAN energy devices*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019. **112**: p. 440-449.
58. Boehlert, G.W. and A.B. Gill, *Environmental and ecological effects of ocean renewable energy development: a current synthesis*. Oceanography, 2010. **23**(2): p. 68-81.
59. Copping, A.E., et al., *Potential environmental effects of marine renewable energy development—the state of the science*. Journal of Marine Science and Engineering, 2020. **8**(11): p. 879.
60. Palomino, M. and J. Almazán, *Descripción, medida y análisis del oleaje*. Universidad politécnica de Madrid, 2000.
61. Silva Casarín, R., *Análisis y descripción estadística del oleaje*. 2005: Universidad Nacional Autónoma de México.
62. Pierson Jr, W.J., G. Neumann, and R.W. James, *Practical methods for observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics*. 1971, DTIC Document.
63. Johnson, R., E. Mansard, and J. Ploeg, *Effects of wave grouping on breakwater stability*. Coastal Engineering Proceedings, 1978. **1**(16).
64. Toffoli, A. and E.M. Bitner-Gregersen, *Types of ocean surface waves, wave classification*. Encyclopedia of maritime and offshore engineering, 2017: p. 1-8.
65. Wright, J., A. Colling, and D. Park, *Waves, tides, and shallow-water processes*. Vol. 4. 1999: Gulf Professional Publishing.
66. Svendsen, I.A., I.A. Svendsen, and I.G. Jonsson, *Hydrodynamics of coastal regions*. 1976: Den Private ingenj rfond, Technical University of Denmark.
67. Dalrymple, R.A. and R.G. Dean, *Water wave mechanics for engineers and scientists*. 1991: Prentice-Hall.
68. García Santiago, E., et al., *Generación de energía con dos tipos de wec's en México: Resultados experimentales y avances en su implementación*. AMIP, 2015.
69. Guzman, R. *Cuántos kilowatts por hora consume una casa 2023* 2023/02/07; Available from: <https://recibodeluzcfe.mx/blog/cuantos-kilowatts-por-hora-consume-una-casa/>.
70. SEMARNAT, *Consumo de energía por hogar, 2016*. 2017.
71. Pierson Jr, W.J. and L. Moskowitz, *A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of SA Kitaigorodskii*. Journal of geophysical research, 1964. **69**(24): p. 5181-5190.
72. WikiWaves. *Ocean-Wave Spectra* 2023; Available from: [https://wikiwaves.org/Ocean-Wave\\_Spectra](https://wikiwaves.org/Ocean-Wave_Spectra).

Anexo 1 se puede ver que más del 50% de esas 256 innovaciones, se encuentran en Europa, donde el principal país desarrollador es el Reino Unido.

Algunos conceptos son más avanzados que otros, en cuanto a la complejidad de la tecnología y en términos de progreso. En general, como se ha señalado anteriormente, estos dispositivos se encuentran en etapas tempranas de desarrollo, en relación con otras tecnologías renovables, como la solar y la eólica, en comparación con las plantas convencionales. Más aún, todavía no existe un diseño que prevalezca sobre el resto. Algunos prototipos se han construido a gran escala, y han sido probados en condiciones de mar reales, pero ninguno de ellos se ha completado comercialmente. Sin embargo, hay una tendencia por las empresas para desarrollar más el tipo absorbedor puntual, con un 81.78 % de los desarrollos (Fig. 19).

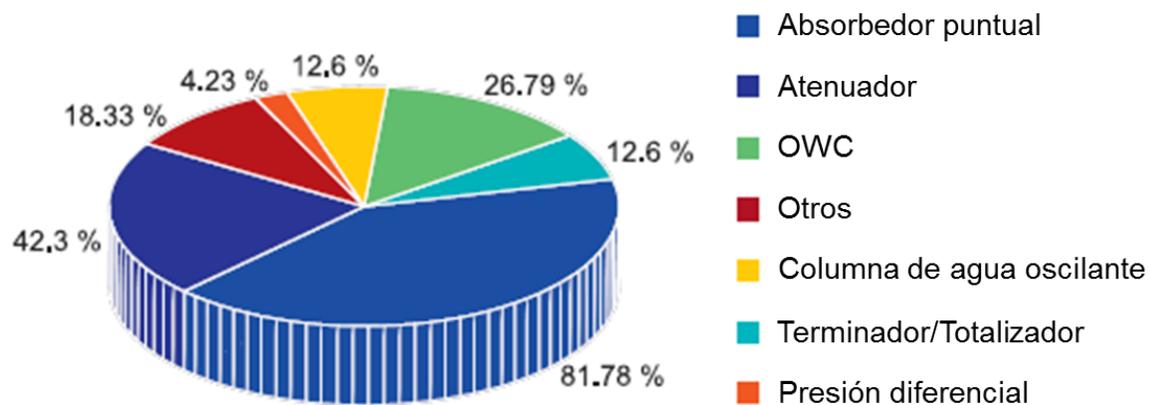


Fig. 19. Porcentaje de desarrollo para cada WEC. Adaptado con los mismos datos de *Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment*, López, et al, 2013 [47].

#### 5.4. Generación y eficiencia de algunos WEC que se han desarrollado

El recurso asociado con la energía del oleaje en el Caribe es uno de los más sostenibles del mundo. El Caribe opera con magnitudes de EA de 8-14 kW/m. Esto representa un rango operativo de 6 kW/m en comparación con rangos de 95 kW/m

y 50 kW/m en regiones por encima de los 30° Norte y por debajo de los 30° Sur respectivamente [30, 50]. Como tal, un dispositivo WEC diseñado para el Caribe capturará un mayor porcentaje del recurso WE que sus contrapartes de regiones de alta latitud. Se requieren dispositivos más grandes para alturas de olas grandes, pero serán ineficaces cuando pasen olas más pequeñas. De manera similar, se requieren dispositivos más pequeños para alturas de olas pequeñas, pero serán ineficaces cuando pasen olas más grandes. Por lo tanto, los dispositivos que operan en regiones con rangos pequeños, por ejemplo, el Caribe, se utilizarán de manera más efectiva.

Todos los dispositivos WEC tienen un rango operativo en el que pueden comenzar a recolectar energía y cuando ya no pueden recolectar energía porque han alcanzado su capacidad máxima. El dispositivo utilizado debe estar diseñado específicamente para ello porque, de lo contrario, pasará la mayor parte del tiempo en modo de supervivencia [50].

En términos de eficiencia, es difícil comparar las diversas tecnologías de WEC disponibles dado que las diferentes escalas y tamaños afectan los resultados de la comparación. Por ejemplo, un WEC a escala probado en laboratorio estará dominado por la inercia en lugar de la gravedad, debido a su tamaño que suele ser mucho menor, mientras que un prototipo probado en campo estará dominado por la gravedad debido al aumento en el tamaño, así mismo, probablemente contendrá más partes que un modelo de menor tamaño. Los resultados al comparar modelos a escala, simulaciones, pruebas en campo y WEC operativos, difiere mucho entre sí.[51]

El rendimiento de los WEC también está influenciado por las condiciones del oleaje donde son probados. Por ejemplo, el desempeño de un WEC de columna de agua oscilante probado en un sitio en donde el oleaje esté fuera del ancho de banda de resonancia del WEC será menor, por lo tanto, su eficiencia también será menor. Cuando el periodo propio de la estructura es similar al periodo de la ola, la eficiencia será la máxima [52].

La eficiencia de los convertidores de energía de las olas se pueden estimar por las diferentes etapas en el proceso de conversión de energía [53]:

1. Eficiencia neumática/hidrodinámica: esta es la relación entre la energía primaria absorbida por el dispositivo y la energía disponible dentro de la sección de interacción del dispositivo con las olas del océano.
2. Eficiencia turbina/mecánica: Es la relación entre la energía absorbida por el dispositivo y la energía mecánica.
3. Eficiencia eléctrica: Es la relación entre la energía mecánica y la energía eléctrica *in situ* a través de un generador.
4. Eficiencia de transmisión: esto ocurre durante la conversión de la energía eléctrica por parte del dispositivo en energía eléctrica aceptable para la red.

La comparación de la eficiencia de la energía en esta tesis es la relación entre la captura de energía y la energía disponible dentro del ancho de la parte de interacción principal del dispositivo, es decir, la boya del dispositivo.

La comparación entre diferentes desarrollos se hizo solo con la eficiencia más alta reportada de los dispositivos que fueron probados en condiciones de oleaje irregular tanto en laboratorio como *in situ* y simulaciones numéricas de WEC OWS, OWC y cuerpo oscilante. Las tablas 1 y 2 muestran los resultados de esta comparación de eficiencias y la energía que generó cada dispositivo.

Tabla 1. Eficiencia de dispositivos OWS. Adaptado de Anderino y Li, 2019 [51].

Nombre/Tipo	Escala	Potencia de olas disponible	Eficiencia reportada	
Cuerpo cilíndrico único	Simulación	26 kW/m	(a) 4% (b) 3% (c) 6% (d) 6% (e) 9%	Eficiencia de con 5 anchos diferentes
Cuerpo cilíndrico único	Simulación	40 kW/m	19%	El modelo fue extrapolado a un dispositivo de 22 m de ancho.
DEXA WEC	Modelo a escala 1:30	26 kW/m	8%	
Lifesaver	Simulación y 1 año de prueba en el mar	26 kW/m	12%	
Sistema multicuerpo	Simulación	Null	10% 15%	
Cuerpo cilíndrico único	Simulación	34 kW/m	16%	
Cuerpo único	Pruebas de modelo	16 kW/m	14%	
Sistema Danés del programa de energía de las olas	Pruebas de modelo	16 kW/m	30%	
AquaBuoy	Simulación de tamaño de prototipo	12 kW/m 21 kW/m 26 kW/m 15 kW/m	20% 17% 14% 21%	
SeaDog	Simulación de tamaño de prototipo	12 kW/m 21 kW/m 26 kW/m 15 kW/m	24% 16% 16% 21%	
Wavebob	Simulación de tamaño de prototipo	12 kW/m 21 kW/m 26 kW/m 15 kW/m	40% 51% 46% 45%	
Sistema flotante de dos cuerpos	Simulación	15 kW/m 22 kW/m 27 kW/m 37 kW/m	27% 29% 36% 27%	
Conjunto de boyas flotantes	Simulación	15 kW/m	11%	
Boya flotante de dos cuerpos	Simulación	31 kW/m	25%	

Tabla 2. Eficiencia de dispositivos de cuerpo oscilante. Adaptado de Anderino y Li, 2019 [51].

Nombre/Tipo	Escala	Potencia de olas disponible	Eficiencia reportada	
Salter's Duck	Experimentos y simulación a gran escala	16 kW/m 23 kW/m 27 kW/m 38 kW/m	65% 75% 79% 68%	Análisis realizado con control óptimo y reactivo del dispositivo. El ancho del dispositivo es de 30 m
Top Hinged Flap	Simulación a gran escala	25	25%	El ancho del dispositivo es de 12 m
Biopower	Simulación a gran escala	10 kW/m 67 kW/m NA	Average 45%	Potencial de recursos de verano Potencial de recurso invernal El ancho del dispositivo es de 6,6 m
Basado en Oyste	Tanque de olas	na	35%–65%	El ancho del dispositivo es de 6 m a 24 m
Weptos	Varios	6–29 kW/m Diferentes sitios de prueba	12%–32%	El ancho osciló entre 2,9 m y 9,6 m (programa de desarrollo de Weptos WEC desde pruebas de laboratorio, pruebas de prototipos hasta pruebas en el mar)
Offshore 1 (Weptos)	Puebas en mar	na	Up to 57%	Eficiencia lograda cuando el período es de aproximadamente 2 s
Weptos	Simulaciones	4.38 kW/m	50%–57%	Eficiencia cuando el período es de 2,9 a 3,4 s. 10 rotores/lado Ancho activo = 30 m, l rotor = 3 m ancho
Variante del Oyster	Simulaciones	26 kW/m	22% 40% 15%	Ancho del dispositivo 6 m Ancho del dispositivo 12 m Ancho del dispositivo 18 m
Pelamis	Simulaciones y pruebas en mar	12 kW/m 21 kW/m 26 kW/m 15 kW/m	21% 15% 14% 18%	Informes de varios experimentos, pruebas, etc.
Langlee Technology	Experimentos de laboratorio	16 kW/m	7% 9%	Ancho del dispositivo 25 m Ancho del dispositivo 37.5 m
Wave Piston	Simulación	12 kW/m 3.5 kW/m	8% 15%	
SEAREV	Simulación	25 kW/m	20% 16% 25%	Ancho del dispositivo 13.6 m Ancho del dispositivo 30 m Ancho del dispositivo 30 m

Las eficiencias de los dispositivos analizados se encuentran desde un 79 % al 3%, siendo los dispositivos OWC y cuerpo oscilante los de la eficiencia más alta. Sin embargo, la mayoría son datos de simulaciones y con diferentes condiciones de oleaje y tamaño del WEC.

### 5.5. Impacto ambiental de los WEC

Para que la energía de las olas tenga una contribución significativa a la red eléctrica, los WEC deberán implementarse en conjuntos a gran escala. La razón es que un solo WEC o un pequeño conjunto de WEC no tendría suficiente potencia instalada para abastecer poblaciones. Además, la necesidad de espacio es una barrera por la complejidad y falta de marcos legales, el riesgo ambiental y la incertidumbre respecto al impacto ambiental que pueden generar un parque undimotriz durante las fases de construcción, operación y desmantelamiento [54].

Las preocupaciones por el posible impacto ambiental que puede tener un parque undimotriz y que se han analizado incluyen:

1. Las estructuras flotantes pueden atraer aves migratorias y atrapar a mamíferos marinos en condiciones de mar agitado.
2. Los parques undimotrices pueden reducir los efectos del clima marítimo local al eliminar demasiada energía y, por lo tanto, afectar el transporte natural de sedimentos en la costa. Esto puede ser ideal si los dispositivos WEC actúan como rompeolas y ayudan a reducir la erosión costera donde sea necesario o puede ser negativo si los dispositivos obstaculizan el flujo natural y alteran la dispersión de sedimentos a lo largo de la playa.
3. Los ruidos de construcción y el ruido distribuido por los cables submarinos pueden estresar la vida acuática. Además de esto, el dragado de arena fina puede obstruir las branquias de los peces, reduciendo su capacidad de supervivencia.

4. La interferencia electromagnética de los cables submarinos se puede identificar en animales como anguilas y tiburones, desorientándolos y alterando su comportamiento natural.
5. Además, la vida marina buscará dispositivos recién instalados para la colonización, ya que su estructura se presentará como un arrecife artificial. Los animales que viven en o alrededor de estos dispositivos son propensos a los peligros de la fuga de lubricantes, ya que los fluidos utilizados en estos equipos pueden ser tóxicos para el ecosistema marino. Las operaciones de pesca también pueden verse afectadas negativamente, ya sea por el acceso restringido a los pescadores o por la alteración de los patrones migratorios de la vida de los peces[50].

El estado actual de desarrollo de los WEC, junto con la variación significativa en el diseño de los WEC y la pequeña cantidad de estudios hasta el momento, dificulta derivar conclusiones definitivas sobre los impactos de los WEC que son necesarios para evaluar el riesgo ambiental.

El número limitado de parques WEC operativos limita la evaluación precisa de los impactos ambientales del sector de la energía undimotriz [55]. De hecho, el número de publicaciones científicas que tratan sobre los riesgos e impactos ambientales de los WEC era mínima antes de 2006 y comenzó a aumentar sólo después de 2009.

La mayoría de los estudios ambientales se centran en las turbinas mareomotrices y los convertidores de energía de las olas, mientras que un número menor en las corrientes oceánicas, OTEC y gradiente salino [56]. Algunos de los estudios existentes analizaron los impactos durante la fase operativa del proyecto, mientras que muy pocos evaluaron los posibles impactos antes de la instalación, durante la instalación y el desmantelamiento. La mayoría de los impactos evaluados son ambientales, mientras que los socioeconómicos y los efectos químicos negativos son poco considerados [57].

Para las principales tecnologías WEC, OWC, OWSC y turbinas mareomotrices, la pérdida física del medio, el cambio hidrológico, el sonido y los campos electromagnéticos son las principales perturbaciones producidas por los dispositivos. Así mismo, los hábitats de los peces, de los mamíferos marinos y de los organismos bentónicos están sujetos a un mayor número de perturbaciones y un mayor riesgo ecológico en cualquiera de las fases del ciclo de vida para las tres tecnologías [54].

Entre los principales impactos identificados se encuentran los daños físicos causados a los hábitats marinos y costeros y los posibles efectos del ruido sobre los mamíferos marinos.

La comunidad de investigadores que examinan las interacciones de los WEC con los animales, los hábitats y los procesos de los ecosistemas se han unido en torno al término estresor, es decir, aquellas partes de un sistema que pueden causar estrés, lesiones o muerte; y receptor, es decir, animales marinos, hábitats y procesos de los ecosistemas [58].

Después de aproximadamente una década de investigación, los factores estresantes que parecen presentar el mayor riesgo incluyen las palas en movimiento de las turbinas, así como las interacciones potenciales con líneas de amarre, anclas o cimientos, cables de exportación de energía y las emisiones e interacciones que pueden resultar de cualquier de estas partes. Los receptores incluyen los animales marinos que viven y atraviesan las inmediaciones de un parque WEC; los hábitats en los que se implementan los dispositivos y procesos oceanográficos, como el movimiento natural de las aguas, la altura de las olas, el transporte de sedimentos y las concentraciones de gases disueltos y nutrientes que sustentan la vida marina [59]. Algunas respuestas de los receptores a los factores estresantes pueden ser cambios en el comportamiento, desorientación, cambio de hábitat, atracción o pérdida de la biodiversidad, lesiones y muerte [56].

El modelado de impactos ambientales es la herramienta que se puede emplear a falta de datos para predecir los efectos sobre el medio del uso de estas tecnologías, Las variables biológicas, físicas y químicas para alimentar estos modelos son exclusivas de cada sitio ya que existe variaciones diarias, estacionales y anuales. Hasta ahora es una de las herramientas disponibles para predecir las afectaciones y consecuencias de la instalación, operación y desmantelamiento antes de llevarse a cabo el proyecto, con datos empíricos de otros proyectos que se han realizado [59].

Varios autores coinciden en que la frecuencia relativa de cada efecto ambiental y de los receptores varía según el tipo de dispositivo. El ruido y las colisiones son los efectos negativos más mencionados, sin importar del tipo de dispositivo del que se trate. Los campos electromagnéticos, la dinámica hidrosedimentaria, el cambio del hábitat y la contaminación se estudia en menor medida su efecto.

Al igual que los efectos ambientales, los receptores ambientales también difieren según el tipo de dispositivo. Cuando la energía se extrae de las olas y las mareas, los receptores son la fauna marina, las tortugas, el plancton y los invertebrados y los cambios físicos en la costa. Las comunidades bénticas, los peces, los mamíferos marinos y las aves se mencionan más en otras tecnologías [56].

Para esta investigación no se utilizó ninguna herramienta o estudio para medir el impacto, sin embargo, se llevó un registro fotográfico para evidenciar las posibles alteraciones que produjera la presencia del dispositivo en el fondo marino, que se presenta en la discusión de resultados.

## 6. Caracterización del oleaje

Observando desde la playa generalmente siempre se pueden ver las olas en la superficie del mar. Mirando con atención estas olas son oscilaciones u ondulaciones de la superficie del mar con una altura, donde la altura es la distancia vertical entre la parte inferior de un valle y la parte superior de una cresta. La longitud de la ola, es la distancia entre las crestas adyacentes. Observando las olas durante unos minutos más, es posible verificar que la altura de las olas y la longitud no son constantes. Las alturas varían aleatoriamente en el tiempo y el espacio, y las propiedades estadísticas de las olas, como la altura media promedio, de unos pocos cientos de olas, cambia día a día. Estas ondas marinas, son generadas principalmente por el viento. A veces el viento local genera las olas, otras veces las tormentas distantes generan olas, que finalmente llegan a la costa [60].

### 6.1. Descripción de las olas

Las ondas son deformaciones periódicas de una interfaz. En oceanografía, las olas son deformaciones de la superficie del océano, es decir, de la interfaz océano-atmósfera. Están influidas principalmente por el viento y las contrarresta la gravedad. Cualquier descripción física adecuada del oleaje incluye la forma de su superficie y el movimiento del fluido debajo de la ola. Una ola que puede ser descrita en términos matemáticos simples, se denomina onda simple. Las olas sinusoidales o armónicas simples son un ejemplo de estas, ya que el perfil de su superficie,  $\eta(x, y, t)$ , puede ser descrito por una función seno-coseno simple (Fig. 21) y se representa con la ecuación (1), Sin embargo, es importante considerar que se trata aunque de un fenómeno sumamente complejo, por lo que se debe simplificar de esta manera para poder estudiarlo [61].

$$\eta(x, y, t) = a \cos \left[ \frac{\sigma^2}{g} (x \cos \theta + y \sin \theta) - \sigma t - \varepsilon \right] \quad (1)$$

Donde

$a$  = Amplitud

$\sigma$  = Frecuencia angular

$T$  = Periodo de la onda

$\theta$  = Ángulo de incidencia con respecto al eje X

$\varepsilon$  = Fase

$x, y$  = posición espacial de la onda

$t$  = tiempo

El conjunto de ondulaciones continuas que se forman en la superficie del agua, es conocido como oleaje y se presenta tanto en océanos como en mares, ríos, lagos, canales y otras. Dichas oscilaciones son variables en el espacio y en el tiempo, pero de manera sencilla pueden idealizarse, como una superposición de ondas sinusoidales (Fig. 20) que se desplazan en cierta dirección de propagación y matemáticamente se representan con la ecuación (2).

$$\eta(x, y, t) = \sum_i a_i \cos \left[ \frac{\sigma_i^2}{g} (x \cos \theta_i + y \sin \theta_i) - \sigma_i t - \varepsilon_i \right] \quad (2)$$

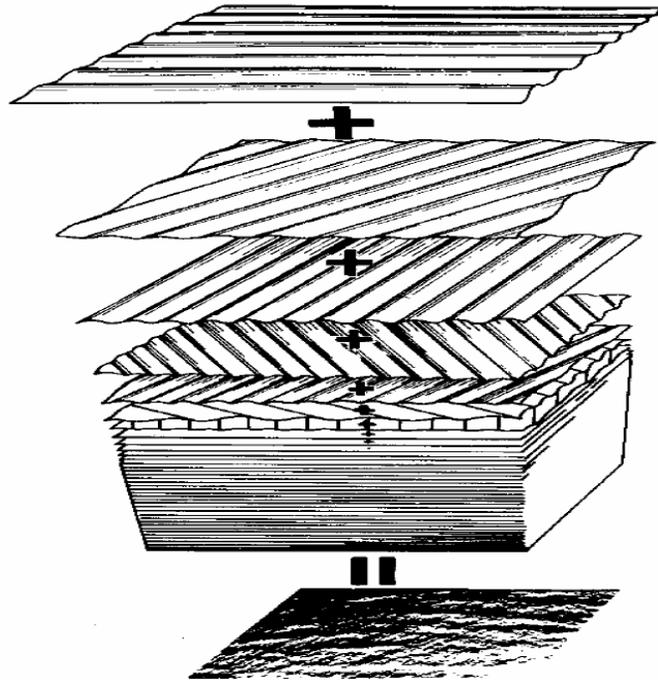


Fig. 20. Representación de la estructura del oleaje aleatorio. Adaptado de *Practical methods for observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics*, Pierson, et al, 1971 [62].

Aunque normalmente las olas que se observan no guardan mucho parecido con las ondas sinusoidales, puede utilizarse la descripción de éstas para describir un tren de oleaje, definido como una serie de crestas de olas suaves, uniformes, paralelas, de igual altura y equidistantes unas de otras, que se mueven a velocidad constante en dirección perpendicular a las crestas y sin cambiar de forma. En realidad, este tipo de oleaje puede aproximarse al caso de un tren de olas de mar de fondo, que se propaga en una zona donde el viento está totalmente en calma, en la sección 6.2.2 se explica a detalle.

La razón principal para asumir esta simplificación es que siempre es posible hallar un número, generalmente elevado de ondas sencillas o armónicas, de manera que la combinación de todas ellas produzca la estructura irregular que se observa en la superficie.

Por lo anterior, el estado del mar será el resultado de la superposición de múltiples ondas que se propagan sobre la superficie del agua, cada una según sus propiedades individuales. Así, cada una poseerá una velocidad de propagación y unos elementos que se definen en la Fig. 21

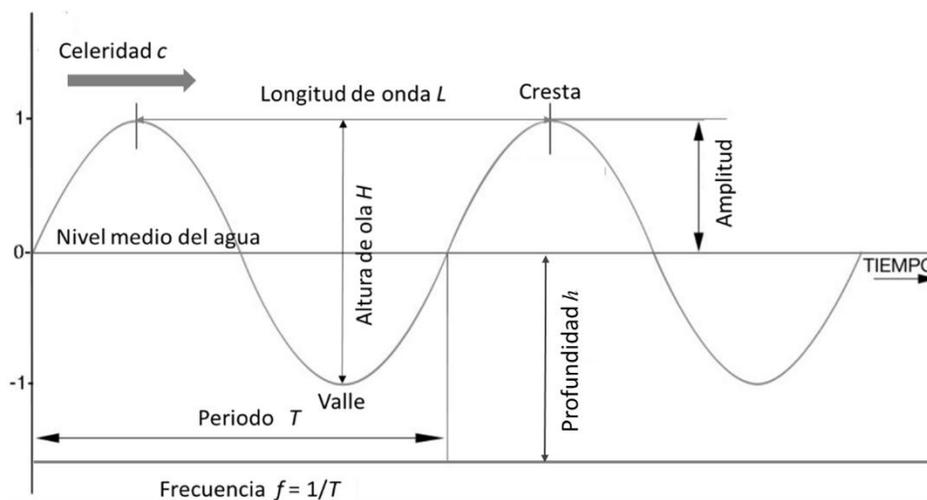
### 6.1.1. Parámetros característicos de las ondas

Las olas se caracterizan por tener longitud de onda,  $L$ , que es la distancia horizontal entre dos crestas; altura de ola,  $H$ , que es la distancia vertical desde el máximo de una cresta hasta el fondo de un valle, periodo de la onda,  $T$ , que es el tiempo transcurrido para que dos crestas consecutivas pasen por el mismo punto y el inverso de  $T$ , la frecuencia,  $f$ , que es el número de crestas o senos que pasan por un punto fijo en un segundo. Finalmente, la velocidad con la cual una cresta se mueve horizontalmente a través de la superficie del mar, es definida como celeridad,  $c$ , o velocidad de fase o velocidad de onda (Fig. 21). La celeridad se calcula con la ecuación (3). La celeridad también puede ser calculada con la frecuencia angular,  $\sigma$ , y con el número de onda,  $k$ , estas se calculan con la ecuación (4) y (5) respectivamente.

$$c = \frac{L}{T} \text{ o } \frac{\sigma}{k} \quad (3)$$

$$\sigma = \frac{2\pi}{T} \text{ o } 2\pi f \quad (4)$$

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (5)$$



*Fig. 21. Representación sinusoidal y parámetros de las olas.*

Como en todo movimiento ondulatorio, no hay transporte de masa, sino propagación de energía, las partículas de agua ejecutan un movimiento circular, pero no se trasladan. Sin embargo, existirá transporte de masa si además del oleaje, existe una corriente marina de cualquier clase. Los objetos que alcanzan la costa no son transportados por el oleaje, sino por las corrientes marinas, de forma que alcanzan la playa cuando la última cresta rompe contra el litoral.

Existen al menos tres formas de clasificar el movimiento oscilatorio que presenta la superficie del mar [61], las cuales corresponden:

- 1) a la profundidad relativa sobre la cual se propaga,
- 2) a la fuerza principal que lo genera y
- 3) a su período de onda.

A continuación se describen algunas de ellas.

### 6.1.2. Clasificación de las ondas de acuerdo con la profundidad

Es importante notar que la distinción entre olas en aguas profundas y olas en aguas someras, tiene poco que ver con la profundidad del fondo. La distinción está determinada por la razón entre la profundidad del agua y la longitud de onda  $h/L$ . El océano profundo puede ser somero con respecto a las olas siempre y cuando la longitud de la onda exceda el doble de la profundidad del fondo [61].

- *Ondas en aguas profundas*: Cuando la profundidad  $h$  es igual o mayor que la mitad de su longitud de onda  $L$ , en este caso el oleaje no experimenta modificaciones por la profundidad.
- *Ondas transicionales*: La transición de ondas de aguas profundas a ondas en aguas someras, ocurre cuando la longitud de onda  $L$  es mayor que el doble de la profundidad  $h$ .
- *Ondas en aguas someras*: Cuando la profundidad  $h$  es igual o menor que un vigésimo de su longitud de onda  $L$  aquí el oleaje, está completamente controlado por la profundidad del agua [60].

### 6.1.3. Clasificación de las ondas de acuerdo con el periodo $T$ , fuerza generadora y fuerza restauradora

Los registros de oleaje están compuestos por ondas con una amplia gama de periodos, alturas y longitudes de onda. Tomando esto en cuenta, de acuerdo con su periodo, la fuerza generadora y la cantidad de energía que normalmente portan, se pueden distinguir los siguientes tipos de ondas, que se presentan en la Fig. 22 y en la Tabla 3.

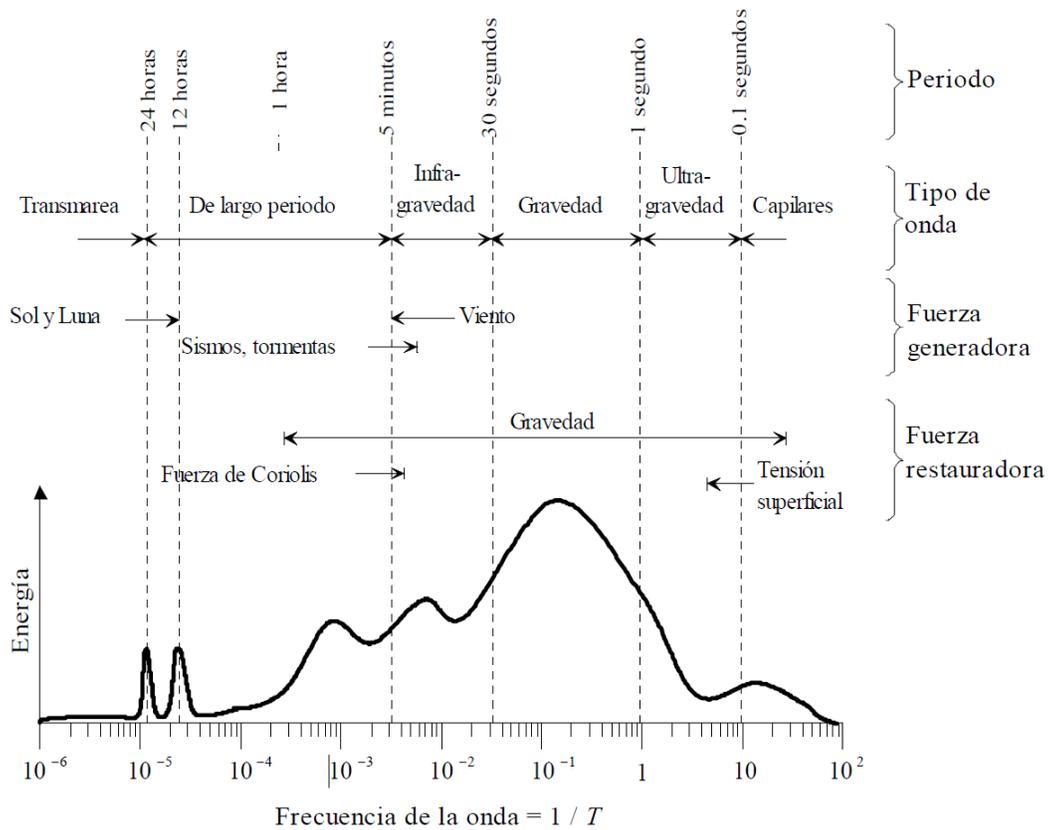


Fig. 22. Clasificación de las ondas de acuerdo con diferentes características. Adaptado de *Análisis y descripción estadística del oleaje*, Silva, 2005 [61].

Tabla 3. Clasificación de las ondas. Modificado de Johnson, 1978 [63].

Nombre	Periodo $T$	Longitud $L$	Altura $H$	Fuerza generadora	Fuerza restauradora
Capilares	0 a 0.1 s	2 a 7 cm	1 a 2 mm	Viento	Tensión superficial
Ultragravedad	0.1 a 1 s	Centímetros	Centímetros	Viento	Tensión superficial y gravedad
Gravedad	1 a 30 s	Metros a cientos de metros	De centímetros a 15 m	Viento	Gravedad
Infragravedad	30 s a 30 min	100 a 200 m	pequeña	Viento	Gravedad y fuerza de Coriolis
Periodo Largo	5 min a 24 h	Pueden llegar a ser de escala planetaria	1 a 5 m	Sismos, derrumbes, atracción de cuerpos celestes	Gravedad y fuerza de Coriolis
Transmarea	Más de 24 h	-	0 a 12 m	Oscilaciones climáticas	Gravedad y fuerza de Coriolis

Como se puede observar las ondas en el océano pueden ser clasificadas de varias formas, una clasificación, usa las fuerzas que generan el oleaje, las cuales a su vez están asociadas con una longitud de onda, periodo y altura característica. Otra

clasificación se basa en la representación de un espectro de frecuencia, de todas las ondas oceánicas, ésta distingue entre ondas capilares, ondas gravitatorias, ondas de largo período y más largas que las ondas de marea. Existe otra clasificación que se basa en las fuerzas restauradoras responsables de regresar las partículas de agua a su posición promedio en la columna de agua. Así, por ejemplo, en la clasificación que se usa para la fuerza generadora tenemos:

- Las fuerzas meteorológicas: el viento, la presión del aire, y otros meteoros, generan el oleaje local y mar de leva.
- Los sismos: estos generan maremotos, grandes ondas conocidas como tsunamis, las cuales son ondas en aguas someras u ondas largas, ya que su longitud de onda es mucho mayor que la profundidad donde se propagan.

## 6.2. Clasificación del oleaje

Las olas, cuya fuerza generadora es el viento, se forman en un área donde existe transferencia de energía del viento hacia la superficie del océano. A esta área de generación se le conoce, en oceanografía, como **fetch**. Ahí el fenómeno es aleatorio, el oleaje se propaga en diferentes direcciones, aunque la dirección dominante es la que imprime el viento. El oleaje en la zona de generación, es decir en el *fetch*, es totalmente caótico y se le conoce como oleaje tipo **sea** u oleaje local y el oleaje que se ha apartado del *fetch*, como oleaje de tipo **swell**, mar de leva u oleaje distante (Fig. 23). Entre estos dos existen un sin número de estados intermedios [61].

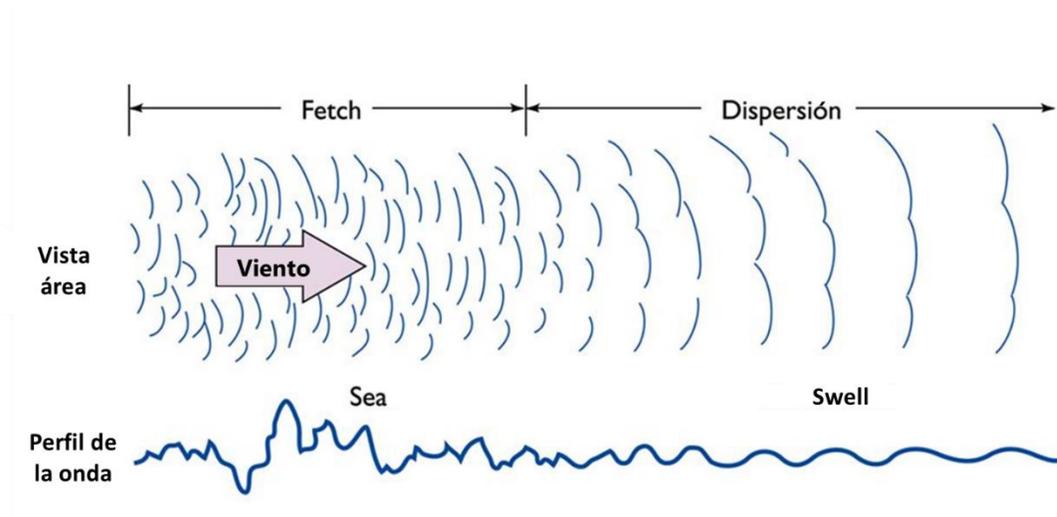


Fig. 23. Área de generación del oleaje y tipo de oleaje que origina. Adaptado de *Types of ocean surface waves, wave classification*, Toffoli, Bitner-Gregersen, 2017 [64].

### 6.2.1. Oleaje local o *Sea*

Este tipo de oleaje es el que se forma y desarrolla en una superficie líquida, bajo la acción directa y continua del viento, generando ondas de altura, periodo, longitud y dirección de propagación aleatoria e independiente, cuya interferencia da lugar a un aspecto caótico de la superficie líquida (Fig. 24). El oleaje tipo *Sea* presenta ondas muy peraltadas con periodos y longitudes de onda pequeños, aunque en con una amplia gama de frecuencias[60].

Las características que definen este tipo de oleaje son:

- Gran irregularidad, ya que la altura de la superficie líquida es impredecible, carece de periodicidad
- Asimetría o gran desigualdad entre la forma del valle y la cresta de las olas
- Gran peralte de las olas. Las olas presentan una altura relativamente grande para su longitud de onda [64].

### 6.2.2. Oleaje distante o *Swell*

Este oleaje abandona el área de generación y se propaga a través de superficies del mar, sin la acción significativa del viento, y se atenúa progresivamente hasta su completa extinción. El oleaje tipo Swell presenta olas menos peraltadas que el oleaje tipo Sea, con periodos y longitudes de onda grandes en una gama estrecha de frecuencias. Da lugar a un aspecto ordenado y regular de la superficie líquida (Fig. 24).

Cuando el oleaje ha abandonado el área de generación, las componentes de diferentes periodos se segregan por su carácter dispersivo. Las olas de mayor periodo viajan más rápido y se caracterizan por su mayor simetría y por presentar un aspecto más ordenado. Su forma se acerca bastante a la de una onda sinusoidal [60].

Cuando el oleaje se propaga y abandona el área de generación ocurren tres fenómenos [61]:

- Pierden energía y entonces, las olas viajan a expensas de su propia energía (decaimiento),
- El oleaje sufre una doble dispersión, una angular, en la que las olas se dispersan en todas direcciones, y otra radial, debida a que la velocidad es función directa del periodo, por lo que las olas más largas viajan más rápido que las más cortas. Se produce un filtrado de olas.
- Fenómeno de soldadura, según el cual las ondas de periodos cercanos se fusionan en largas crestas de onda, lo cual origina que la superficie caótica se simplifique. Al envejecer el oleaje y especialmente cuando abandona el área de generación va tendiendo a un oleaje de tipo swell.



Fig. 24. **Izq.** Oleaje tipo Sea, **Der.** Oleaje tipo Swell.

### 6.3. Propagación del oleaje

Despreciando la disipación del oleaje por la acción del fondo, a partir de la ecuación de onda sinusoidal, es posible deducir que, para una onda que se propaga en un líquido, la celeridad  $c$  depende de la longitud de la onda  $L$  y de la profundidad  $h$  en la forma:

$$c = \sqrt{\frac{gL}{2\pi} \tanh\left[\frac{2\pi h}{L}\right]} \quad (6)$$

En el caso de ondas en aguas profundas cuando  $h \gg L$ , la ecuación (6) se puede simplificar a:

$$c = \frac{gT}{2\pi} \quad (7)$$

Esta consideración puede mantenerse hasta una profundidad mínima de  $h = L/2$ , para aguas someras podemos aproximar  $\tanh\left[\frac{2\pi h}{L}\right] \approx \frac{2\pi h}{L}$  con lo que la ecuación queda:

$$c = \sqrt{gh} \quad (8)$$

Es decir, en esta agua, la velocidad sólo es función de la profundidad, disminuyendo cuadráticamente a medida que el oleaje se aproxima a la costa, pasando por aguas menos profundas cada vez.

Las olas de aguas profundas que tienen las mayores longitudes de onda y los periodos más largos viajan más rápido, y por lo tanto son las primeras en llegar a regiones distantes del *fetch*. Esta separación de onda en virtud de sus diferentes tasas de recorrido es conocida como dispersión y la ecuación (7) se conoce a veces como la ecuación de dispersión.

Cuando se van sumando ondas individuales de longitudes y periodos similares, forman grupos de onda. Las ondas individuales viajan más rápido que un grupo por lo tanto, cuando una onda aparece en la parte posterior del grupo, se desplaza a través de éste, y desaparece en la parte frontal. La velocidad que adquiere este grupo de olas se conoce como la velocidad de grupo y es la mitad de la velocidad de la onda individual que viaja a través de ese grupo (ver ecuación (9)) por lo tanto en términos de la aparición y la propagación de la onda, la velocidad de grupo es más significativa que las velocidades de las ondas individuales en el mismo. Las olas individuales no persisten por mucho tiempo en el océano abierto, sólo el tiempo que tardan en pasar a través de un grupo [65].

$$c_g = \frac{c}{2} \quad (9)$$

#### 6.4. Transformación del oleaje

El oleaje al estar cada vez más cerca de la costa, está expuesto a sufrir modificaciones debido a los cambios de nivel en el fondo marino y/o barreras que se presenten en su trayecto. A partir de la teoría lineal del oleaje se puede deducir

que una onda comienza a sentir la presencia del fondo cuando la profundidad en la que se encuentra es  $h < L/2$ . Como consecuencia de esta interacción de las ondas con el fondo, el tren de onda u oleaje se transforma existiendo varios de los procesos incluidos en la transformación, fácilmente visibles para un observador en la costa. Estos procesos de transformación se traducen fundamentalmente en: variaciones en la altura de la ola y en la dirección de propagación [65].

Los fenómenos que modifican el oleaje son la reflexión, difracción, refracción y someramiento que se describen a continuación.

### 6.4.1. Someramiento

A medida que un tren de ondas se aproxima a la costa, es posible observar un aumento de la altura y una reducción de su longitud, la variación en la batimetría de la zona altera la celeridad de las olas, transformando su energía cinética en energía potencial. La onda sufre un aumento en su altura de ola, originándose una asimetría en el perfil de la misma, hasta que finalmente rompe. A este fenómeno se le conoce como someramiento[66].

Cuando la altura de la ola coincide aproximadamente con la profundidad, la ola se vuelve inestable hasta que rompe. A este proceso se le conoce como rotura, en el que se disipa una gran cantidad de energía en forma de turbulencia (Fig. 25) [65].

### 6.4.2. Refracción

Este fenómeno se origina cuando las olas se aproximan a la costa, ya que la celeridad de la ola depende de la profundidad en la cual se propaga. Si la celeridad de la onda disminuye con la profundidad, la longitud de la onda debe disminuir proporcionalmente. Por lo tanto, el oleaje toma una nueva orientación conforme a los cambios del fondo, provocando que la cresta se deforme en su proyección horizontal, de tal forma que dichos frentes se vuelven paralelos a las líneas batimétricas sobre las que viajan cuando llegan a aguas someras. Debido a que

este efecto depende de la relación entre la profundidad y la longitud de onda se representa con  $h/L$  [64].

Las olas también pueden refractarse no necesariamente por el fondo, sino también por corrientes marinas o algún obstáculo que ocasione que una cresta se desplace más rápido que otra. La refracción es importante considerarla, debido a que la mayoría de las obras marítimas están localizadas en aguas someras o intermedias (Fig. 25) [65].

### 6.4.3. Difracción

En su propagación hacia profundidades más reducidas el oleaje encuentra la presencia de barras u otras estructuras naturales y artificiales, que dan lugar a un fenómeno llamado difracción[60].

La difracción es fundamentalmente una transferencia lateral de energía, que se produce cuando las olas al viajar inciden sobre alguna barrera artificial o natural, las ondas se curvan a su alrededor y penetran dentro de la zona protegida, con lo que se presenta una expansión lateral o, lo que es lo mismo, es el causante de que parte de la energía transportada por la onda, se transmita a las zonas de sombra generadas por estos obstáculos, como por ejemplo en el morro de un rompeolas o en la entrada de un recinto portuario formado por dos rompeolas o por la presencia de una isla (Fig. 25) [67].

### 6.4.4. Reflexión

Este fenómeno lo podemos observar si el oleaje no disipa toda su energía e incide en alguna estructura natural o artificial. A menudo los efectos de la reflexión del oleaje pueden ser tan importantes como las de la refracción y la difracción, en el diseño de las estructuras costeras, particularmente para estructuras asociadas con el desarrollo de puertos. La reflexión del oleaje indica que su energía está en oposición a la disipación. Por consecuencia, al existir múltiples reflexiones y en

ausencia de suficiente disipación de energía, dentro de un complejo portuario, puede traer como resultado una gran acumulación de energía que aparece como oleaje de agitación y oscilaciones que pueden causar movimiento excesivo en las embarcaciones atracadas y en otras instalaciones flotantes, dando como resultado el desarrollo de grandes esfuerzos en las amarras (Fig. 25) [67].

La reflexión en playas, acantilados o estructuras, puede cambiar por completo el oleaje incidente, dando lugar a desplazamientos de la zona de rompientes, cambios en el nivel de disipación de energía o alteraciones al transporte de sedimentos. Esto hace que, si se quiere determinar adecuadamente la morfodinámica o estabilidad de la zona, sea de gran importancia la determinación del campo de ondas, que existe frente a una estructura reflejante natural o artificial [60].

Entonces la energía de la ola puede tener las siguientes modificaciones:

- Disiparse, como lo hace ante un fondo rugoso o una estructura porosa.
- Transmitirse parcialmente detrás de una barrera, como es el caso de un rompeolas.
- Reflejarse en dirección distinta a la de incidencia sobre la barrera [65].

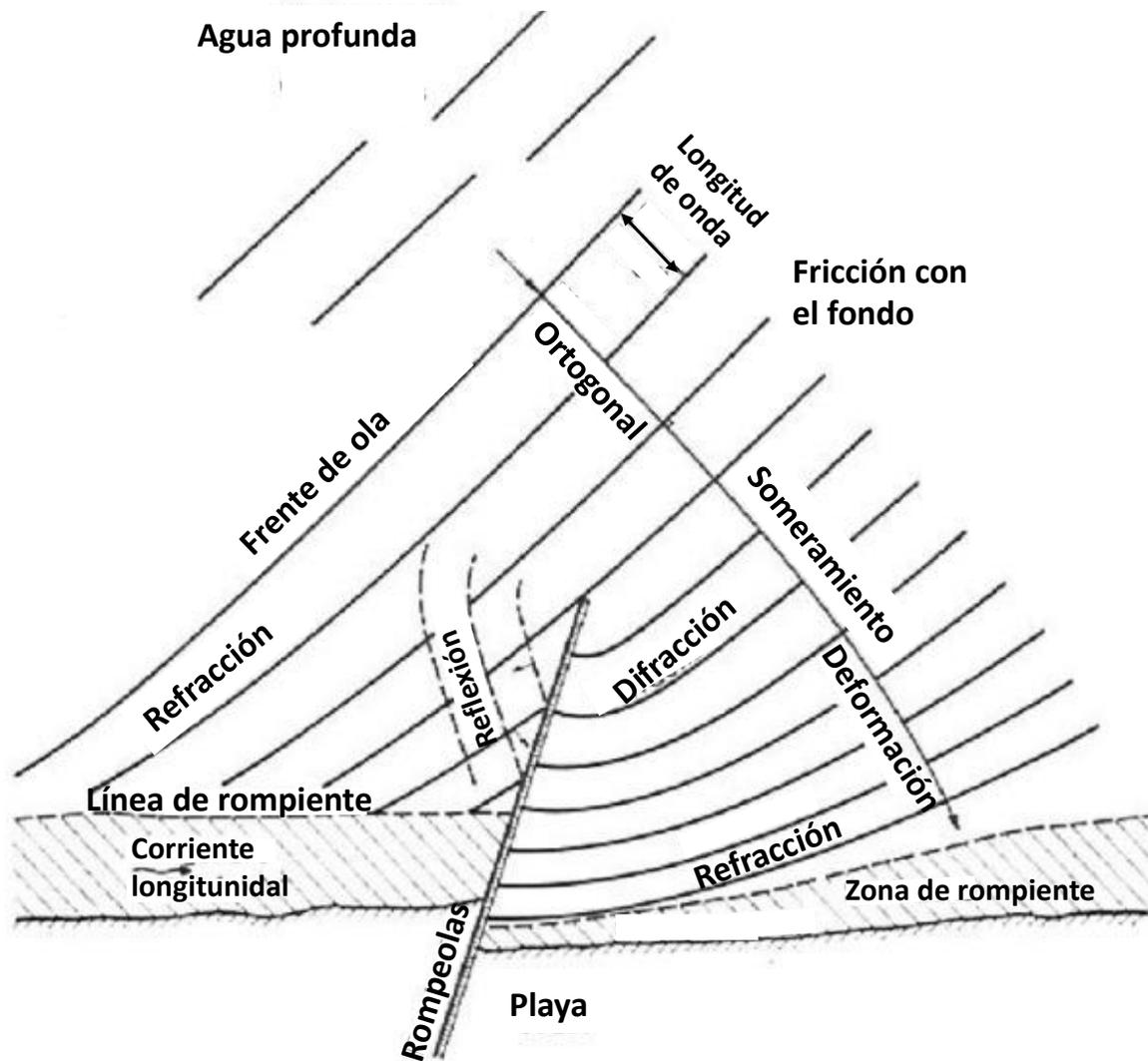


Fig. 25. Transformación del oleaje. Adaptado de *Hydrodynamics of coastal regions*, Svendsen-Jonsson, 1976 [66].

## 6.5. Energía de la ola

En una ola, cada partícula está dotada de energía cinética y energía potencial. La energía cinética corresponde al movimiento orbital de las partículas del agua. La energía potencial corresponde al desplazamiento de la partícula respecto a su posición de equilibrio [61].

La energía total,  $E$ , por unidad de área está dada por la ecuación de la teoría lineal de Airy (1845):

$$E = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (10)$$

Puesto que la energía de las olas depende del cuadrado de su altura  $H$  es evidente que la disminución de esta altura con la profundidad  $h$  es importante en el estudio de la distribución de la energía de las olas en profundidad. La determinación de la presión ejercida por una ola contra un obstáculo, debida a la transferencia de su energía cinética sobre el mismo, es de gran interés para el aprovechamiento de la energía de las olas. La presión de las olas varía, al igual que la energía, con el cuadrado de la amplitud y se atenúa con la profundidad en forma exponencial [65].

## 6.6. Potencia de la ola

En aguas profundas, las olas viajan en grupos, con zonas de perturbación mínima entre los grupos. Las ondas individuales se extinguen en la parte delantera de cada grupo. Es obvio que ninguna energía se transmite a través de regiones donde no hay olas, es decir, entre el grupo. La transmisión de energía es máxima, donde las olas en el grupo alcanzan el tamaño máximo. De ello se desprende que la energía está contenida dentro del grupo de ondas, y se propaga a la velocidad de grupo por unidad de longitud de la cresta de la ola que se llama potencia de la ola,  $P$ , y es el producto de la velocidad de grupo,  $c_g$ , y la energía de onda por unidad de área,  $E$  (11).

$$P = c_g E \quad (11)$$

## 6.7. Estado de mar

Un fenómeno físico puede considerarse estacionario si las condiciones externas que influyen en él permanecen constantes durante un cierto tiempo. En el caso del oleaje, a este tiempo se le ha denominado estado de mar. Durante el estado de mar y debido a la inercia del fenómeno, existe un cierto equilibrio entre las fuerzas que intervienen en el proceso, estas son la fuerza generadora y la fuerza restauradora, cuya manifestación permanece estacionaria [61].

Otra definición es la que establece que el estado de mar representa cada una de las posiciones de la dinámica del oleaje, es decir, la superposición de varias ondas, admitiendo que éstas tienen una variación lo suficientemente lenta para considerar al proceso como estacionario. Así pues, el oleaje puede considerarse formado por dos tipos de variaciones:

- *Variación de periodo corto.* La variación es muy rápida, del orden de segundos, durante la cual el proceso se considera estacionario.
- *Variación de periodo largo.* La variación es lenta, del orden de horas, y en ella evoluciona el estado del mar; hay variación de estado [61].

## 6.8. Generalidades estadísticas

Dentro de un intervalo de tiempo en un estado de mar, las propiedades estadísticas deben obtenerse a partir de una muestra estadísticamente representativa, es decir, contar con un periodo de tiempo de medición lo suficientemente corto para poder admitir la hipótesis de estacionariedad y lo suficientemente largo para que al hacer el análisis de la muestra se tenga un número representativo de olas.

Con el registro continuo de oleaje se obtiene información estadística, discreta en el tiempo que corresponde a un estado de mar. Dentro de las propiedades estadísticas del oleaje están definidos los momentos estadísticos de proceso estacionario y ergódico, lo que se denomina análisis del oleaje a corto plazo. La variación en el

tiempo de los parámetros estadísticos de los estados de mar constituye la curva de estados de mar, la estadística que se realiza en esta curva se conoce como oleaje a largo plazo o régimen de oleaje [61].

Para este proyecto se hizo un análisis de los estados de mar de la zona de estudio para conocer las condiciones que predominan en el lugar y conocer las condiciones en las que operaría el prototipo.

La Unidad Académica de Sistemas Arrecifales y el CICESE cuentan con datos oceanográficos de 3 puntos dentro de la laguna de Puerto Morelos y uno fuera de la barrera arrecifal. Con esta información se obtuvo rosas de oleaje y la potencia de las olas.

Se analizaron los 4 puntos, que se encuentran detalladas en el Anexo 2, para el análisis de resultados se utilizó el punto más cercano al prototipo pues sería este el estado de mar con el que operaría.

## 7. Materiales y Métodos

Con el antecedente del dispositivo undimotriz de una palanca, que se presentó en la tesis de García, 2016, Optimización de un dispositivo undimotriz de tipo boya flotante [6], a escala 1:20 con una eficiencia de 37% [45], este estudio continuó con el siguiente paso de la investigación; llevar el diseño a condiciones reales.

Se llevó a cabo la construcción del modelo a escala 1:10 en material de aluminio con la finalidad de evitar daños por corrosión del material debido al ambiente salino y disminuir el peso. El Módulo Independiente de Captura de Olas de Un Tiempo MICO T1, se diseñó de una sola palanca ya que permite registrar datos puros; es decir, sin ruido. El WEC se diseñó para operar a 1 metro de profundidad, para una altura de ola mayor o igual a 0.4 m, periodo menor o igual a 6 s y una marea de 0.25 m, en suelo arenoso con un horizonte de 2 metros de arena. El diseño y construcción estuvo a cargo del Laboratorio de Investigación Sexto Sol [68].

Las partes de las que consta el módulo se enumeran y describen a continuación. La Fig. 26 muestra el lugar correspondiente de cada parte:

1. **Estructura de soporte.** Su finalidad es darle estabilidad al WEC, así como soportar el peso de los componentes.
2. **Boya.** Es un cuerpo tubular hueco de aluminio que le permite flotar libremente en la superficie, está sujeta por dos barras de aluminio que le permiten desplazarse verticalmente con el paso de las olas. Su objetivo es recibir la energía del oleaje y transmitirla mecánicamente mediante la palanca hacia el eje de tracción y al generador.
3. **Eje de tracción.** Es una barra metálica, que gira al ser impulsada por el movimiento de la palanca y la boya con el paso de cada ola.
4. **Palanca.** Está formada por dos barras de aluminio que sujetan por uno de los extremos a la boya y por el otro el cable de tracción del carrete compuesto. Su función principal es recibir a cada ola y transmitir al eje de tracción la fuerza de empuje, la cual está en función de la altura y frecuencia de las olas.
5. **Volante de inercia.** Es un aro sujeto al extremo del eje de tracción, gira libremente junto con el eje de para mantener la velocidad de giro cuando el eje no recibe fuerza de tracción de la boya cuando ha pasado una ola y se espera la siguiente.
6. **Clutch.** Es un dispositivo mecánico que une al eje de tracción con el carrete compuesto, este permite girar al eje de tracción en un solo sentido sin ser afectado por el giro de restitución, manteniendo una sola dirección de giro.
7. **Carrete compuesto.** Consiste en un par de cilindros con el eje hueco y con rebordes que les permiten enrollar cables, su función es enrollar y desenrollar al mismo tiempo y en sentido opuesto los cables de tracción y restitución.
8. **Caja multiplicadora.** Es un dispositivo mecánico que tiene la función de multiplicar las bajas revoluciones del eje de tracción para poder ser aprovechadas posteriormente por el generador de energía eléctrica.

9. **Cable de tracción y restitución.** Su finalidad consiste en que el eje de tracción se mantenga en movimiento al caer la boya con el valle de la ola y al elevarse la boya con la cresta de la ola.
10. **Generador.** Es el componente electro-mecánico que transforma la energía cinética y mecánica en energía eléctrica. Recibe la energía del oleaje mediante giros del eje de tracción que le transmite la caja multiplicadora y la boya para generar energía eléctrica.

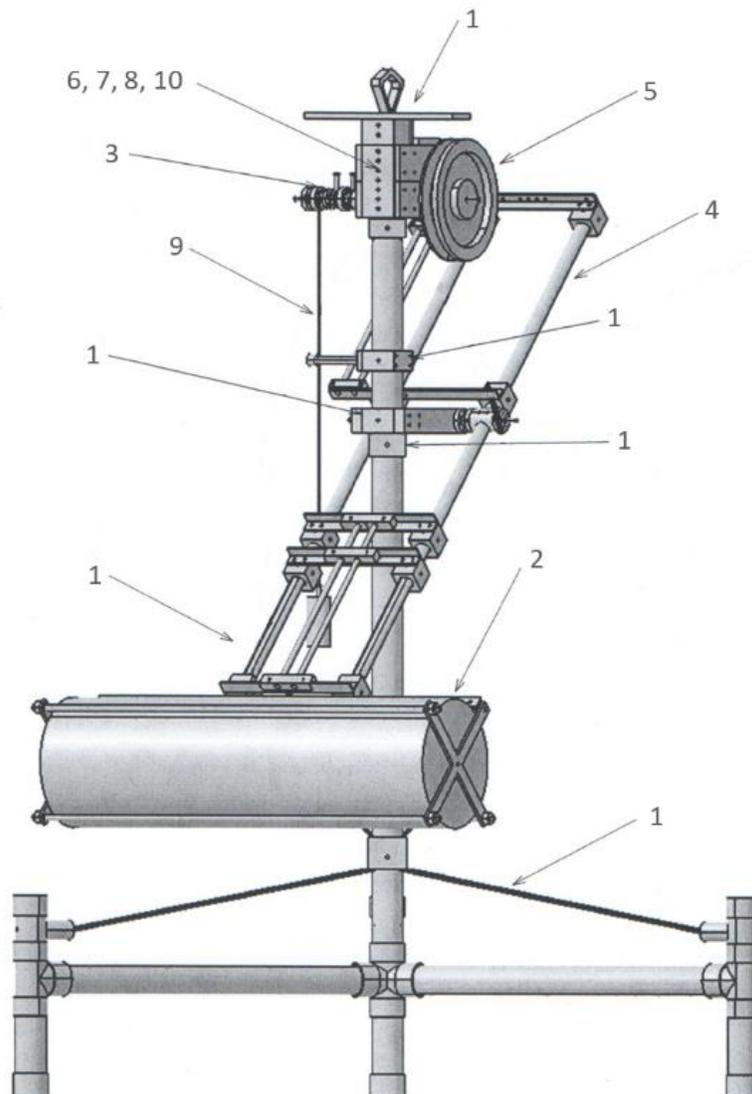


Fig. 26. Esquema original MICO T1. Adaptado de Laboratorio de Investigación Sexto Sol, García, 2014 .

El WEC se probó con un simulador de oleaje en el Laboratorio de Costas y Puertos del Instituto de Ingeniería de la UNAM, para verificar su funcionamiento, antes de ser colocado en el mar, con esto, se detectaron fallas en el prototipo e hicieron las adecuaciones necesarias para mejorar su desempeño.

Se incorporó un chasis al diseño para salvaguardar la integridad de los componentes electrónicos y mantenerlos aislados de las condiciones climáticas, las adaptaciones se listan a continuación Fig. 27:

1. Base de la estructura hecha de solera, que sustituyó a la base hecha de tubo.
2. Las patas se dotaron de una especie de trépano para suelos arenosos.
3. Las vigas que partían de las patas se movieron a la base ya que las patas actuarían como tornillos.
4. Se adicionó un poste vertical para darle más soporte al chasis de generación.
5. Se adaptaron cuatro ángulos de aluminio para montar la instrumentación.
6. El chasis de generación se sobredimensionó para color instrumentación de medición dentro del chasis.

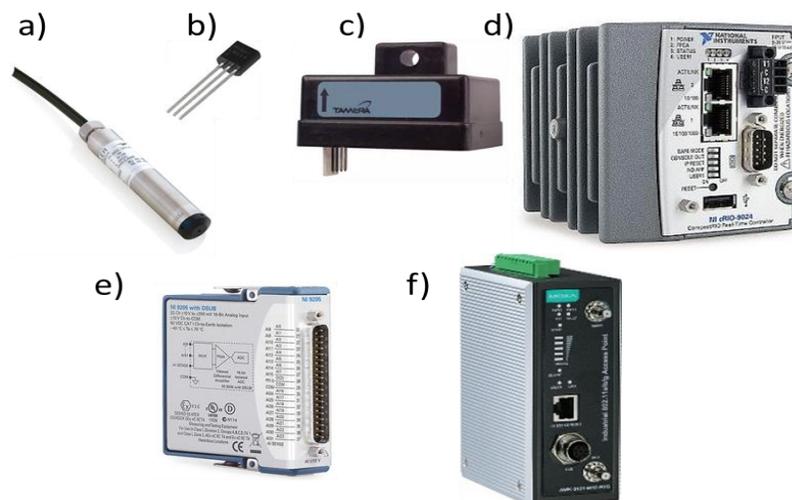


Fig. 27. MICO T1 con adaptaciones finales. 1 Base de solera, 2 Trepano para suelo arenoso, 3 Vigas de soporte, 4 Poste para base de chasis, 5 Ángulos de aluminio para colocación de instrumentación, 6 Chasis de generación de mayor tamaño.

## 7.1. Instrumentación

Para registrar la energía que generó el MICO T1 se utilizaron dos sensores de presión Keller modelo PR-36 X de 1 atm., al mismo tiempo miden voltaje y corriente del generador y el voltaje que recibe un controlador de carga, dos sensores de temperatura hechos con un semiconductor LM-335Z con un rango de -50 a 150 °C, un sensor de corriente de efecto Hall modelo L03S050D15 del fabricante TAMURA.

El voltaje se midió con un divisor de voltaje que disminuye el voltaje que entrega el generador a un voltaje que puede ser medido por la tarjeta NI-9205. El sistema de captura de datos está compuesto de un equipo cRIO con un controlador cRIO-9024, una tarjeta de conversión analógica-digital NI -9205 y un radio Moxa AWK-3121 Fig. 28 que conforman el chasis de adquisición de datos.



*Fig. 28. Componentes del banco de adquisición de datos del MICO T1. a) Sensor de presión Keller PR-36X. b) Semiconductor LM-335Z. c) Sensor de corriente Tamura L03S050D15. d) Equipo para captura de datos cRIO-9024. e) Tarjeta de conversión analógica-digital NI-9205. f) Acces Point Moxa AWK-3121*

Se utilizó un panel solar y un banco de baterías de respaldo para hacer autónomo el sistema de captura de datos, y con esto evitar un tendido eléctrico desde la fuente de energía, hasta la ubicación del MICO-1T. Adicionalmente se instaló una luz de señalización para las embarcaciones que surcan en cabotaje Fig. 29.



*Fig. 29. Panel solar y luz de señalización instalados en el chasis de generación del MICO-1T.*

Para medir de manera correcta el voltaje y la corriente, se acondicionó un banco de resistencias Fig. 30 en donde se consumió la energía generada. El banco consta de 14 resistencias de 5 ohms a 50 watts, puestas en serie para hacer una resistencia de 70 Ohms. La cantidad de resistencias se ajustó para que le demandara menos trabajo al generador para moverse; ya que mientras menor la resistencia mayor sería la corriente que requeriría el generador para alimentarla.



*Fig. 30. Banco de resistencias.*

A continuación se muestra un diagrama general del sistema de adquisición de datos desde que se capta cada ola hasta que se procesa la información.

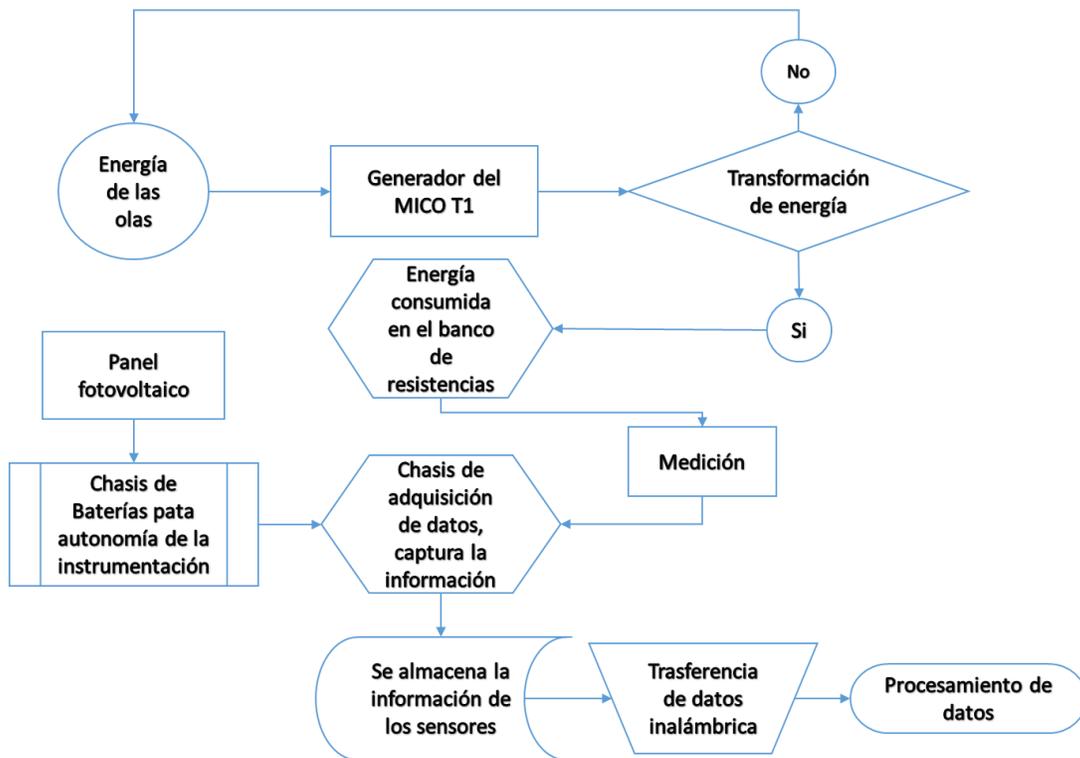


Fig. 31. Diagrama del sistema de adquisición de datos.

## 7.2. Zona de prueba

Se eligió el sitio para relizar las pruebas que se ubica en el municipio de Puerto Morelos, Quintana Roo, frente a la Unidad Académica Sistemas Arreciales Puerto Morelos del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología de la UNAM Fig. 32. Se ubica dentro del Parque Nacional Arrecifal de Puerto Morelos. La zona se encuentra protegida por una barrera arrecifal que forma parte del Sistema Arrecifal Mesoamericano, que se extiende desde Honduras hasta el Canal de Yucatán.

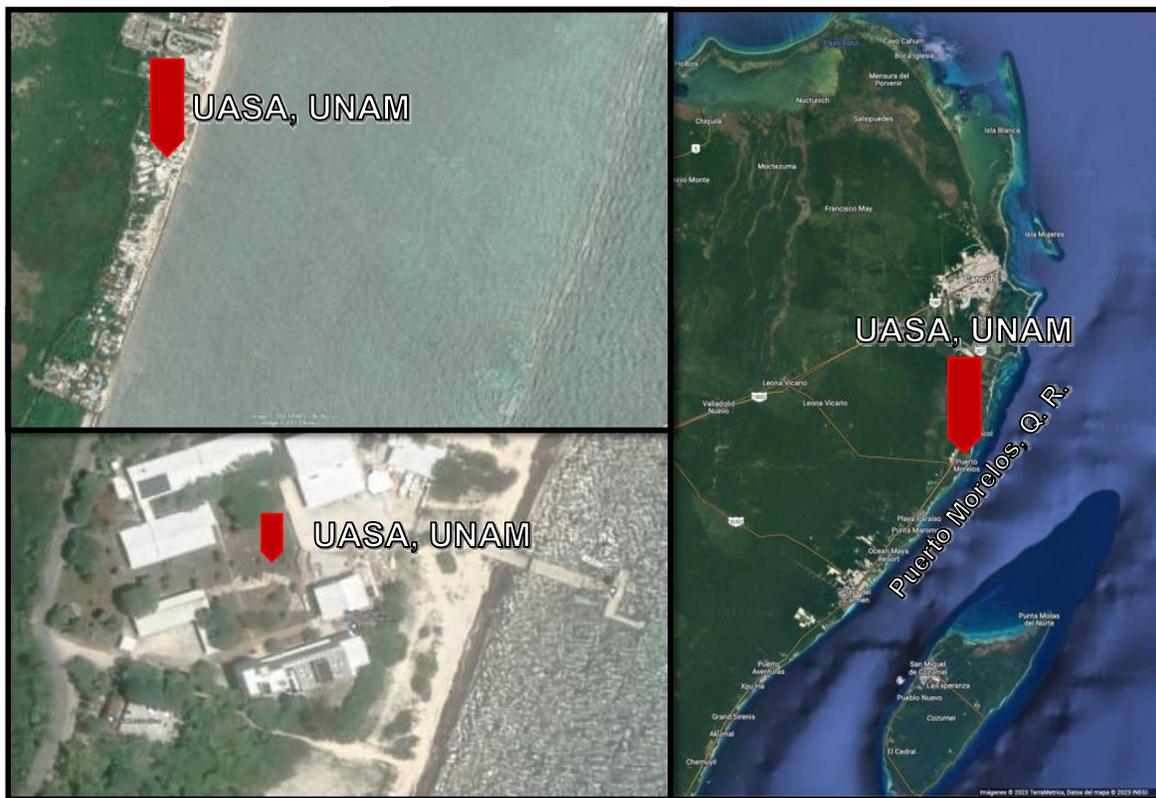


Fig. 32. UASA (Unidad Académica Sistemas Arrecifales) Puerto Morelos, Q. Roo.  
Adaptado de Google Earth, 2023, <https://earth.google.com/web/@0,-57.634,0a,22251752.77375655d,35y,0h,0t,0r>

Los estados de mar de la laguna de Puerto Morelos están dominados por oleaje generado por los vientos Alisios que soplan sobre el Caribe. Las olas que rompen en el arrecife, se propagan desde el este, con una altura media de ola de 0.3 m, y un periodo de ola dominante entre 3 y 7 s dentro de la laguna arrecifal. En esta

zona, las olas de más de 2 m se consideran como condiciones de tormenta de alta energía, que ocurren de 6 a 8 veces al año. En invierno se presentan fenómenos meteorológicos que son consecuencia del paso de los frentes fríos o " Nortes " sobre el Golfo de México y el Mar Caribe; estas condiciones prevalecieron durante la operación del dispositivo.

En verano, la altura de ola significativa,  $H_s$  es generalmente pequeña  $H_s < 0.25$  m, pero también es una zona afectada por tormentas tropicales o huracanes que pueden transitar la región, en cuyo caso, dominan temporalmente el clima marítimo del mar Caribe. En caso de que un huracán pase directamente sobre Puerto Morelos, sus vientos pueden generar olas de hasta 12 m, con períodos relativamente largos de 10 a 18 s. El régimen de mareas es micromareal, con oscilaciones medias semidiurnas de 0,40 m. Para más información sobre el clima marítimo ver Anexo 2.

### 7.3. Obtención y registro de datos

El periodo de muestreo de los sensores fue de 20 registros por segundo y se obtuvo en total 63.494.424 registros durante toda la etapa de prueba. Se eliminó el 1.08 %, por representar datos no confiables y en el 18% de los datos restantes, no hubo generación de energía. En total el MICO-1T trabajó durante 1107 horas, pero sólo se registraron 966 horas, ver Tabla 4.

*Tabla 4. Total de registros y número de horas de operación.*

<b>Periodo de prueba</b>	
28-01-2016 - 16-03-2016	
Número de registros	<b>63,494,424</b>
Registros eliminados	685233
Registros restantes	62,809,191
% útil	98.92
Registros con valor cero	11,832,097
%	18.84
Horas de funcionamiento	<b>1107</b>
Horas registradas	966
Horas sin registro	141

La energía para el sistema de captura de datos en días nublados no es suficiente para recargar las baterías a su máxima capacidad de carga, por lo tanto, se interrumpió la captura de datos por las noches lo que no significó que el equipo no hubiera trabajado durante este tiempo.

## 8. Procesamiento de datos

La información que se recabó se procesó mediante una aplicación programada en LabView (Fig. 33) como salida entrega un archivo .txt con las señales de los sensores procesadas para ser analizadas posteriormente y obtener resultados.

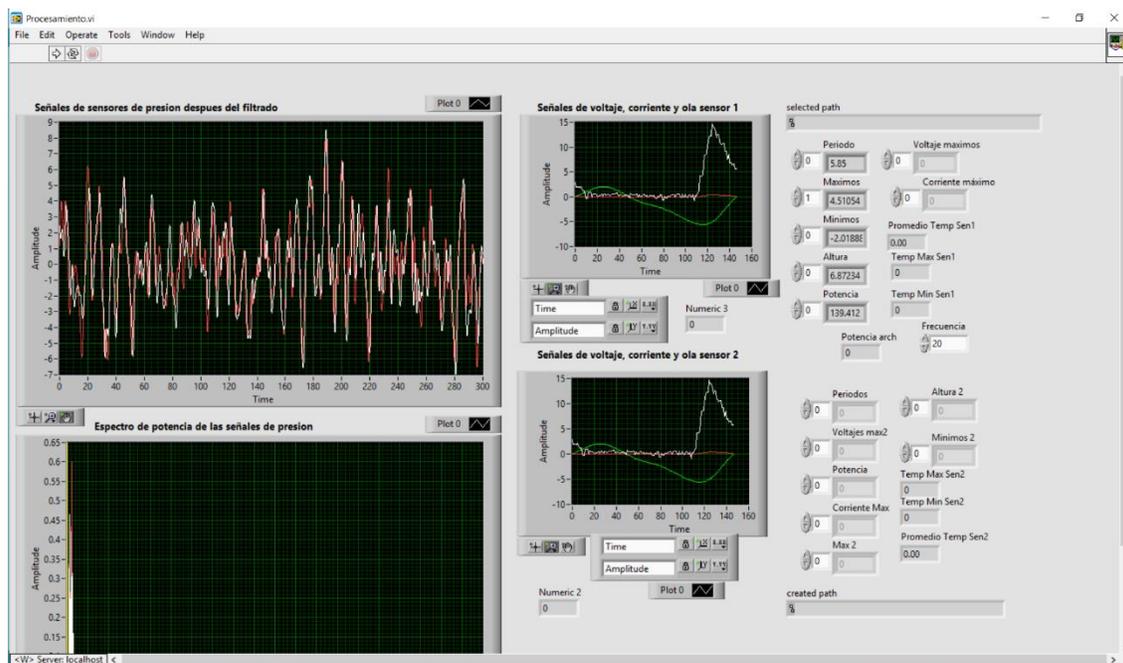


Fig. 33. Aplicación para el procesamiento de archivos de salida del sistema de captura.

La obtención de información, se llevó a cabo mediante los sensores de presión y los sensores de temperatura. Los sensores de temperatura midieron la temperatura exterior e interior del chasis de generación para conocer si existió un incremento considerable de temperatura dentro del chasis que pudiera alterar la lectura de los sensores de presión, y el sensor de corriente.

El voltaje fue medido con el divisor de voltaje, los datos fueron capturados con el equipo cRIO. Para la captura de estos datos se empleó un programa desarrollado en LabView por el Laboratorio de Costas y Puertos, Fig. 34, del mismo fabricante del equipo cRIO, en el que se puede configurar frecuencia de muestreo y el tamaño de archivo e intervalo de tiempo, Fig. 35. El programa entrega un archivo con la información capturada. Para la descarga de información se empleó un access point Moxa y se configuró un servidor FTP (File Transfer Protocol) para transferir los archivos creados a un ordenador.

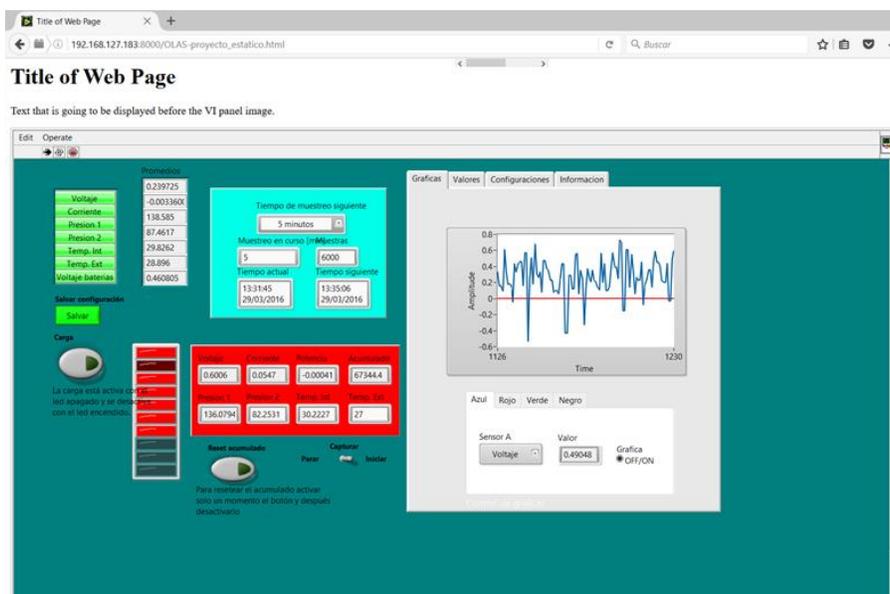


Fig. 34. Vista del programa de captura en funcionamiento.

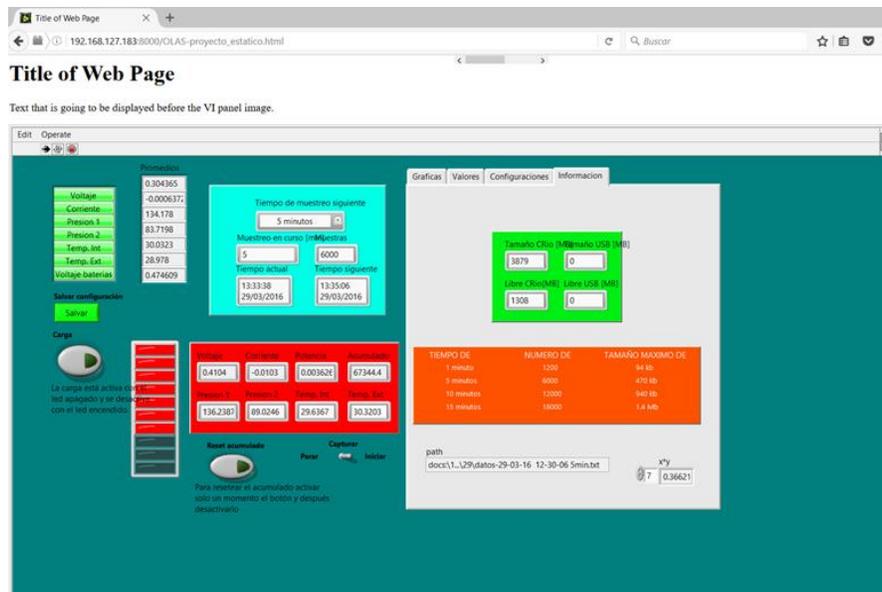
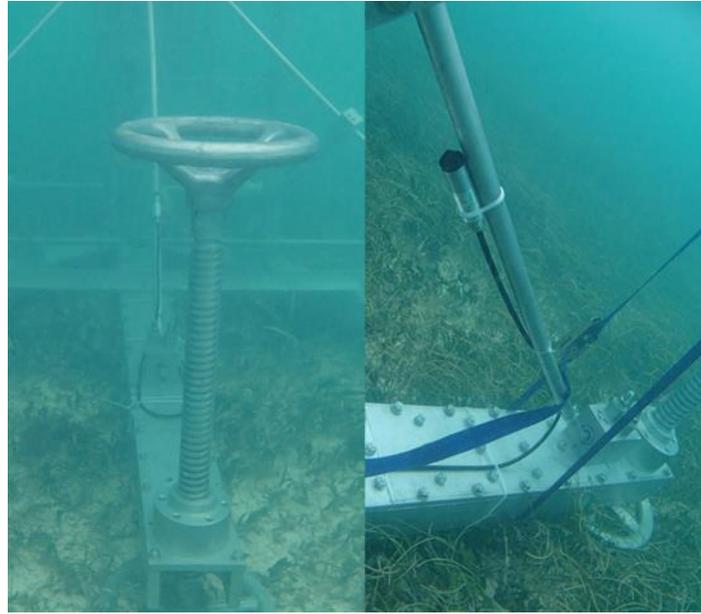


Fig. 35. Opciones de configuración del programa de captura.

Cada sensor de presión se colocó en la parte frontal y en la parte posterior del MICO-1T, Fig. 36, con la finalidad de poder determinar la cantidad de energía, que el dispositivo es capaz de disipar y así analizar si puede cumplir una función multipropósito. Es decir, debe ser capaz de producir energía y funcionar como equipo de protección costera.

Sin embargo, no fue posible corroborar lo anterior debido a la orientación en la que quedó instalado el dispositivo, ya que debió quedar orientado perpendicular a la incidencia de las olas ESE y quedó con orientación WNW. Al ser difícil de maniobrar y tocar fondo antes de llegar a la profundidad de operación ya no fue posible corregir su posición.



*Fig. 36. Ubicación de los sensores de presión. Der. parte frontal del MICO-1T, Izq. parte posterior*

Se utilizó una base de datos en SQL para poder manejar la gran cantidad de información que se generó. Esta información se procesó con un programa realizado con LabView y elaborado por el Laboratorio de Costas y Puertos. El programa entrega las señales separadas en cada variable de interés, es decir, en voltaje, corriente, temperatura, altura de ola y periodo.

A su vez, las lecturas de presión se procesaron en MatLab, a través de SQL para obtener altura de ola y periodo, para separar olas de periodo corto y olas de periodo largo y ver con cuales genera más energía.

## 9. Análisis y discusión de resultados

El MICO T1 fue trasladado hacia el sitio de pruebas el 26 de enero de 2016 y puesto en marcha el 28 de enero de 2016. El periodo de prueba finalizó el 16 de marzo de 2016. Por la dificultad para instalar el dispositivo en el sitio de emplazamiento, el dispositivo quedó a 1.6 m de profundidad, a una distancia de 30 m de la orilla con una orientación WNW.

Se calculó la potencia de generación  $P_g$  por el MICO-1T, el voltaje  $V$  y corriente  $I$ , así como la altura de la ola  $H$ , periodo de la ola  $T$ , potencia de las olas  $P_d$ , la eficiencia de generación del MICO-1T  $\eta$ , máxima y promedio. También se analizó la temperatura interior del chasis de generación  $T_i$  y la temperatura exterior  $T_e$ , para descartar pérdidas de energía por degradación debida al calor o fallo por temperatura elevada, dentro del chasis de generación.

Para obtener la potencia que generó el MICO-1T se utilizó la ecuación de potencia eléctrica:

$$P_g = I \times V \text{ en watts}$$

La  $P_g$  por metro de frente de ola, se obtiene con la división de la potencia generada entre la longitud de la boya multiplicada por 1000, para obtener la potencia en  $kW/m$ . La longitud de la boya es de 2 m.

Para calcular eficiencia se utilizó la ecuación de eficiencia:

$$\eta = \frac{P_g}{P_d} \times 100 \%$$

Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 5. Es importante resaltar, que la eficiencia de 0.9% tan baja, se debe a las diferentes situaciones desfavorables en las que el dispositivo trabajó, principalmente la profundidad, pues la profundidad óptima de operación se encuentra entre 1 m y 0.6 m. El dispositivo quedó sumergido a una profundidad media de 1.6 m,. La orientación también jugó un papel importante en la baja eficiencia, al no estar orientado en la dirección de mayor incidencia Fig. 37.

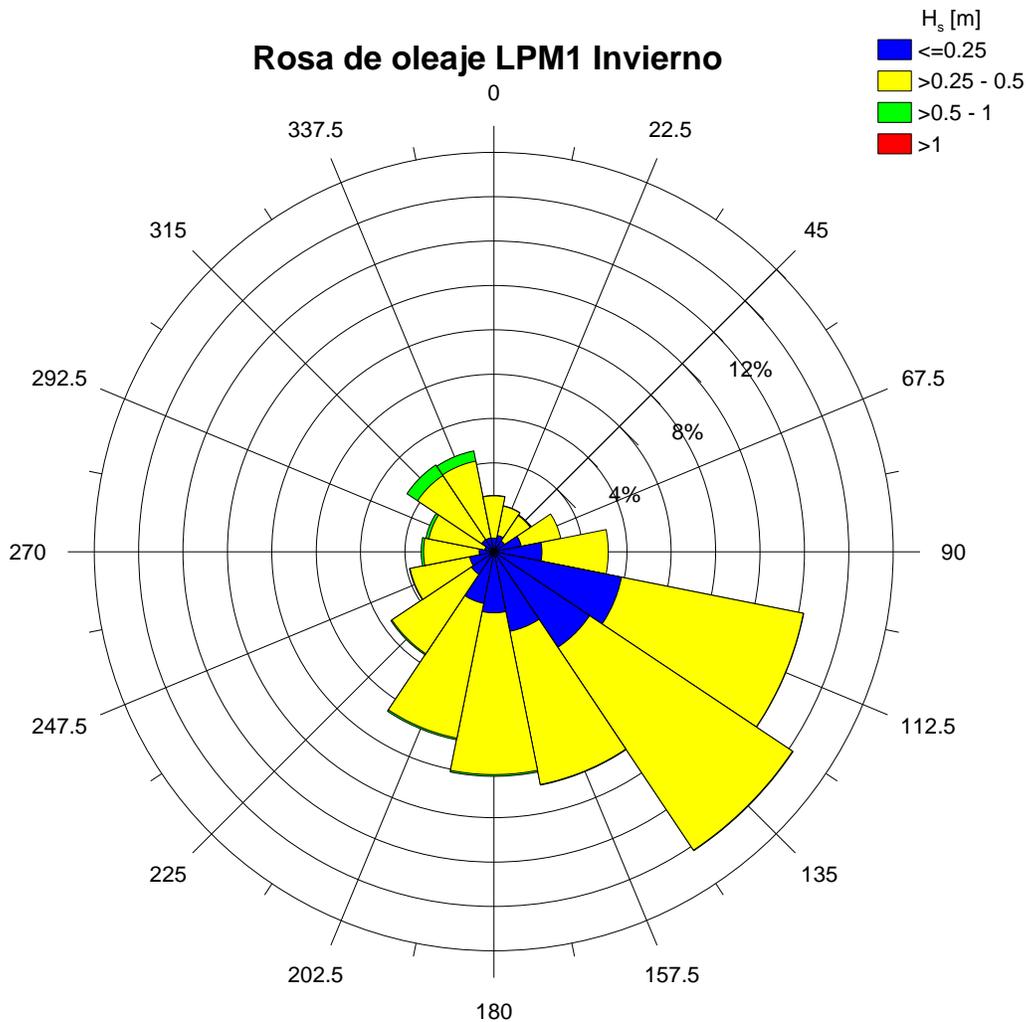


Fig. 37. Rosa de oleaje estacional del centro de la laguna arrecifal.

Tabla 5. Resumen de máximas y medias.

	Voltaje [V]	Corriente [A]	$P_g$ [W]	$P_g$ [kW/m]	$P_d$ [kW/m]	% $\eta$	$T$ [s]	$H$ [cm]
<b>Max</b>	62.021	1.986	123.160	0.062	4.648	1.325	14.65	54.41
<b>Avg</b>	28.500	0.916	29.290	0.015	2.098	0.910	9.43	15.461

La energía que produjo durante las 966 hrs. registradas fué de 0.01 kWhr, energía suficiente para mantener encendido 1 foco de 10 W. Considerando que una casa de interés social con 2 ocupantes, sin aire acondicionado, ocupa un promedio de

289 kWhr al bimestre, significa que cada hora consume 0.19 kWhr [69] . Por otro lado, la misma casa con aire acondicionado, tiene un consumo de 940 kWhr [70]. Por lo tanto cada hora se consume en promedio 0.65 kWhr. Estos resultados indican que para abastecer cada casa y con la eficiencia reportada serían necesarios 19 dispositivos para el primer ejemplo y 65 dispositivos para el segundo caso.

Adicionalmente, se integra información climatológica del periodo de prueba, de COCONet (Continuously Operating Caribbean GPS Observational Network) estación Puerto Morelos, para determinar la dirección de propagación del oleaje, ya que esta variable no fue medida. El viento predominante es del ESE con una velocidad de entre 2 y 8 m/s con una frecuencia del 23 % y del E con una velocidad de entre 2 y 10 m/s con una frecuencia del 17 %, Fig. 38.

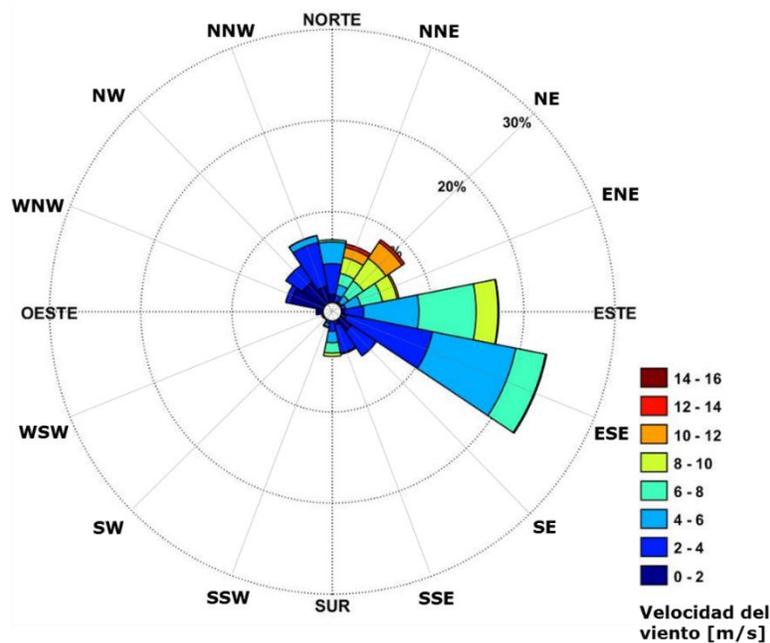


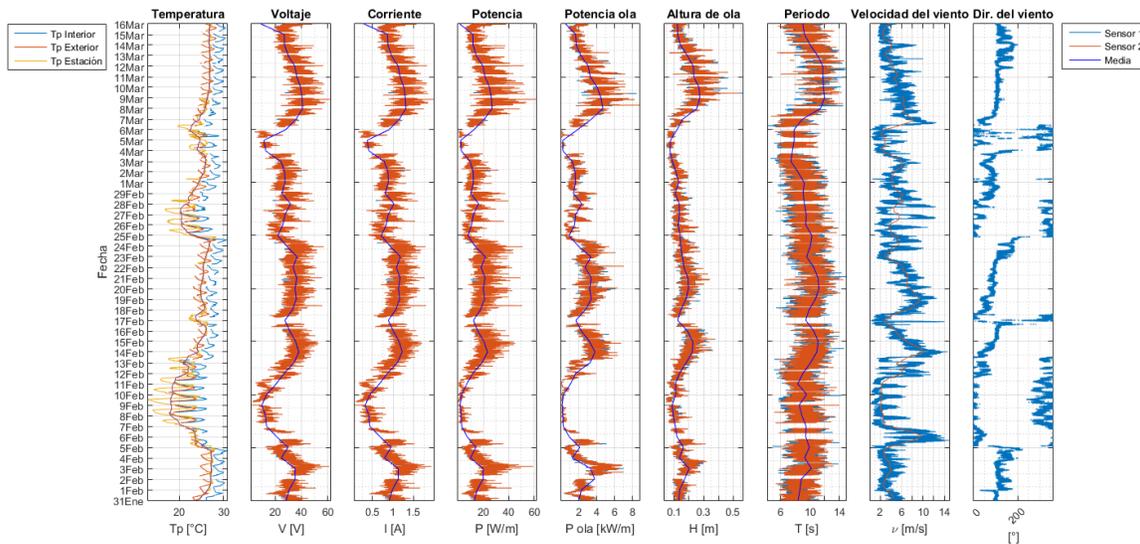
Fig. 38. Rosa de los vientos del 30 de enero de 2016 al 16 de marzo de 2016.

Hay que destacar que, aunque no sea la dirección predominante, los vientos provenientes del NNE y NE alcanzaron velocidades desde 6 hasta 16 m/s. Durante la etapa de prueba y de acuerdo con la Escala de Beaufort de la fuerza de los vientos, vientos de 6 a 8 m/s generan olas de 1.25 m hasta de 2.5 m y vientos de

16 m/s generan olas de 8 m aproximadamente. Por lo tanto, las olas que se generaron con estos vientos, viajaron en la misma dirección del viento y la barrera arrecifal filtró la mayoría de estas olas, razón por la cual la altura máxima de ola fue de 0.54 m. Estos resultados explican por qué a pesar de estar ligeramente desviado de la dirección de propagación del oleaje dominante SE, Fig. 38, las olas incidían en el MICO-T1 casi perpendicularmente a este.

Al ver los resultados de manera gráfica, es posible aislar eventos en los que se generó mayor y menor potencia. Al ser analizados por separado y deducir las condiciones en las que se presentaron estos eventos, se puede determinar las condiciones que son más favorables, así como las que no lo son, para aprovechar la energía undimotriz.

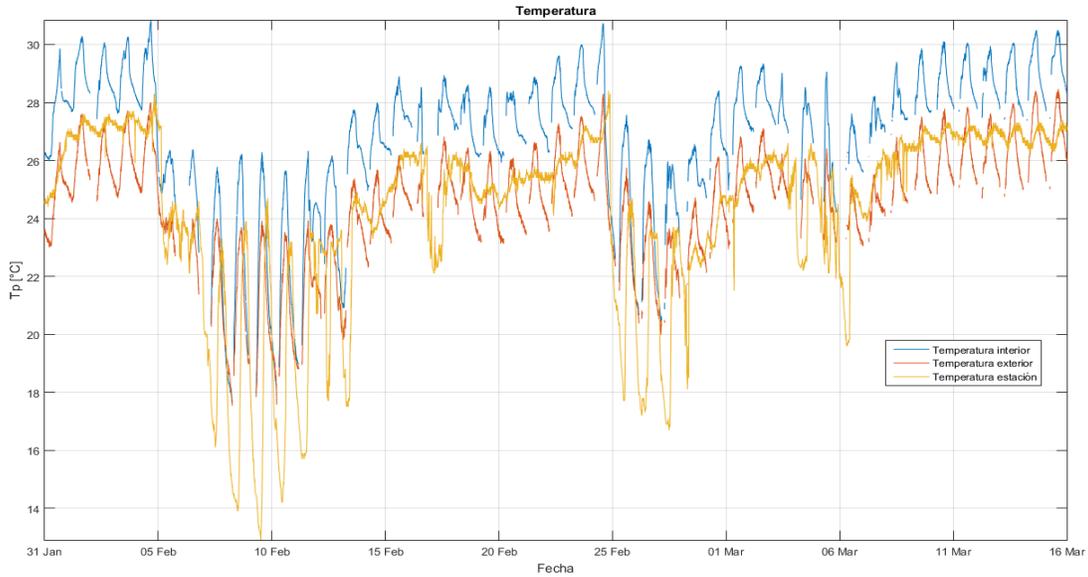
La Gráfica 1 muestra todas las variables analizadas por sensor más la temperatura, velocidad y dirección del viento de la estación meteorológica de la Unidad Académica Sistemas Arrecifales de Puerto Morelos. Los datos de voltaje, corriente, potencia, altura de ola, periodo de la ola y potencia de la ola muestran un comportamiento gráficamente similar entre ellos y como la velocidad y dirección del viento influyen sobre ellos .



Gráfica 1. De de izq. A der. Datos de **temperatura  $T_p$** , **voltaje  $V$** , **corriente  $I$** , **potencia generada  $P$** , **potencia de la ola  $P_{ola}$** , **altura de la ola  $H$** , **periodo  $T$** , **velocidad del viento  $v$**  y **dirección del viento** del 28/01/2016 al 16/03/2016 y media de cada variable.

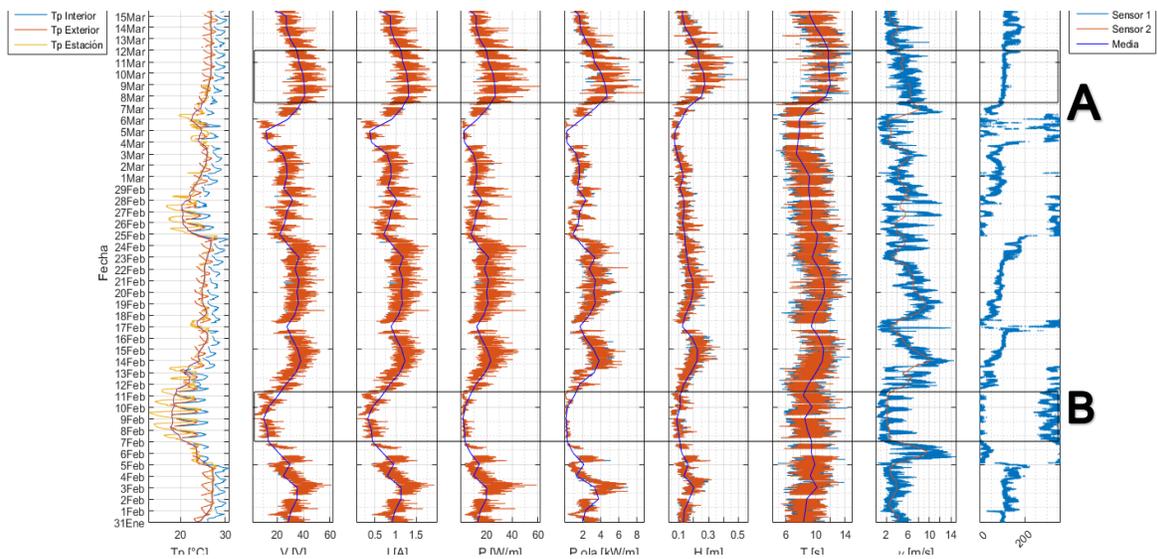
Dentro de la gráfica 1 se tiene en la primera columna la temperatura que registraron los sensores, tanto dentro del chasis de generación, como en el exterior del chasis de generación, la temperatura ambiente y la temperatura media registrada por la estación meteorológica de Puerto Morelos.

La temperatura de la estación meteorológica se utilizó para corroborar la información registrada de los sensores del MICO-1T. Es posible notar que la temperatura exterior de 25.5 °C registrada por el sistema de captura de datos, es ligeramente mayor que la registrada por la estación meteorológica de 24.3 °C, la diferencia es de 1.2 °C, (Gráfica 2). Esta diferencia puede estar relacionada con la precisión de cada sensor. La diferencia no es significativa, por lo que se descarta que exista irregularidad en las mediciones de temperatura. La diferencia entre la temperatura interior de 25.5 °C y exterior de 27.4 °C del chasis de generación del MICO-1T es de 1.9 °C. Esta diferencia nos indica que no existe pérdida de energía por fricción en el generador, ya que es una diferencia mínima de temperatura. Lo único que indica es que la temperatura es mayor dentro del chasis por hermeticidad.



Gráfica 2. Serie temporal de los registros de temperatura medido en exterior e interior del chasis de generación y temperatura ambiente.

De la (Gráfica 1) se aislaron dos eventos para su análisis individual, el **A** representa el evento de máxima generación y el **B** el evento de mínima generación (Gráfica 3).



Gráfica 3. Recuadro **A** máximo pico de generación de energía, Recuadro **B** mínimo pico de generación registrados durante el tiempo que estuvo en operación.

De la gráfica anterior, es posible relacionar la dirección del viento, con los momentos de mayor producción, notando que vientos del ESE incrementan la potencia de

generación, mientras que vientos de entre el NNO y NNE disminuyen la potencia de generación.

### 9.1. Descripción del evento A

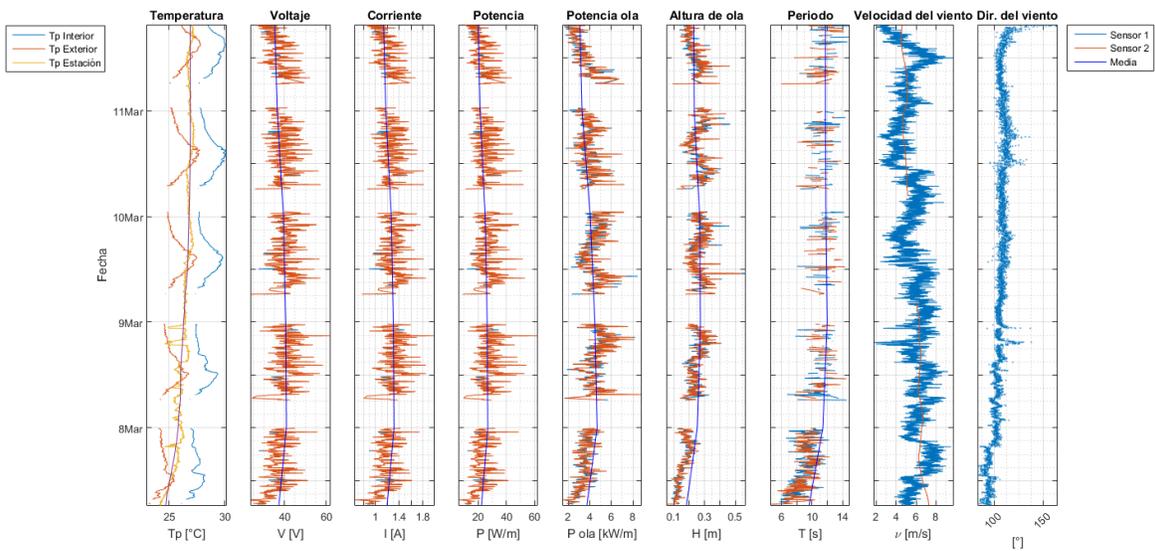
En la **Gráfica 4**, se presenta el comportamiento del evento **A**, donde se registraron los valores máximos de voltaje, corriente, potencia generada, potencia promedio del oleaje y altura de ola y periodo asociado. La dirección del viento durante este evento se presentó del ESE con una velocidad aproximada de entre 4 y 6 m/s, Tabla 6, al igual que la dirección del oleaje.

La dirección del oleaje se obtuvo con la dirección del viento desde la estación meteorológica de la Unidad Académica de Sistemas Arrecifales del Instituto de Ciencias del Mar y Limnología en Puerto Morelos, Fig. 39. Esto se justifica cuando el viento sopla constantemente por un largo tiempo en la misma dirección sobre un área grande con oleaje totalmente desarrollado [71], [72].

En la Fig. 39, se representa la dirección del oleaje que se observó durante el evento **A** y la posición del MICO-1T respecto a este mismo.



Fig. 39. Incidencia de las olas sobre el MiCO-1T durante el evento de mayor generación de energía A.



Gráfica 4. Evento de máxima generación de energía A.

Tabla 6. Frecuencia conjunta de Velocidad y Dirección de viento durante el evento de máxima generación de energía A.

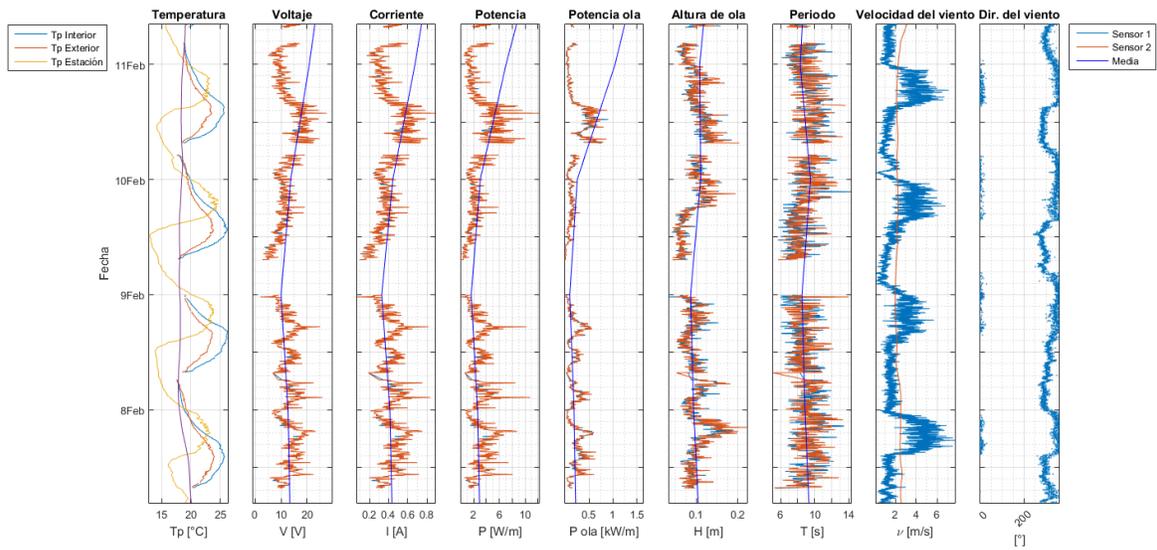
		Dirección del viento																	
		m/s	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total
Velocidad del viento	0 - 2	416	24	3	11	59	217	678	216	6	6	9	26	334	1565	1284	898	5752	
	2 - 4	2028	294	11	81	428	3498	1024	1141	417	207	16	9	44	212	1051	2913	13374	
	4 - 6	1541	560	194	391	1724	2388	2	51	498	222	0	0	0	1	15	488	8075	
	6 - 8	163	749	821	1148	3108	228	0	0	519	63	0	0	0	0	0	0	31	6830
	8 - 10	4	1051	1526	961	1433	1	0	0	221	0	0	0	0	0	0	0	0	5197
	10 - 12	0	658	1196	136	58	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2049
	12 - 14	0	241	220	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	462
	14 - 16	0	9	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	16
<b>Total</b>		<b>4152</b>	<b>3586</b>	<b>3978</b>	<b>2729</b>	<b>6810</b>	<b>6332</b>	<b>1704</b>	<b>1408</b>	<b>1662</b>	<b>498</b>	<b>25</b>	<b>35</b>	<b>378</b>	<b>1778</b>	<b>2350</b>	<b>4330</b>	<b>41755</b>	

La energía generada por el MICO-1T durante este evento fue de 0.023 kWhr, la potencia disponible fue de 3.8 kW/m y la potencia generada fue de 0.0247 kW/m. El voltaje máximo fue de 62.02 V y la corriente de 1.98 A, la altura de la ola media fue de 24.4 cm y el periodo medio de 10 s, la altura máxima de ola fue de 54.41 cm. Este evento tuvo una duración de 113 h registradas.

Utilizando el consumo de energía de una casa de interés social con aire acondicionado de 0.65 kWhr, serían necesarios 29 dispositivos para abastecerla de energía y sin aire acondicionado con un consumo de 0.19 kWhr se necesitarían 9 equipos para suministrar esa cantidad de energía.

## 9.2. Descripción del evento B

En la **Gráfica 5**, se presenta el comportamiento del evento **B**, donde se observaron los valores mínimos de voltaje, corriente, potencia generada, potencia promedio del oleaje y altura de ola. La dirección del viento, durante este evento, se presentó del NNW con una velocidad aproximada de entre 2 y 4 m/s, (Tabla 7) y la dirección del oleaje se observó del NNE, por corroboración visual Fig. 40.



Gráfica 5. Evento de mínima generación de energía B.

Tabla 7. Frecuencia conjunta de Velocidad y Dirección de viento en el evento B.

		Dirección del viento																	
		m/s	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	Total
Velocidad del viento	0 - 2	170	89	9	12	63	90	312	78	4	4	22	41	51	348	459	310	2062	
	2 - 4	195	131	89	185	788	3380	1229	952	324	4	15	9	0	50	331	293	7975	
	4 - 6	16	209	407	698	1765	4220	5	21	319	3	0	0	0	0	0	0	0	7663
	6 - 8	0	86	450	440	971	1961	3	0	225	14	0	0	0	0	0	0	0	4150
	8 - 10	0	125	418	122	145	84	0	0	26	0	0	0	0	0	0	0	0	920
	10 - 12	0	61	193	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	255
	12 - 14	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
<b>Total</b>		381	708	1566	1457	<b>3732</b>	<b>9735</b>	1549	1051	899	25	37	50	51	398	790	603	23032	

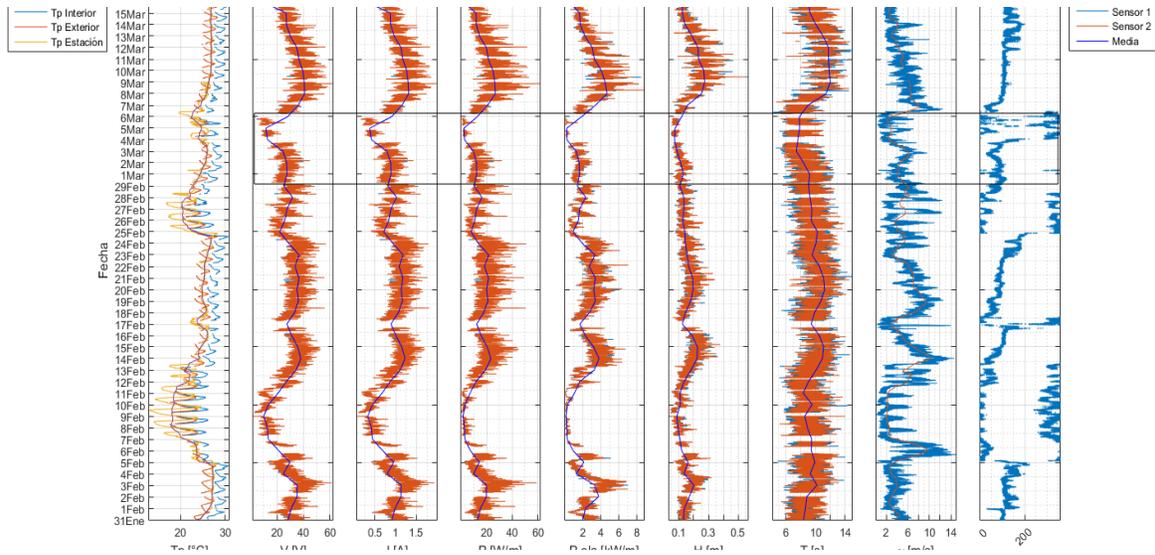
La energía generada por el MICO-1T durante este evento fue de 0.0027 kWhr, la potencia disponible fue de 0.2 kW/m y la potencia generada fue de 0.0028 kW/m, un voltaje medio de 24.2 V y la corriente de 0.4 A. La altura de la ola media fue de 9.8 cm y el periodo medio de 8 s, la altura máxima de ola fue de 22 cm. Este evento tuvo una duración de 86 h.

La Fig. 40 esquematiza la dirección del oleaje incidente que se observó durante este evento, que resulta la menos favorable, para el aprovechamiento de la energía.



*Fig. 40. Incidencia de las olas sobre el MICO-1T durante el evento B.*

En la **Gráfica 6** se señala, dentro de un recuadro, el momento en el que la boya comienza a perder estabilidad al perder algunos tornillos de sujeción (Fig. 41). En ese momento se presentó un decaimiento en la producción de energía pero no es posible atribuir únicamente a esta razón la disminución en la generación, ya que a la par existió un cambio en la dirección del viento, una disminución en la potencia disponible del oleaje, cambió la altura de la ola y el periodo. Todo esto es atribuible a la disminución en la generación de energía



Gráfica 6. Pérdida de estabilidad de la boya del MICO-1T.



Fig. 41. Vista de la boya con movimiento oscilatorio respecto a los brazos que la unen a la estructura principal.

Es importante resaltar que la baja eficiencia de generación del dispositivo se debió a diversos factores. Quedó a una profundidad mayor que la recomendada para operar de manera correcta y la orientación no fue completamente perpendicular a la dirección del oleaje. Por lo que su baja eficiencia no se debe sólo al diseño del prototipo.

or lo que no se descarta su capacidad para generar energía eléctrica, ya que durante esta investigación sólo logró generar 0.01 kWhr.

El dispositivo se sacó de operación por el desgaste de sus componentes, ya que representaba un riesgo de pérdida de alguna de sus partes. Al observar la estructura el mayor desgaste se presentó en el sistema de captación donde se aprecia la fricción que existía entre la boya y el brazo de sujeción de la misma. Fig. 42



*Fig. 42, Daños en la sujeción de la boya con el brazo.*

Durante toda la etapa experimental, la estructura del MICO-1T demostró ser robusta y estable en condiciones reales de operación, resistió el paso de los frentes fríos,

con eventos de Norte que llegaron a la zona. Sin embargo, los tornillos que sujetan la boya a la estructura principal sufrieron desgaste producto del movimiento oscilatorio, lo que provocó un desequilibrio en el sistema e impidió continuar operando.

A la par se llevó un registro fotográfico submarino, principalmente para observar algún tipo de deterioro del prototipo y el correcto funcionamiento de los anclajes. También fue posible registrar lo que ocurrió con la vida marina al tener esta estructura en su hábitad y detectar acumulación de sedimento o erosión. A corto plazo no parece haber tenido ningún impacto negativo la presencia del prototipo al contrario sirvió como zona de refugio, anclaje y zona de alimentación para la fauna (Fig. 43.).

No es posible asegurar que no exista ningún tipo de impacto ambiental por el corto periodo de tiempo que estuvo presente y solo llevar un registro fotográfico. Sin embargo es importante medir el impacto sobre la vida marina de toda estructura que se coloque sobre el lecho marino para futuras investigaciones.



*Fig. 43. 1. Día 1 en el sitio de emplazamiento. 2. Día 31 en funcionamiento, se observa crecimiento de algas sobre la estructura y peces pequeños alimentándose. 3. Día 48, se observa aumento en el tamaño de las algas y peces de mayor tamaño que irrumpieron bajo la base.*

### 9.3. Conclusión

El diseño del WEC le atribuye una estabilidad estructural resistente a condiciones de tormenta como los frentes fríos con vientos de 14 m/s. El diseño evitó que provocara erosión del suelo marino o acumulación de sedimento alrededor del mismo. Se necesita rediseñar la sujeción de la boya al brazo ya que esta parte fue la más afectada por el movimiento y la primera parte en fallar .

La jaula de la boya también requiere de un nuevo diseño ya que durante los primeros días de operación ésta se soltó y quedó a la deriva. Para volver a mantenerla en su lugar, fue necesario utilizar eslingas como agarre adicional.

La estructura representó refugio y zona de alimentación para varias especies de peces y como sustrato para algas. No se observó erosión en la zona donde quedó asentado, ni alteración de los pastos marinos; tampoco se observó acumulación de sedimento en la base de la estructura, no se descarta que el ruido generado aumentara a otras especies y permitiera la proleferación de otras Fig. 43.

## 10. Bibliografía

1. Banco Mundial. *Consumo de energía procedente de combustibles fósiles (% del total) | Datos / Mapa*. 2015 2015/10/22; Available from: <http://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.COMM.FO.ZS/countries?display=map>.
2. US Department of Commerce - NOAA. *Global Monitoring Laboratory - Carbon Cycle Greenhouse Gases*. 2021 08/06/2023; Available from: <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/global.html>.
3. EFE, *México ratifica su compromiso contra el cambio climático en la COP18 | Expansión*, in *Expansión*. 2012.
4. United Nations. *El Acuerdo de París | Naciones Unidas*. United Nations 2016; Available from: <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>.
5. REN21. *Global Status Report*. Renewables Global Status Report 2015 2015/10/27; Available from: <http://www.ren21.net/status-of-renewables/global-status-report/>.
6. Santiago, E.I.G., *Optimización de un dispositivo undimotriz de tipo boya flotante*, in *Posgrado en Ciencias del Mar y Limnología*. 2014, Universidad Nacional Autónoma de México.
7. Mackenzie, L.D.M.J. and J. Susan, *Ingeniería y ciencias ambientales*. 2005, México.
8. CNNMexico. *La energía renovable en México, ¿perdió su atractivo? - PlanetaCNN, canal - planetacnn* 2025 2015/10/22; Available from: <http://mexico.cnn.com/planetacnn/2014/01/14/la-energia-renovable-en-mexico-perdio-su-atractivo>.
9. Secretaría de Energía. *Centro Mexicano de Innovación en Energía del Océano*,. 2015/10/23; Available from: <https://www.gob.mx/sener/articulos/centro-mexicano-de-innovacion-en-energia-del-oceano>.
10. National Geographic. *Energía hidroeléctrica*. 2015 2015/10/22; Available from: <http://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/calentamiento-global/hydropower-profile>.
11. CONACYT. *Ciencia y Desarrollo, Artículos*. 2015 2015/10/22; Available from: <http://www.cyd.conacyt.gob.mx/223/Articulos/Mageotermia/Mageotermia3.html>.
12. FAO. *México: Balance energético nacional*. 2015 2015/10/22; Available from: <http://www.fao.org/docrep/t2363s/t2363s0y.htm>.
13. International Energy Agency. *World Energy Outlook 2014 - Executive Summary*. 2014 2015/10/27/18:37:18; Available from: <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/world-energy-outlook-2014---executive-summary.html>.
14. The wind Power. *Completar los archivos de los Parques eólicos Offshore*. 2022 2015/10/22; Available from: [http://www.thewindpower.net/country\\_content\\_es.php?id\\_zone=1006](http://www.thewindpower.net/country_content_es.php?id_zone=1006).
15. EWEA. *The European Wind Energy Association*. 2015 2015/10/27; Available from: <http://www.ewea.org/>
16. Peteiro, C., Ó.J. Prado, and M. García-Tasende, *El cultivo de macroalgas marinas como una fuente renovable y limpia para producir bioetanol como biocarburante*. 2015.
17. Biomassmagazine. *Marine biomass could serve as power source | Biomassmagazine.com*. 2015 2015/10/22; Available from: <http://biomassmagazine.com/articles/2298/marine-biomass-could-serve-as-power-source>.

18. Clarke + Modet, *En la cresta de la ola en Biotecnología Azul*. 2023.
19. SVS. *Aquarius Sea Surface Salinity 2011-2014 - Flat Maps*. 2017 2017/05/28; Available from: <https://svs.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/details.cgi?aid=4233>
20. Ball, P. *Blue energy: How mixing water can create electricity*. 2015 2015/10/22; Available from: <http://www.bbc.com/future/story/20150610-blue-energy-how-mixing-water-can-create-electricity>.
21. Fastcompany. *Salinity Power Plants May be the Next Eco-Power Generating Tech*. 2017/05/27; Available from: <https://www.fastcompany.com/1185670/salinity-power-plants-may-be-next-eco-power-generating-tech>. files/24/salinity-power-plants-may-be-next-eco-power-generating-tech.html.
22. OTEC News. *What is OTEC*. OTEC news 2015 2015/10/27; Available from: <http://www.otecnews.org/what-is-otec/>.
23. OES. *What is Ocean Energy - Ocean Thermal Energy*. 2015 2015/10/22; Available from: <http://www.ocean-energy-systems.org/what-is-ocean-energy/ocean-thermal-energy/>.
24. Harrison, S. *Ocean Thermal Energy Conversion*. 2010; Available from: <http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/harrison2/>.
25. Instituto de Investigaciones Eléctricas. *Generación de energía a partir de la fuerza del mar*. 2015 2015/10/22; Available from: <http://www.iiie.org.mx/sitiollE/sitio/control/06/detalle1.php?id=525>.
26. Earth and Space Research. *TPXO6.2: Global Inverse Tide Model*. 2017 2017/05/28; Available from: [https://www.esr.org/polar\\_tide\\_models/Model\\_TPXO71.html](https://www.esr.org/polar_tide_models/Model_TPXO71.html). files/50/Model\_TPXO71.html.
27. Hiriart Le Bert, G. *Revista Digital Universitaria*. 2009 2015/10/22; Available from: <http://www.revista.unam.mx/vol.10/num8/art49/int49-3.htm>.
28. López-González, J., G. Hiriart-Le Bert, and R. Silva-Casarín, *Cuantificación de energía de una planta mareomotriz*. Ingeniería, investigación y tecnología, 2010. **11**(2): p. 233-245.
29. SEAPOWER. *Wave Energy - Sea Power*. 2015 2015/10/22; Available from: <http://www.seapower.ie/wave-energy/>.
30. Gunn, K. and C. Stock-Williams, *Quantifying the global wave power resource*. Renewable Energy, 2012. **44**: p. 296-304.
31. Ross, D., *Power from sea wave*. Oxford University Press, 1995.
32. Falcão, A.F.d.O., *Wave energy utilization: A review of the technologies*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2010. **14**(3): p. 899-918.
33. Falcão, A.F., *Modelling of Wave Energy Conversion*. Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa., 2014.
34. Tunliweb. *Coastal and Oceanic photography by photographer Svein-Magne Tunli, tunliweb. Big waves in full storm. Pictures, Images, Photographs, Photo Gallery, Photography. Foto, bilder, hav, skjærgård, bølger*. 2022 2015/10/22; Available from: [http://www.tunliweb.no/SM/alb\\_havet.htm](http://www.tunliweb.no/SM/alb_havet.htm).
35. Heath, T.V., *A review of oscillating water columns*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2012. **370**(1959): p. 235-245.
36. WAVEC. *Projects :: Pico Wave Plant*. 2017 2017/05/28; Available from: [http://www.wavec.org/en/projects/pico\\_plant](http://www.wavec.org/en/projects/pico_plant). files/54/pico\_plant.html.

37. EDF. *Découvrir et comprendre*. EDF France 2016 2016/05/03; Available from: <https://www.edf.fr/groupe-edf/producteur-industriel/energies-renouvelables/hydraulique/edf-hydraulique-bretagne-normandie/l-usine-maremotrice-de-la-rance/decouvrir-et-comprendre.files/52/decouvrir-et-comprendre.html>.
38. Czitrom, S.P.R., *Wave energy-driven resonant sea-water pump*. Oceanographic Literature Review, 1998. **1**(45): p. 168.
39. Ruiz, F., et al., *Un dispositivo de bombeo de agua marina activado por oleaje*. Ingeniería hidráulica en México, 1994. **9**(2): p. 45-51.
40. Merino, M. *Sistema de limpieza de lagunas de la UNAM | Swagger*. 2015 2015/10/22; Available from: <http://www.swagger.mx/natural/prueban-en-cuba-sistema-de-limpieza-de-lagunas-de-la-unam>.
41. Chávez, C., et al. *Diseño hidrodinámico y evaluación de un dispositivo marítimo energético, "blow-jet"*. in *Memorias del XXI Congreso Nacional de Hidráulica Guadalajara Jalisco*. 2010.
42. Mendoza-Baldwin, E., et al., *Wave energy conversion using a blow-jet system*. Coastal Engineering Proceedings, 2011. **1**(32): p. 62.
43. García-Santiago, E., et al., *Optimización de un dispositivo undimotriz tipo boya flotante, análisis espectral*. XXVI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. Santiago, Chile, 2014.
44. García-Santiago, E., et al., *Optimización de un dispositivo undimotriz tipo boya flotante*. XXIII Congreso Nacional de Hidráulica, Puerto Vallarta, Jalisco, México, 2014.
45. García Santiago, E.I., et al., *Technical advances in the development of a floating wec: MICO. Conference: Coastal Structures and Solutions to Coastal Disasters Joint Conference 2015*. 2016.
46. Peña, A.I.P., *Estimacion del clima marítimo y la energía de oleaje disponible en las costas mexicanas*, in *Ingeniería civil-hidráulica*. 2013, UNAM: México.
47. López, I., et al., *Review of wave energy technologies and the necessary power-equipment*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. **27**: p. 413-434.
48. Technologies, O.P. *Energizing Ocean Intelligence*. Ocean Power Technologies 2015 2015/10/27; Available from: <http://www.oceanpowertechnologies.com/>.
49. EMEC, *European Marine Energy Centre*. 2023.
50. Lemessy, K.G., K. Manohar, and A. Adeyanju. *A review of wave energy conversion and its place in the Caribbean region*. in *The 13th European Wave and Tidal Energy Conference (EWTEC 2019), Napoli, Italy*. 2019.
51. Aderinto, T. and H. Li, *Review on power performance and efficiency of wave energy converters*. Energies, 2019. **12**(22): p. 4329.
52. Aderinto, T.O., F. Haces-Fernandez, and H. Li. *Design and Potential Application of Small Scale Wave Energy Converter*. in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. 2017. American Society of Mechanical Engineers.
53. Wang, L., J. Isberg, and E. Tedeschi, *Review of control strategies for wave energy conversion systems and their validation: the wave-to-wire approach*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018. **81**: p. 366-379.
54. Galparsoro, I., et al., *A new framework and tool for ecological risk assessment of wave energy converters projects*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021. **151**: p. 111539.
55. Iglesias, G., et al., *Environmental effects*. Wave and Tidal Energy, 2018: p. 364-454.
56. Martínez, M.L., et al., *A systemic view of potential environmental impacts of ocean energy production*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021. **149**: p. 111332.

57. Mendoza, E., et al., *A framework to evaluate the environmental impact of OCEAN energy devices*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2019. **112**: p. 440-449.
58. Boehlert, G.W. and A.B. Gill, *Environmental and ecological effects of ocean renewable energy development: a current synthesis*. Oceanography, 2010. **23**(2): p. 68-81.
59. Copping, A.E., et al., *Potential environmental effects of marine renewable energy development—the state of the science*. Journal of Marine Science and Engineering, 2020. **8**(11): p. 879.
60. Palomino, M. and J. Almazán, *Descripción, medida y análisis del oleaje*. Universidad politécnica de Madrid, 2000.
61. Silva Casarín, R., *Análisis y descripción estadística del oleaje*. 2005: Universidad Nacional Autónoma de México.
62. Pierson Jr, W.J., G. Neumann, and R.W. James, *Practical methods for observing and forecasting ocean waves by means of wave spectra and statistics*. 1971, DTIC Document.
63. Johnson, R., E. Mansard, and J. Ploeg, *Effects of wave grouping on breakwater stability*. Coastal Engineering Proceedings, 1978. **1**(16).
64. Toffoli, A. and E.M. Bitner-Gregersen, *Types of ocean surface waves, wave classification*. Encyclopedia of maritime and offshore engineering, 2017: p. 1-8.
65. Wright, J., A. Colling, and D. Park, *Waves, tides, and shallow-water processes*. Vol. 4. 1999: Gulf Professional Publishing.
66. Svendsen, I.A., I.A. Svendsen, and I.G. Jonsson, *Hydrodynamics of coastal regions*. 1976: Den Private ingeniørfond, Technical University of Denmark.
67. Dalrymple, R.A. and R.G. Dean, *Water wave mechanics for engineers and scientists*. 1991: Prentice-Hall.
68. García Santiago, E., et al., *Generación de energía con dos tipos de wec's en México: Resultados experimentales y avances en su implementación*. AMIP, 2015.
69. Guzman, R. *Cuántos kilowatts por hora consume una casa 2023* 2023/02/07; Available from: <https://recibodeluzcfe.mx/blog/cuantos-kilowatts-por-hora-consume-una-casa/>.
70. SEMARNAT, *Consumo de energía por hogar, 2016*. 2017.
71. Pierson Jr, W.J. and L. Moskowitz, *A proposed spectral form for fully developed wind seas based on the similarity theory of SA Kitaigorodskii*. Journal of geophysical research, 1964. **69**(24): p. 5181-5190.
72. WikiWaves. *Ocean-Wave Spectra* 2023; Available from: <https://wikiwaves.org/Ocean-Wave-Spectra>.

## Anexo 1

### Desarrolladores de tecnología OWC

<b>Compañía</b>	<b>Nombre del dispositivo</b>	<b>País</b>
Marine Power Technologies Pty Ltd	Energy Island	Australia
Oceanlinx	ogWave	China
Oceanlinx	blueWAVE	China
Oceanlinx	greenWAVE	China
Leancon Wave Energy	LEANCON WEC	Dinamarca
SDK Marine	SDK Wave Turbine	España
Joules Energy Efficiency Services Ltd	TETRON	Irlanda
Joules Energy Efficiency Services Ltd	TETRON	Irlanda
Ocean Energy	OceanEnergy Buoy	Irlanda
Sea Energies Ltd	SEWEC	Irlanda
Ryokuseisha	WAG Buoy	Japón
Pico	Pico OWC	Portugal
Spar Buoy	Spar Buoy	Portugal
Dresser Rand	HydroAir	USA
Principle Power		USA
Aquanet Power	aquaWAVE, ogWAVE, blueWAVE	Taiwan

**Rebosamiento / Totalizador**

<b>Compañía</b>	<b>Nombre del dispositivo</b>	<b>País</b>
Wave Dragon	Wave Dragon	Dinamarca
Norvento	Wavecat	España
The CyanWave Wave Energy Converter	CyanWave4	Irlanda
SeWave Ltd	OWC	Islas Faroe
JAMSTEC	Mighty Whale	Japón
Ocean Wave and Wind Energy (OWWE)	OWWE-Rig	Noruega
Wave Energy AS	Seawave Slot-Cone Generator	Noruega
Sea Power International AB	Streamturbine	Suecia
AWS Ocean Energy	AWS III	UK
Polygen Ltd	Volta WaveFlex	UK
Advance Ocean Energy @ Virginia Tech	MULLET	USA
Atlantic Wavepower Partnership		USA
Brimes Energy	Jellyfish	USA
Kinetic Wave Power	PowerGin	USA
RTI Wave Power		USA

**Desarrolladores de tecnología Atenuador**

<b>Compañía</b>	<b>Nombre del dispositivo</b>	<b>País</b>
Perpetuwave	Xtracta (Hybrid Attenuator)	Australia
Laminaria	Laminaria	Bélgica
Grey Island Energy Inc	SeaWEED	Canada
Ocean Energy Laboratory of Guangzhou Institute of Energy Conversion (GIEC), Chinese Academy of Sciences	Duck	China
Ocean Energy Laboratory of Guangzhou Institute of Energy Conversion (GIEC), Chinese Academy of Sciences	Eagle	China
Crestwing / Danyard Engineering Aps	Crestwing	Dinamarca
DEXAWAVE A/S	DEXAWAVE converter	Dinamarca
Floating Power Plant AS	Poseidon – Wave wind hybrid	Dinamarca
KN Ocean Energy Science & Development	KNSWING	Dinamarca
WavePiston	WavePiston	Dinamarca
Oceantec Energias Marinas SL	Oceantech Energy Converter	España
Tecnalia	PSE-MAR	España
Kneider Innovations	Wave Energy Propulsion	Francia
Waves Ruiz		Francia
Group Captain SM Ghouse	Free Floating Wave Energy Converter (FFWEC)	India
Sea Power Ltd	Sea Power Platform	Irlanda
Eco Wave Power	Power Wing	Israel
Eco Wave Power	Wave Clapper	Israel
Ensea	SWATHS	Italia
Aker Solutions ASA	Aker WEC	Noruega
Fred Olsen Ltd	The B1 Buoy	Noruega
Martifer Energia	FLOW	Portugal
Vortex Oscillation Technology Ltd	Vortex Oscillation Technology	Rusia
Wavetube		Suecia
AlbaTERN Ltd	WaveNet	UK
M4Wave Power	M4	UK
Mocean Energy	Blue Horizon, Sea Base	UK
Able Technologies LLC	Electric Generating Wave Pipe	USA
ATA Engineering		USA
Atmocean Inc	WES - Wave Energy System	USA
AWECS Attenuator		USA
Cal Poly-Protean Wave Energy Inc		USA
Columbia Power Technologies	StingRAY	USA
Globalone Sciences		USA
Navatek Ltd	Navatek WEC	USA

### Desarrolladores de tecnología Diferencial de Presión Sumergido

Compañía	Nombre del dispositivo	País
Bombora Wave Power	mWave	Australia
College of the North Atlantic	SARAH Pump	Canada
SeaNergy	Turbo Outburst Power/Top Desalination System	Israel
Fazzini Meccanica	ECOWEC	Italia
Impact Free Water	WEROP	Sudáfrica
ORECon	MRC 1000	UK
Calwave	WaveCarpet	USA
Calwave	CalWave	USA
M3 Wave LLC	DMP Device	USA

### Desarrolladores de tecnología OWC sumergido

Compañía	Nombre del dispositivo	País
BioPower Systems Pty Ltd	bioWave	Australia
WILEFKO	Wilefko WEC	Chile
AW Energy	WaveRoller	Finlandia
Wave Electricity Renewable Power Ocean (WERPO)	SDE	Israel
University of Tokyo (UT)	WaveRudder	Japón
Ing Arvid Nesheim	Oscillating Device	Noruega
Langlee Wave Power	Langlee System	Noruega
Offshore Wave Energy Ltd (OWEL)	OWEL WEC	UK
Polygen Ltd	Ocean WaveFlex	UK
Costas Wave	Costas Wave	USA
Harvest Wave Energy		USA
Kozoriz Franklin California Maglev Inc		USA
Resolute Marine Energy Inc	SurgeWEC	USA
Team FLAPPER		USA

### Desarrolladores de tecnología de Absorvedor Puntual

<b>Compañía</b>	<b>Nombre del dispositivo</b>	<b>País</b>
Brandl Motor	Brandl Generator	Alemania
Sinn Power	Sinn Power WEC	Alemania
AMOG	AEP	Australia
Aquagen Technologies	Rig Drive	Australia
Carnegie Wave Energy Ltd	CETO 6	Australia
Protean Wave Energy Limited	Protean WEC	Australia
FlanSea	Wave Pioneer	Bélgica
Accumulated Ocean Energy (AOE)	pneumatic Wave Energy Converter (pWEC)	Canada
Mermaid Power Corp	Neptune 3	Canada
Neptune Wave Power		Canada
Seawood Designs Inc	SurfPower	Canada
Ocean Energy Laboratory of Guangzhou Institute of Energy Conversion (GIEC), Chinese Academy of Sciences	Neza II	China
RESEN ENERGY	Resen Waves LOPF buoys	Dinamarca
Wave Star Energy ApS	Wave Star	Dinamarca
TWEFDA	TWEFDA Generator	Escocia
Sigma Energy	MD Wave Power Converter	Eslovenia
Abengoa Seapower	Órgano	España
Oceanic Power	SeaHeart	España
PIPO Systems	APC-PISYS	España
Wedge	W1	España
Hydrocap Energy SAS	Seacap	Francia
Slow Mill	Slow Mill	Holanda
Finima-Aimmer	Aimmer III	Hong Kong
Motor Wave	Motor Wave	Hong Kong
Indian Wave Energy Device	IWAVE	India
Nualgi Nanobiotech	Rock n Roll wave energy device	India
Blue Power Energy Ltd	Blue Power Take Off (PTOU)	Irlanda
Joules Energy Efficiency Services Ltd	Wave Train	Irlanda
Joules Energy Efficiency Services Ltd	Wave Train	Irlanda
Korean Institute of Ocean Science and Technology (KIOST)		Korea
Ingine Inc	INWave	Korea del Sur

**Desarrolladores de tecnología de Absorvedor Puntual, continuación**

<b>Compañía</b>	<b>Nombre del dispositivo</b>	<b>País</b>
Balkee Tide and Wave Electricity Generator	TWPEG	Mauritius
Fred Olsen Ltd	Lifesaver	Noruega
Norwegian University of Science and Technology	CONWEC	Noruega
Ocean Wave and Wind Energy (OWWE)	Wave Pump Rig	Noruega
Pelagic Power AS	W2Power	Noruega
Pontoon Power	Pontoon Power Converter	Noruega
Northwest Energy Innovations	Azura	Nueva Zelanda
Applied Technologies Company, Ltd (ATC)	Float Wave Electric Power Station (FWEPS)	Rusia
CorPower Ocean AB	C4, C5	Suecia
CorPower Ocean AB	CPO2	Suecia
Ocean Harvesting Technologies	Ocean Harvester	Suecia
Seabased AB	Linear generator (Islandberg Project)	Suecia
Waves4Power AB	WaveEL-buoy	Suecia
Dartmouth Wave Energy	SeaRaser Buoy	UK
Ecotricity	Searaser	UK
Marine Power Systems Ltd	WaveSub	UK
Neptune Renewable Energy Ltd	Triton	UK
Seatricity	Oceanus 2	UK
SEEWEC Consortium	FO3	UK
Snapper Consortium	Snapper	UK
The Bobber Company Ltd	Manchester Bobber	UK
AdapWave		USA
AeroVironment Inc	Eel Grass	USA
AquaHarmonics		USA
Aqua-Magnetics Inc	Electric Buoy	USA
Aqua-Shift		USA
Atlas Ocean Systems	SQ5	USA
Ecomerit Technologies	Centipod	USA
ELGEN Wave	Horizon Platform	USA
Energystics	Vibristor	USA
Float Inc	Rho-Cee	USA

**Desarrolladores de tecnología de Absorvedor Puntual, continuación**

<b>Compañía</b>	<b>Nombre del dispositivo</b>	<b>País</b>
Green Ocean Wave Energy	Ocean Wave Air Piston	USA
Independent Natural Resources	SEADOG	USA
IOWEC		USA
Kymogen	Kymogen WEC	USA
MakerStrong	eBuoy	USA
Marine Energy Corporation	Wave Catcher	USA
Maruthi Power		USA
Mighty Waves Energy Team		USA
Next Gen		USA
Ocean Electric Inc	Wave platform	USA
Ocean Energy Industries Inc	WaveSurfer	USA
Ocean Motion International	OMI Combined Energy System	USA
Ocean Power Technologies (OPT)	Power Buoy	USA
Oscilla Power, Inc	TDB (magnetostrictve wave energy harvester_	USA
OWEC Ocean Wave Energy Company	OWEC Ocean Wave Energy Converter	USA
Sea Green Technologies		USA
Spindrift Energy	Spindrift Energy Device	USA
Super Watt Wave Catcher		USA
Tremont Electric	nPower WEC	USA
Wave Energy Team at Virginia Tech		USA
Waveberg Development	Waveberg	USA
Waveswing America		USA

**Desarrolladores de tecnología Diferencial de Presión Sumergido**

<b>Compañía</b>	<b>Nombre del dispositivo</b>	<b>País</b>
Bombora Wave Power	mWave	Australia
College of the North Atlantic	SARAH Pump	Canada
SeaNergy	Turbo Outburst Power/Top Desalination System	Israel
Fazzini Meccanica	ECOWEC	Italia
Impact Free Water	WEROP	Sudáfrica
ORECon	MRC 1000	UK
Calwave	WaveCarpet	USA
Calwave	CalWave	USA
M3 Wave LLC	DMP Device	USA

**Otros desarrollos tecnológicos**

<b>Compañía</b>	<b>Nombre del dispositivo</b>	<b>País</b>
Wello OY	Penguin	Finlandia
Ecole Centrale de Nantes	SEAREV	Francia
Yam Pro	Yam Pro Energy	Israel
UmbraGroup	EMG	Italia
Waves for Energy	ISWEC	Italia
Waveco	Subwave	Noruega
WITT Ltd	The Marine WITT	UK
WITT Ltd	The Marine WITT	UK
Aquantis	Aquantis Turbines	USA
Enorasy Labs		USA
Vigor Wave Energy AB	Vigor Wave Energy Converter	Suecia
Checkmate Seaenergy UK Ltd	Anaconda	UK
Bosch Rexroth		Alemania
NEMOS GmbH	NEMOS	Alemania
Coppe Subsea Technology	Clean Energy from Waves	Brasil
Oneka Technologies	Oneka	Canada
Ausind	Ausind WEC	Chile
Etymol Ocean Power SpA	Etymol WEC - Alfa Series	Chile
JVA South Energy Pacific	JVA WEC	Chile
Maestranza Diesel	Maestranza Diesel WEC	Chile
Vortex Wave Power	Vortex Wave Power	Chile
City University of Hong Kong (CityU)	TENG (Triboelectric Nanogenerator)	China
WavePlane Production	WavePlane	Dinamarca
Weptos	WEPTOS WEC	Dinamarca
Rotary Wave SL	Rotary	España
Jospa Ltd	Irish Tube Compressor	Irlanda
40 South Energy	H24	Italia
University of Genoa	Seaspoon	Italia
Muroran Institute of Technology	Pendulor	Japón
Proyecto Sexto Sol	Independent Wave Capture Module (MICO)	Mexico
Havkraft	Evolver (Havkraft Wave Energy Converter – H-WEC)	Noruega

**Otros desarrollos tecnológicos, continuación**

<b>Compañía</b>	<b>Nombre del dispositivo</b>	<b>País</b>
Intentium AS	Intentium Offshore Wave Energy Convertor	Noruega
IHC Tidal Energy	Wave Rotor/Oceanmill	Países Bajos
SBM Offshore	S3® Wave Energy Converter	Países Bajos
Ocean RusEnergy	Ocean 160	Rusia
Ocean RusEnergy	Ocean 3	Rusia
Ocean RusEnergy	Ocean 640	Rusia
Hann-Ocean Energy Pte Ltd	Drakoo	Singapur
Interproject Service (IPS) AB	IPS OWEC Buoy	Suecia
Uppsala University	Uppsala/Seabased AB Wave Energy Convertor	Suecia
Aqua Vision Energy	Carpet Off-Shore Sea Application Concept	Turquía
Avium AS	Yeti Cluster System	Turquía
Aimmer UK	Aimmer	UK
AlbaTERN Ltd	SQUID	UK
Aqua Power Technologies Ltd	Renewable Wave Power (RWP001)	UK
Caley Ocean Systems	Wave Plane	UK
Greenheat Systems Ltd	Gentec WaTS	UK
Limerick Wave Ltd	Limerick Wave PTO	UK
PAULEY (Phil Pauley Innovation)	Solar Marine Cells	UK
Sea Wave Energy Ltd (SWEL)	Waveline Magnet	UK
Trident Energy Ltd	PowerPod & PowerPod II (Linear Generator)	UK
Wave-tricity		UK
Alternative Energy Engineering Associates	AEEA-WECS	USA
Atargis Energy Corporation	Cycloidal Wave Energy Converter (CycWEC)	USA
Buoyant Energy		USA
Earth by Design		USA
Fetzer Wave		USA
Gmax Tidal Energy		USA
Greenfield Techonolgies LLC		USA
Gwave	Power Generation Vessel (PGV)	USA
GyroGen		USA
Healy's Wave Energy Convertor		USA

**Otros desarrollos tecnológicos, continuación**

<b>Compañía</b>	<b>Nombre del dispositivo</b>	<b>País</b>
Hui Nalu		USA
Hydrokinetic Energy Solutions		USA
James F Marino		USA
Jetty Joule		USA
Leviathan Energy Waves		USA
Marine Hydroelectric Company	MHG (Marine Hydroelectric Generator)	USA
Ovsiankin Energy Group		USA
Poseidon's Kite		USA
Royal Wave		USA
RTI Wave Energy	RTI F2/F2D	USA
Rutgers Wave Power	Cyclic Pitch Paddle Wheel	USA
SARA Inc	MHD Wave Energy Conversion (MWEC)	USA
SeaFoil		USA
TAMU-OSSL		USA
Team Treadwater		USA
Uniturbine Corporation		USA
Vortex		USA
Wave Water Works		USA
Waves2Energy		USA
Wavy Turbine		USA
Wizards of Energy		USA

## Anexo 2

Se trabajó con datos oceanográficos del sitio de emplazamiento ya que la Unidad Académica de Puerto Morelos y el CICESE cuentan con registros de diferentes puntos cercanos al lugar que permitirían conocer los estados del mar en los que el dispositivo operaría. La información fue solicitada al investigador responsable de los equipos el Dr. Julio Candela del CICESE.

Los equipos fueron montados en el fondo de la laguna arrecifal en diferentes puntos que se pueden observar en la Fig. 44, uno en el centro de la entrada sur a una profundidad de 8 m (LPM0); el segundo instrumento fue instalado en el interior de la laguna de poca profundidad, aproximadamente en su centro, a 3,5 m de profundidad (LPM1); el tercer instrumento fue desplegado en el centro de la segunda entrada norte de la laguna a una profundidad de 6 m (LPM2); el cuarto instrumento fue instalado a 500 m costa fuera desde la barrera y a una profundidad de 22 m (LPM3) y el último instrumento en la primera entrada norte de la laguna a una profundidad de 6 m (LPM4).

El de mayor interés es LPM1 por la cercanía a la ubicación del WEC, pero se analizó la información de todos los instrumentos montados. Se obtuvieron rosas de oleaje, probabilidad conjunta, probabilidad de excedencia y potencia de las olas.

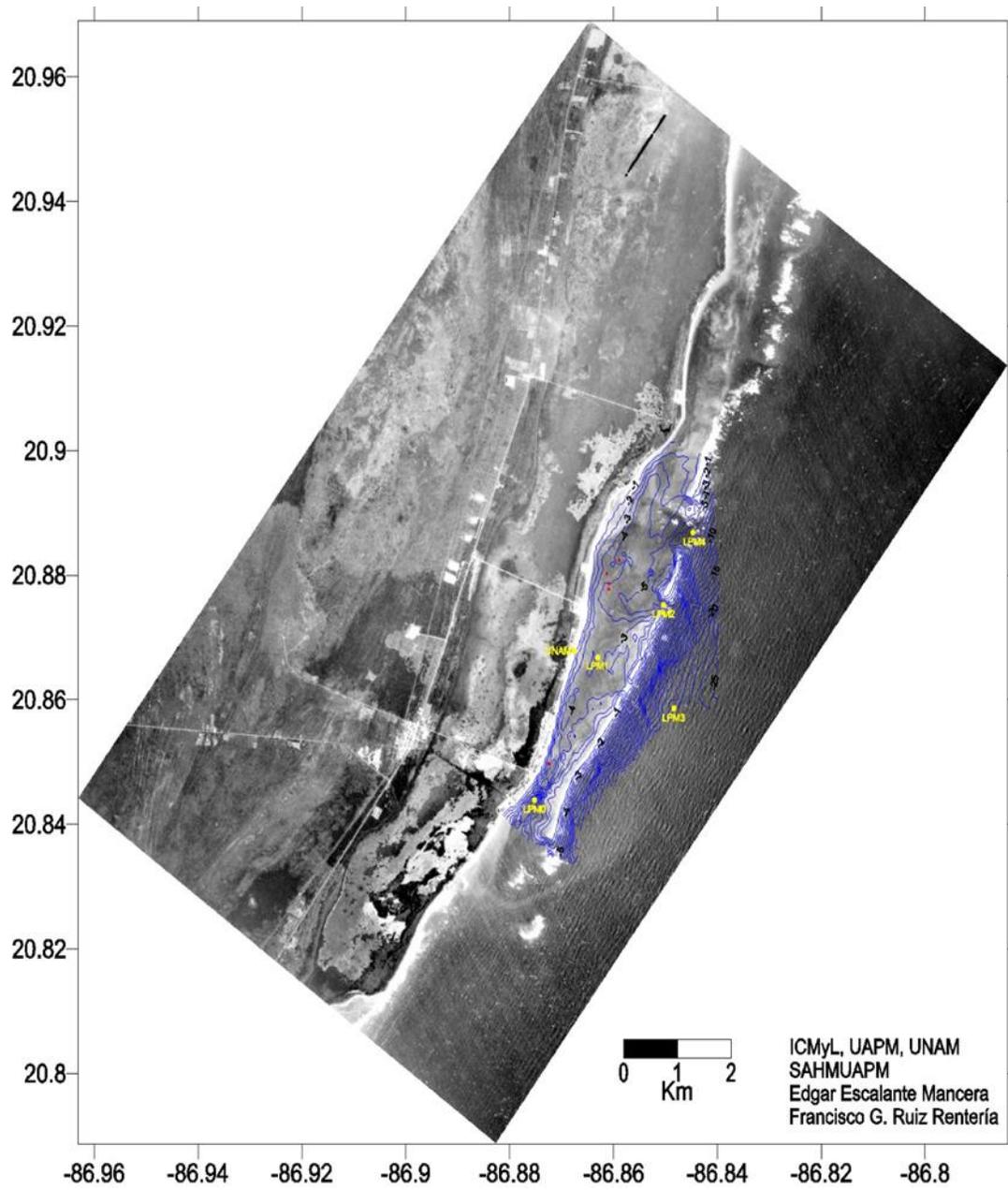


Fig. 44. Batimetría de la laguna arrecifal y ubicación de equipos.

## Regimen Medio LPM0

Las lecturas, de este instrumento comprenden el periodo de septiembre de 2003 a octubre de 2006 con intermitencias en el registro de datos; en total suman 42 meses de registros. Con esta información se obtuvo la rosa de oleaje, Fig. 45, la cual nos indica que la dirección de propagación con más frecuente es en el sector este-sur-este y sur-este con el 22% de frecuencia y olas de 0.25 m a 50 m máximo.

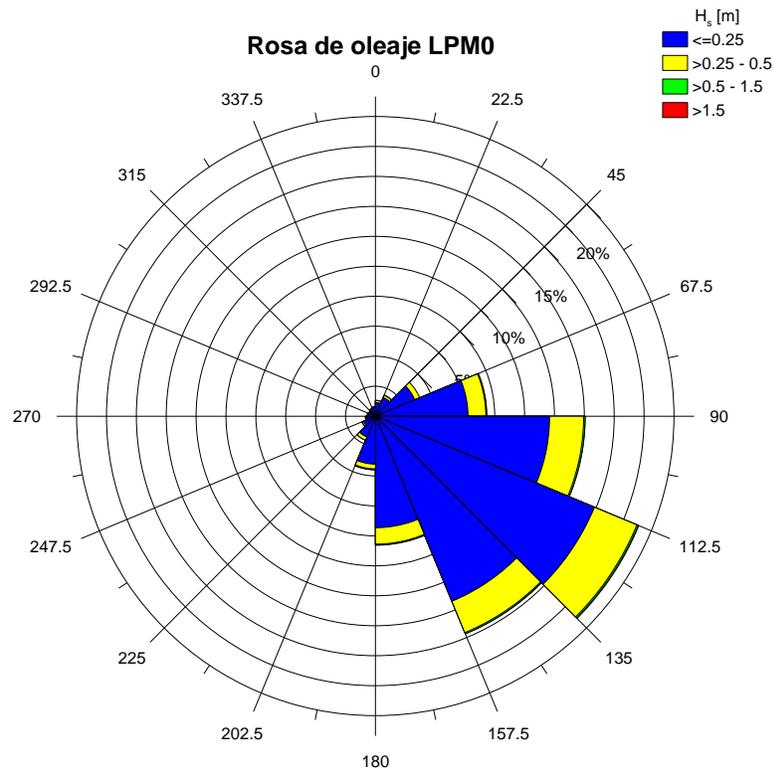


Fig. 45. Rosa de oleaje LPM0.

Las rosas de oleaje mensual detallan mejor la dirección de propagación del oleaje. En la Fig. 46 se puede ver que la dirección de propagación se encuentra en un amplio sector que abarca desde del este hasta el sur y la altura de olas máxima es de 0.50 m.

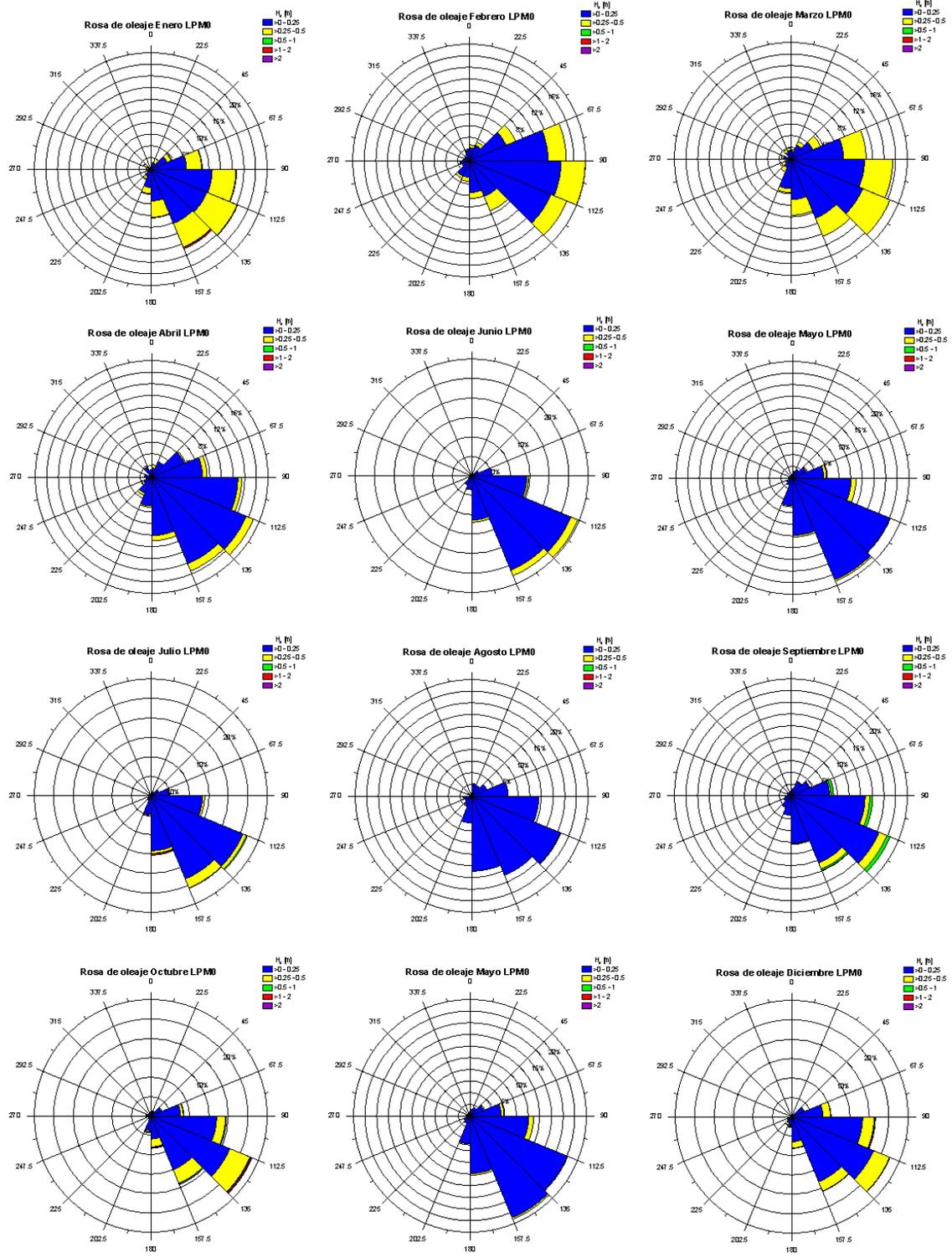


Fig. 46. Rosas de oleaje mensual de LPM0.

La Tabla 8 y Tabla 9 muestran que olas de hasta 0.4 m tienen periodos de entre 3 y 4 s predominantemente, mientras que la dirección del oleaje con esta misma altura de ola se concentra en los 90° y los 157° de dirección.

Tabla 8. Probabilidad conjunta de Hs y Tp para LPM0.

	Periodo pico Tp [s]															Total	Promedio			
	HS/TP	<2.0	2.0-3.0	3.0-4.0	4.0-5.0	5.0-6.0	6.0-7.0	7.0-8.0	8.0-9.0	9.0-10.0	10.0-11.0	11.0-12.0	12.0-13.0	13.0-14.0	14.0-15.0					
Altura significativa Hs [m]	<0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.0-0.2	0	0	2779	401	843	721	741	437	105	45	20	0	2	2	6096	64.02689			
	0.2-0.4	0	1	2602	57	106	217	193	67	39	15	15	3	2	2	3319	34.85978			
	0.4-0.6	0	0	55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	55	0.57767			
	0.6-0.8	0	0	11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	11	0.115534			
	0.8-1.0	0	0	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0.094528			
	1.0-1.2	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	0.126037			
	1.2-1.4	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0.031509			
	1.4-1.6	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0.031509			
	1.6-1.8	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0.042012			
	1.8-2.0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0.031509			
	2.0-2.2	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0.031509			
	2.2-2.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
	2.4-2.6	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0.021006			
	>2.6	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.010503			
<b>Total</b>	0	1	5487	458	949	938	934	504	144	60	35	3	4	4	9521	100				
<b>Promedio</b>	0	0.0105	57.631	4.8104	9.9674	9.8519	9.8099	5.2936	1.5124	0.6302	0.3676	0.0315	0.042	0.042	100					

Tabla 9. Probabilidad conjunta de Hs y Dirección para LPM0.

	Dirección de propagación																Total	Promedio		
	HS/MDir	<22.5	22.5-45.0	45.0-67.5	67.5-90.0	90.0-112.5	112.5-135.0	135.0-157.5	157.5-180.0	180.0-202.5	202.5-225.0	225.0-247.5	247.5-270.0	270.0-292.5	292.5-315.0	315.0-337.5			337.5-360.0	
Altura significativa Hs [m]	<0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.0-0.2	82	129	233	563	1044	1425	1194	696	302	137	83	55	44	42	39	45	6113	63.4392	
	0.2-0.4	42	52	151	324	629	843	678	326	120	72	33	24	21	16	27	31	3389	35.1702	
	0.4-0.6	2	1	2	6	9	17	13	6	1	0	0	2	1	0	0	0	60	0.62267	
	0.6-0.8	0	1	0	3	7	6	4	2	0	1	0	0	1	3	1	0	29	0.30095	
	0.8-1.0	0	1	0	0	0	2	2	1	3	0	1	1	1	0	0	0	12	0.12453	
	1.0-1.2	1	1	0	0	0	0	1	1	4	0	1	1	0	0	1	2	13	0.13491	
	1.2-1.4	0	0	0	0	1	0	0	2	0	0	1	0	0	0	0	0	4	0.04151	
	1.4-1.6	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0.03113	
	1.6-1.8	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	4	0.04151	
	1.8-2.0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	3	0.03113	
	2.0-2.2	0	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0.03113	
	2.2-2.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
	2.4-2.6	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	2	0.02076	
	>2.6	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.01038	
<b>Total</b>	128	185	386	898	1691	2298	1894	1037	431	210	119	83	68	61	69	78	9636	100		
<b>Promedio</b>	1.3284	1.9199	4.0058	9.3192	17.549	23.848	19.655	10.762	4.4728	2.1793	1.235	0.8614	0.7057	0.633	0.7161	0.80946	100			

## Regimen Medio LPM1

Los registros comprenden el periodo de septiembre de 2003 a agosto 2013 para LPM1, la captura de datos no fue continua. La rosa de oleaje (Fig. 47) muestra que la dirección de propagación con más frecuente se da entre el sector este-sur-este y sur-este con el 11.5 % de frecuencia y olas de 0.25 m a 0.5 m máximo sin embargo en este LPM las olas se propagan en todas las direcciones con menor frecuencia, esto esta relaciona con la dirección y velocidad del viento dominante de la región, que en algunas épocas del año es más intenso y la dirección cambia, esto sumado a las olas que son reflejadas por la costa.

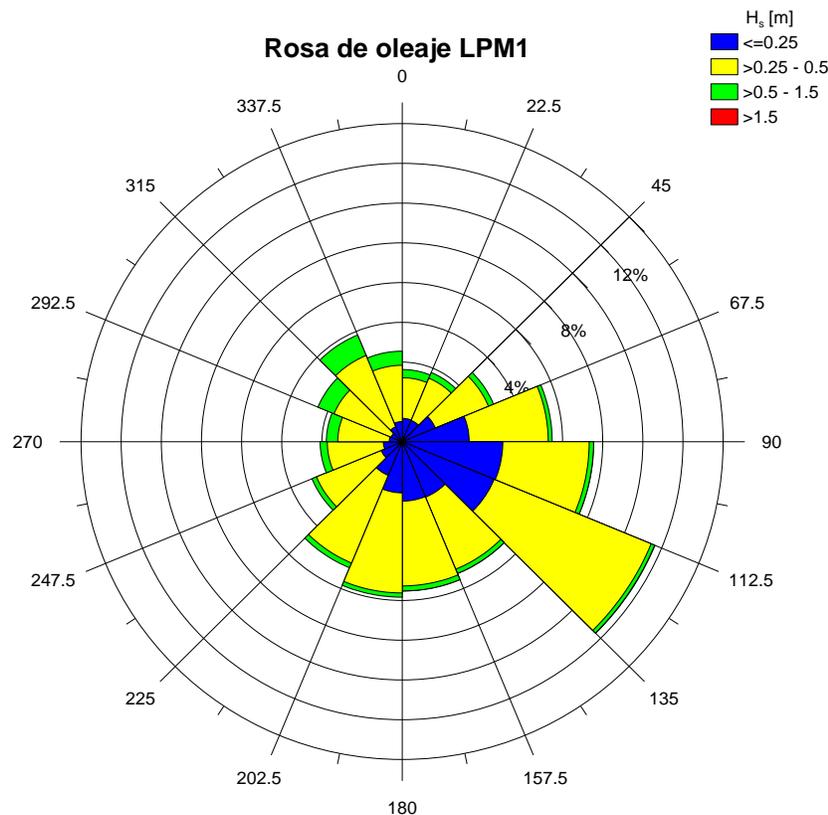


Fig. 47. Rosa de oleaje LPM1.

Las rosas mensuales de la Fig. 48 nos muestran que en los meses de abril y junio la dirección predominante es entre oeste-nor-oeste y nor-oeste con el 10% y olas máximas de 0.5 m. Es importante resaltar que la temporada de frentes fríos

comienza en septiembre y concluye en mayo, el viento dominante proviene del noroeste, que influye en el tamaño de las olas que se propagan entre el oeste y el norte.

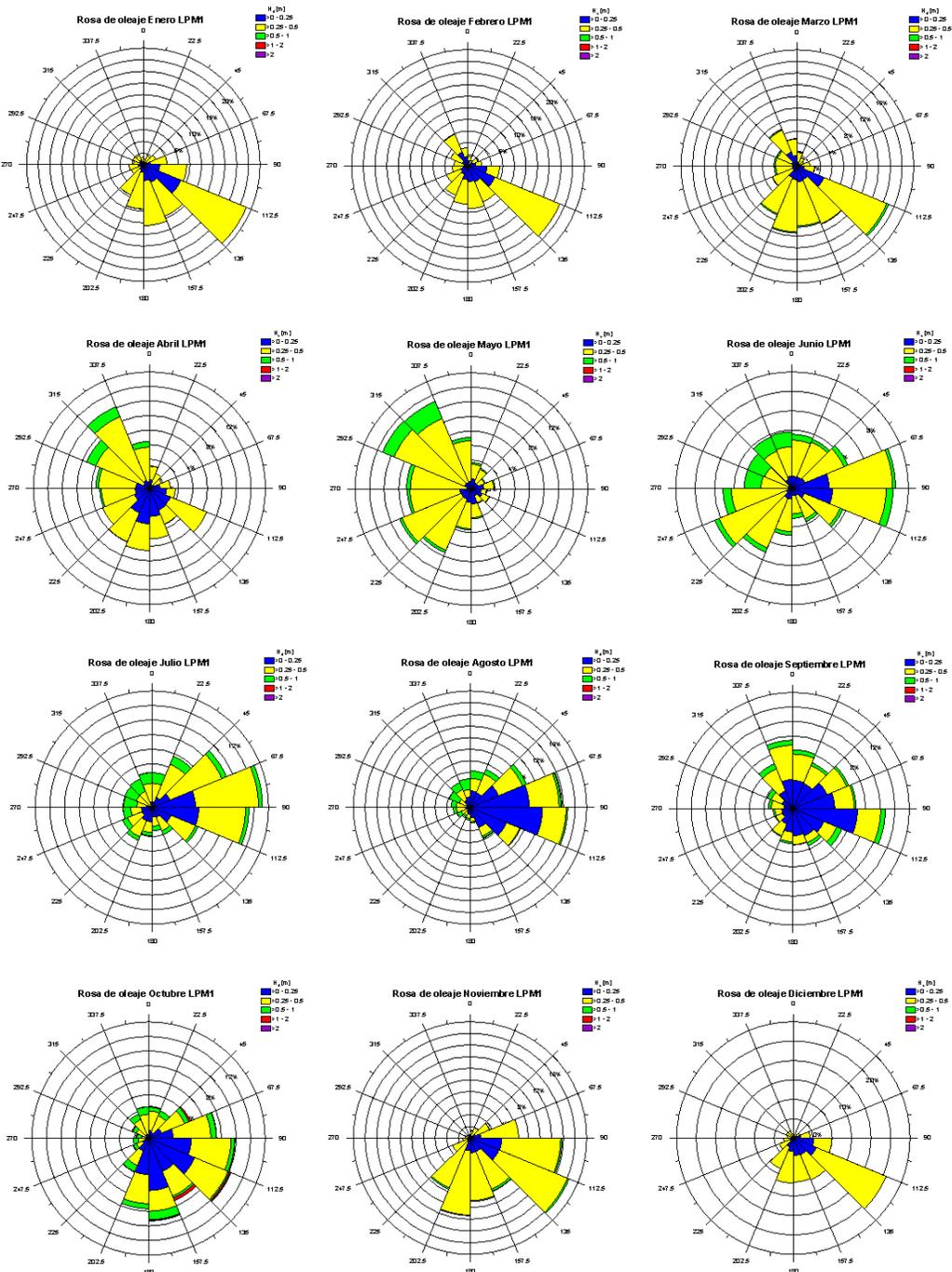


Fig. 48. Rosas de oleaje mensual de LPM1.

En la Tabla 10 y Tabla 11 se muestra la probabilidad conjunta de  $H_s$ - $T_p$  y  $H_s$ -Dirección. De acuerdo a los resultados obtenidos es posible afirmar que las olas de hasta 0.4 m tienen periodos de entre 2 y 3 s predominantemente, mientras que la dirección del oleaje con esta misma altura de ola se concentra en los  $112.5^\circ$  y  $135^\circ$  de dirección.

Tabla 10. Probabilidad conjunta de  $H_s$  y  $T_p$  para LPM1.

	Periodo pico $T_p$ [s]																Total	Promedio	
	$H_s \backslash T_p$	<2.0	2.0-3.0	3.0-4.0	4.0-5.0	5.0-6.0	6.0-7.0	7.0-8.0	8.0-9.0	9.0-10.0	10.0-11.0	11.0-12.0	12.0-13.0	13.0-14.0	14.0-15.0	>15.0			
Altura significativa $H_s$ [m]	<0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.0-0.2	0	726	34	152	491	767	943	462	131	85	24	6	9	1	0	0	3831	16.81443
	0.2-0.4	0	6525	11	51	552	1986	3198	2136	551	172	92	10	14	3	2	0	15303	67.16555
	0.4-0.6	0	2819	0	0	4	61	173	103	21	6	4	9	3	5	2	0	3210	14.08883
	0.6-0.8	0	404	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	404	1.773174
	0.8-1.0	0	19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	0.083392
	1.0-1.2	0	5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0.026334
	1.2-1.4	0	3	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	4	0.017556
	1.4-1.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0.004389
	1.6-1.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1.8-2.0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0.008778
	2.0-2.2	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0.008778
	2.2-2.4	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0.008778
	2.4-2.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	>2.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Total</b>	0	10501	51	204	1047	2814	4314	2702	703	263	120	25	27	9	4	0	22784	100	
<b>Promedio</b>	0	46.09	0.224	0.895	4.595	12.35	18.93	11.86	3.085	1.154	0.527	0.11	0.119	0.04	0.018	0	100		

Tabla 11. Probabilidad conjunta de  $H_s$  y dirección para LPM1.

	Dirección de propagación																Total	Promedio	
	$H_s \backslash MDir$	<22.5	22.5-45.0	45.0-67.5	67.5-90.0	90.0-112.5	112.5-135.0	135.0-157.5	157.5-180.0	180.0-202.5	202.5-225.0	225.0-247.5	247.5-270.0	270.0-292.5	292.5-315.0	315.0-337.5			337.5-360.0
Altura significativa $H_s$ [m]	<0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	0.0-0.2	149	133	238	419	673	546	400	361	255	153	105	75	62	58	91	113	3831	16.2234268
	0.2-0.4	502	591	780	1191	1425	2413	1100	1211	1413	1266	892	696	555	568	698	602	15903	67.3456424
	0.4-0.6	174	151	127	138	139	239	170	175	161	187	135	166	226	376	512	315	3391	14.3601253
	0.6-0.8	32	15	12	11	10	12	15	19	16	13	14	29	47	68	70	43	426	1.80401457
	0.8-1.0	1	0	2	2	4	4	2	5	2	2	2	0	3	2	1	2	34	0.14398238
	1.0-1.2	0	0	2	3	0	0	3	2	0	0	1	0	0	2	0	1	14	0.05928686
	1.2-1.4	0	0	2	0	0	0	3	0	0	0	1	0	0	0	0	0	6	0.02540866
	1.4-1.6	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0.00846955
	1.6-1.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1.8-2.0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0.01270433
	2.0-2.2	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0.00846955
	2.2-2.4	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0.00846955
	2.4-2.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	>2.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Total</b>	858	890	1163	1764	2252	3218	1696	1774	1847	1621	1150	966	893	1074	1372	1076	23614	100	
<b>Promedio</b>	3.633	3.769	4.925	7.47	9.537	13.63	7.182	7.512	7.822	6.865	4.87	4.091	3.782	4.548	5.81	4.557	100		

## Regimen Medio LPM2

Al igual que en los instrumentos anteriores los registros son intermitentes, el periodo comprende septiembre de 2003 a julio de 2012 con un total de 42 meses de registros de datos de calidad. La rosa de la Fig. 49 indica una marcada dirección de propagación el sector este-sur-este y sur-este con el 45 % de frecuencia y olas de 0.5 m a 1.5 m máximo.

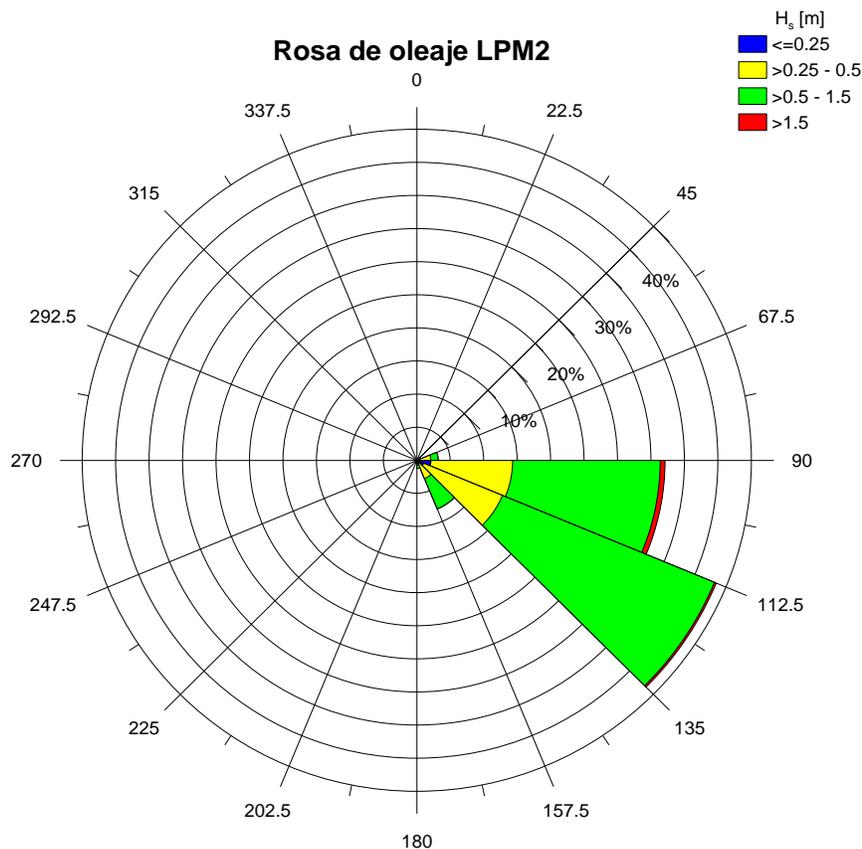


Fig. 49. Rosa de oleaje LPM2.

La información mensual de la Fig. 50 indica que la altura de ola máxima varía de mes a mes pero la dirección de propagación es en el mismo sector, observando olas de más de 1 m de noviembre a enero.

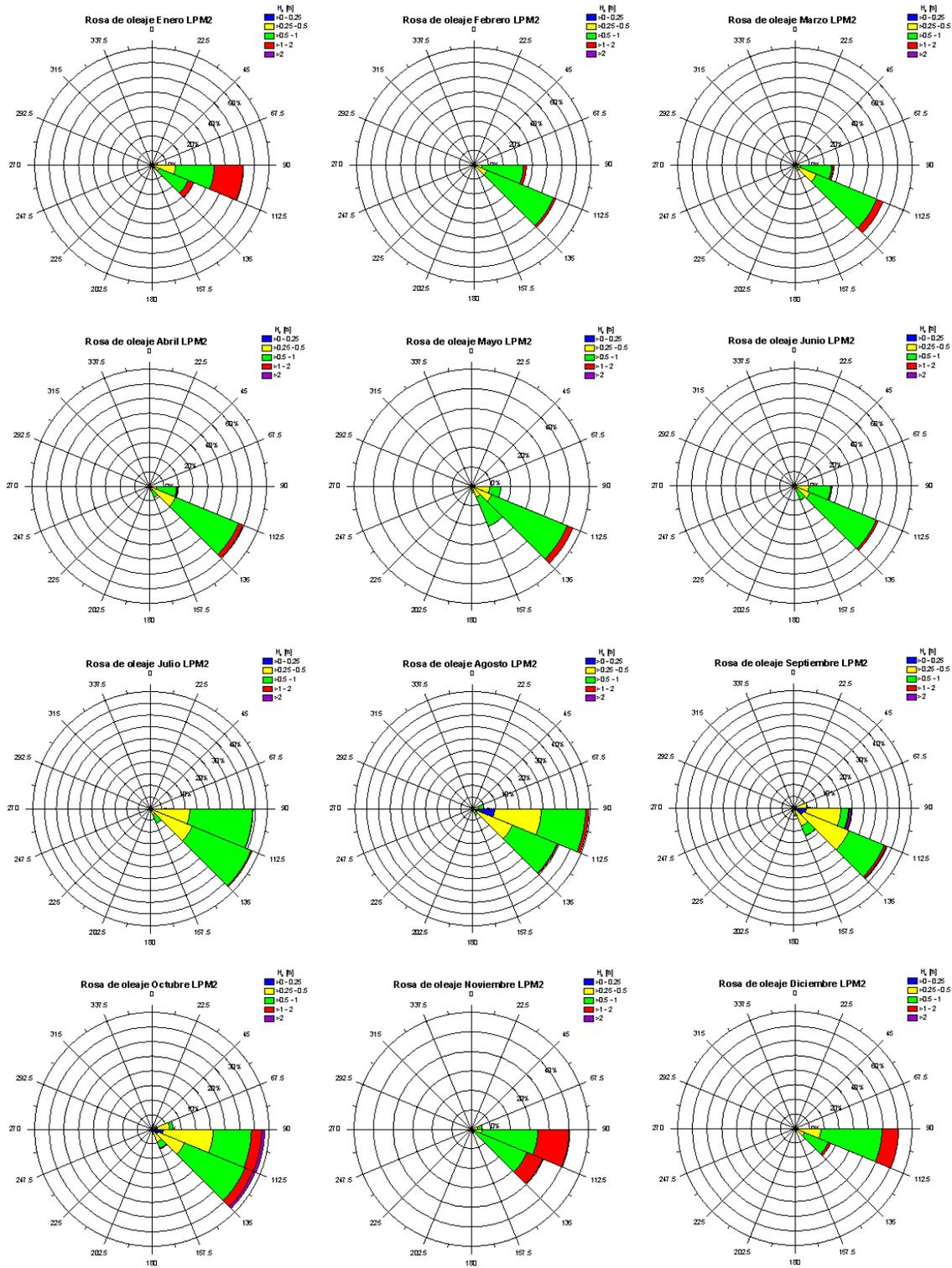


Fig. 50. Rosas de oleaje mensual de LPM2.

La Tabla 12 y Tabla 13 de probabilidad conjunta muestran que las olas de 0.4 m hasta 0.8 m tienen periodos de entre 5 y 7 s, siendo lo más frecuente, mientras que la dirección del oleaje con esta misma altura de ola se concentra en los 112.5° y los 135° de dirección.

Tabla 12. Probabilidad conjunta de Hs y Tp para LPM2.

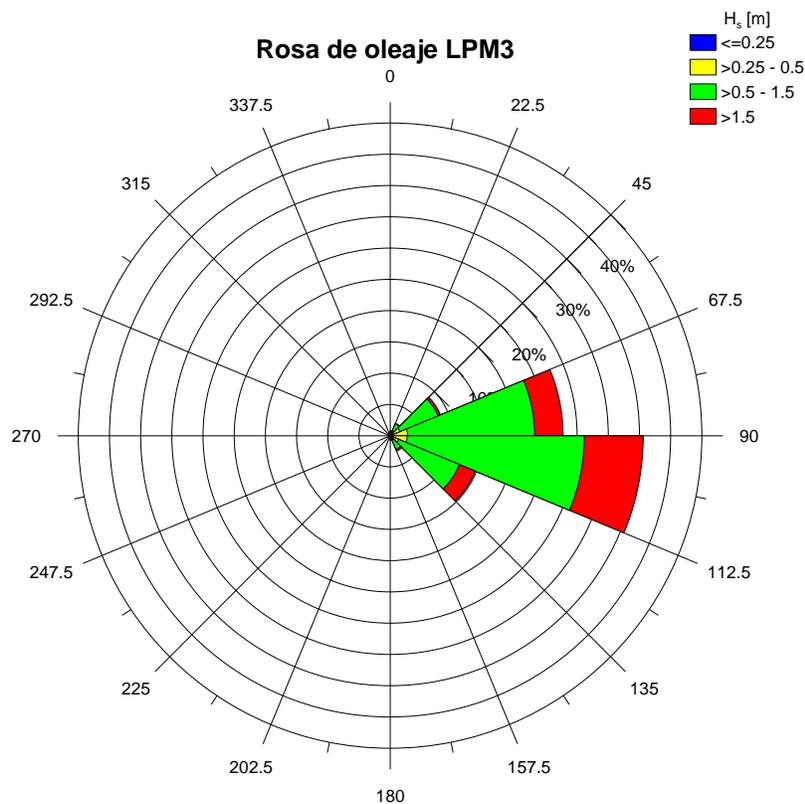
HS/TP	Periodo pico Tp [s]																Total	Promedio			
	<2.0	2.0-3.0	3.0-4.0	4.0-5.0	5.0-6.0	6.0-7.0	7.0-8.0	8.0-9.0	9.0-10.0	10.0-11.0	11.0-12.0	12.0-13.0	13.0-14.0	14.0-15.0	>15.0						
<0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.0-0.2	0	0	45	32	31	91	26	2	6	6	0	0	0	1	0	0	0	0	240	1.482671	
0.2-0.4	0	11	344	599	613	599	645	189	50	7	4	0	1	0	0	0	0	3062	18.91641		
0.4-0.6	0	14	212	702	1583	1241	959	392	90	19	1	1	1	0	0	0	0	5215	32.21721		
0.6-0.8	0	1	34	247	1090	1725	1030	308	76	13	3	2	0	0	0	0	0	4529	27.97924		
0.8-1.0	0	0	0	11	184	752	846	199	34	5	7	4	5	2	0	0	0	2049	12.65831		
1.0-1.2	0	0	1	1	17	148	370	130	12	3	2	1	2	0	0	0	0	687	4.244147		
1.2-1.4	0	0	0	0	2	23	120	46	7	1	1	0	1	0	0	0	0	201	1.241737		
1.4-1.6	0	0	0	0	0	2	37	22	3	1	0	0	1	0	0	0	0	66	0.407735		
1.6-1.8	0	0	0	0	0	1	16	15	2	0	2	1	2	0	0	0	0	39	0.240934		
1.8-2.0	0	0	0	0	0	1	2	24	4	4	1	1	2	1	0	0	0	40	0.247112		
2.0-2.2	0	0	0	0	0	0	1	12	3	3	1	3	4	2	3	3	0	32	0.19769		
2.2-2.4	0	0	0	0	1	1	0	2	3	1	1	6	4	3	0	0	0	22	0.135912		
2.4-2.6	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	4	0.024711		
>2.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0.006178		
<b>Total</b>	0	26	636	1592	3521	4585	4053	1341	290	63	23	19	26	8	4	16187	100				
<b>Promedio</b>	0	0.161	3.929	9.835	21.75	28.33	25.04	8.284	1.792	0.389	0.142	0.117	0.161	0.049	0.025	100					

Tabla 13. Probabilidad conjunta de Hs y dirección para LPM2.

HS/MDir	Dirección de propagación																Total	Promedio		
	<22.5	22.5-45.0	45.0-67.5	67.5-90.0	90.0-112.5	112.5-135.0	135.0-157.5	157.5-180.0	180.0-202.5	202.5-225.0	225.0-247.5	247.5-270.0	270.0-292.5	292.5-315.0	315.0-337.5	337.5-360.0				
<0.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.0-0.2	0	5	8	27	126	48	12	5	1	2	0	0	0	1	3	2	2	240	1.48257969	
0.2-0.4	12	19	38	190	1337	1062	218	61	35	21	20	18	8	9	5	9	3062	18.9152459		
0.4-0.6	15	5	29	200	1661	2554	592	98	30	8	4	7	2	2	2	6	5215	32.2152212		
0.6-0.8	3	1	11	75	1491	2530	381	31	2	1	1	1	0	0	0	1	4529	27.9775142		
0.8-1.0	3	1	2	15	752	1210	64	1	1	0	0	0	0	0	0	0	2049	12.6575241		
1.0-1.2	2	0	1	4	348	318	13	1	0	0	0	0	0	0	0	0	687	4.24388436		
1.2-1.4	0	0	0	1	136	62	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	201	1.24166049		
1.4-1.6	1	0	0	0	55	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	66	0.40770941		
1.6-1.8	1	0	0	0	26	11	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39	0.2409192		
1.8-2.0	0	0	0	0	31	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	40	0.24709661		
2.0-2.2	0	0	0	0	20	13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33	0.20385471		
2.2-2.4	0	0	0	2	13	6	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22	0.13590314		
2.4-2.6	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0.02470966		
>2.6	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.00617742		
<b>Total</b>	37	31	89	514	6000	7834	1284	197	69	32	25	26	10	12	10	18	16188	100		
<b>Promedio</b>	0.229	0.191	0.55	3.175	37.06	48.39	7.932	1.217	0.426	0.198	0.154	0.161	0.062	0.074	0.062	0.111	100			

## Regimen Medio LPM3

Los registros de LPM3 comprenden el periodo de septiembre de 2003 a mayo de 2010, con varios meses sin datos, en total suman 58 meses de registros. En este caso la rosa de la Fig. 51 nos indica una dirección de propagación entre el sector este y este-sur-este con una frecuencia del 36 % y olas mayores de 1.5 m predominantemente.



*Fig. 51. Rosa de oleaje LPM3.*

La información mensual de este LPM nos indica que la dirección este-nor-este es dominante en el mes de noviembre y en diciembre, abarca desde el este-nor-este al este-sur-este con olas de entre 1 m y 2 m, Fig. 52.

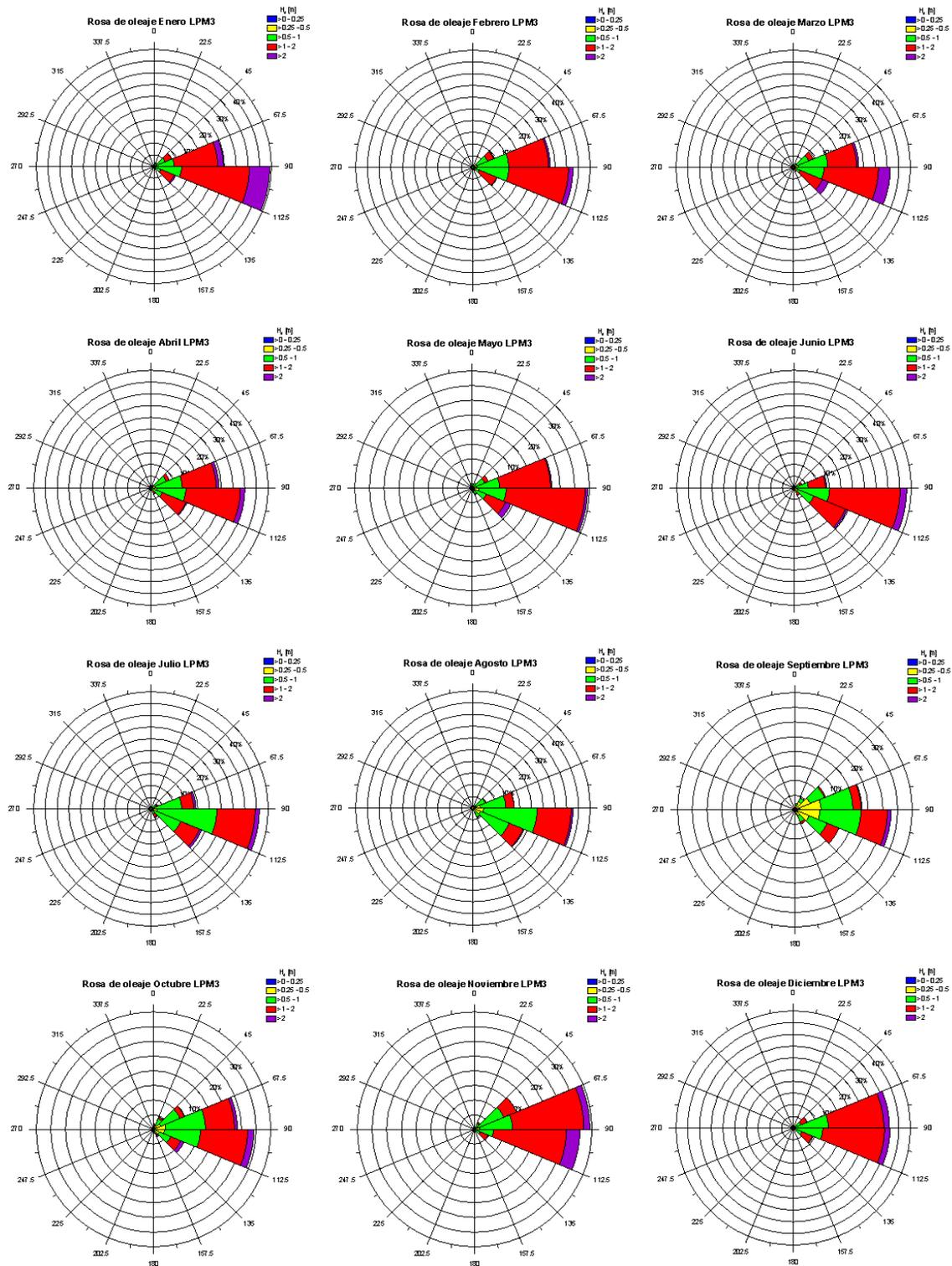


Fig. 52. Rosas de oleaje mensual de LPM3.

La Tabla 14 y Tabla 15 de probabilidad conjunta, muestran que las olas de 1 m hasta 2 m tienen periodos de entre 6 y 7 s predominantemente mientras que la dirección del oleaje con esta misma altura de ola se concentra en los 90° y 112.5° de dirección.

Tabla 14. Probabilidad conjunta de Hs y Tp para LPM3.

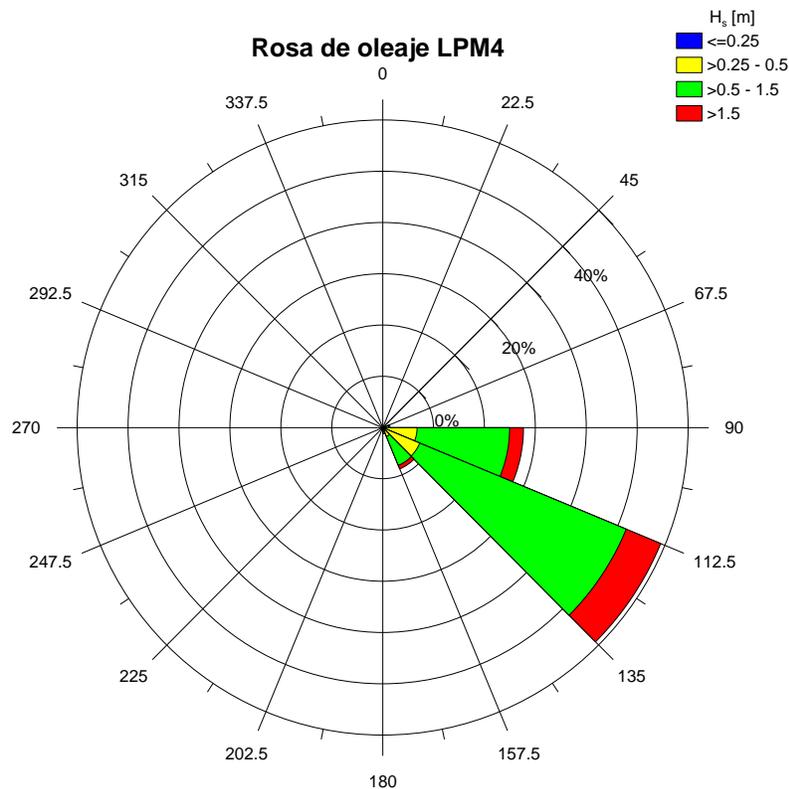
		Periodo pico Tp [s]															Total	Promedio
Hs\Tp		<2.0	2.0-3.0	3.0-4.0	4.0-5.0	5.0-6.0	6.0-7.0	7.0-8.0	8.0-9.0	9.0-10.0	10.0-11.0	11.0-12.0	12.0-13.0	13.0-14.0	14.0-15.0	>15.0		
Altura significativa Hs [m]	<1.0	0	0	1	3000	3805	2215	1453	536	155	50	5	2	2	0	0	11224	49.98441
	1.0-2.0	0	0	0	801	2387	3879	2517	353	63	18	11	13	5	2	2	10051	44.76063
	2.0-3.0	0	0	0	97	15	124	494	259	13	5	5	3	1	1	0	1017	4.529058
	3.0-4.0	0	0	0	30	1	0	10	15	6	7	4	2	4	1	0	80	0.356268
	4.0-5.0	0	0	0	4	1	1	0	1	0	4	1	3	3	1	0	19	0.084614
	5.0-6.0	0	0	0	5	1	0	1	3	1	2	5	2	3	1	0	24	0.10688
	6.0-7.0	0	0	0	1	0	0	0	0	3	1	0	4	2	1	0	12	0.05344
	7.0-8.0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	1	1	3	0	0	0	8	0.035627
	8.0-9.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	6	0	0	0	7	0.031173
	9.0-10.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	1	0	0	5	0.022267
	10.0-11.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	0	0	4	0.017813
	11.0-12.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	0	0	0	3	0.01336
	12.0-13.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0.004453
	13.0-14.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	>14.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Total</b>	0	0	1	3938	6210	6219	4475	1169	242	89	36	46	21	7	2	22455	100	
<b>Promedio</b>	0	0	0.004	17.54	27.66	27.7	19.93	5.206	1.078	0.396	0.16	0.205	0.094	0.031	0.009	100		

Tabla 15. Probabilidad conjunta de Hs y dirección para LPM3.

		Dirección de propagacion															Total	Promedio	
HS/MDir		<22.5	22.5-45.0	45.0-67.5	67.5-90.0	90.0-112.5	112.5-135.0	135.0-157.5	157.5-180.0	180.0-202.5	202.5-225.0	225.0-247.5	247.5-270.0	270.0-292.5	292.5-315.0	315.0-337.5			337.5-360.0
Altura significativa Hs [m]	<1.0	144	424	1521	3101	3645	1551	401	121	53	28	33	29	22	31	39	81	11224	49.9844133
	1.0-2.0	25	58	422	2882	4813	1579	166	30	16	6	9	6	11	5	12	11	10051	44.7606324
	2.0-3.0	9	6	14	229	564	151	16	8	2	1	3	2	4	2	2	4	1017	4.52905812
	3.0-4.0	0	0	1	7	43	13	5	5	1	1	2	0	1	1	0	0	80	0.35626809
	4.0-5.0	1	0	0	2	11	2	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	19	0.08461367
	5.0-6.0	0	0	0	2	10	4	1	4	1	1	0	0	0	0	0	1	24	0.10688043
	6.0-7.0	0	0	0	0	6	3	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	12	0.05344021
	7.0-8.0	0	0	0	0	3	2	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	0.03562681
	8.0-9.0	0	0	0	0	3	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	0.03117346
	9.0-10.0	0	0	0	0	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0.02226676
	10.0-11.0	0	0	0	0	3	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0.0178134
	11.0-12.0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0.01336005
	12.0-13.0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.00445335
	13.0-14.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	>14.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Total</b>	179	488	1958	6223	9107	3313	593	170	75	37	47	38	38	39	53	97	22455	100	
<b>Promedio</b>	0.797	2.173	8.72	27.71	40.56	14.75	2.641	0.757	0.334	0.165	0.209	0.169	0.169	0.174	0.236	0.431975	100		

## Regimen Medio LPM4

Los registros comprenden el periodo de julio de 2005 a octubre de 2006 consecutivos y en total suman 20 meses. A igual que en LPM3 la rosa de la Fig. 53 nos indica una dirección de propagación entre el sector este y este-sur-este con una frecuencia del 41% y olas de 0.5 m a 1.5 m.



*Fig. 53. Rosa de oleaje LPM4.*

La rosas mensuales de este LPM muestran que en todos los meses la dirección este-sur-este con olas de 1 a 2 m es dominante, excepto en el mes de junio que abarca desde el este al este -sur-este, Fig. 54.

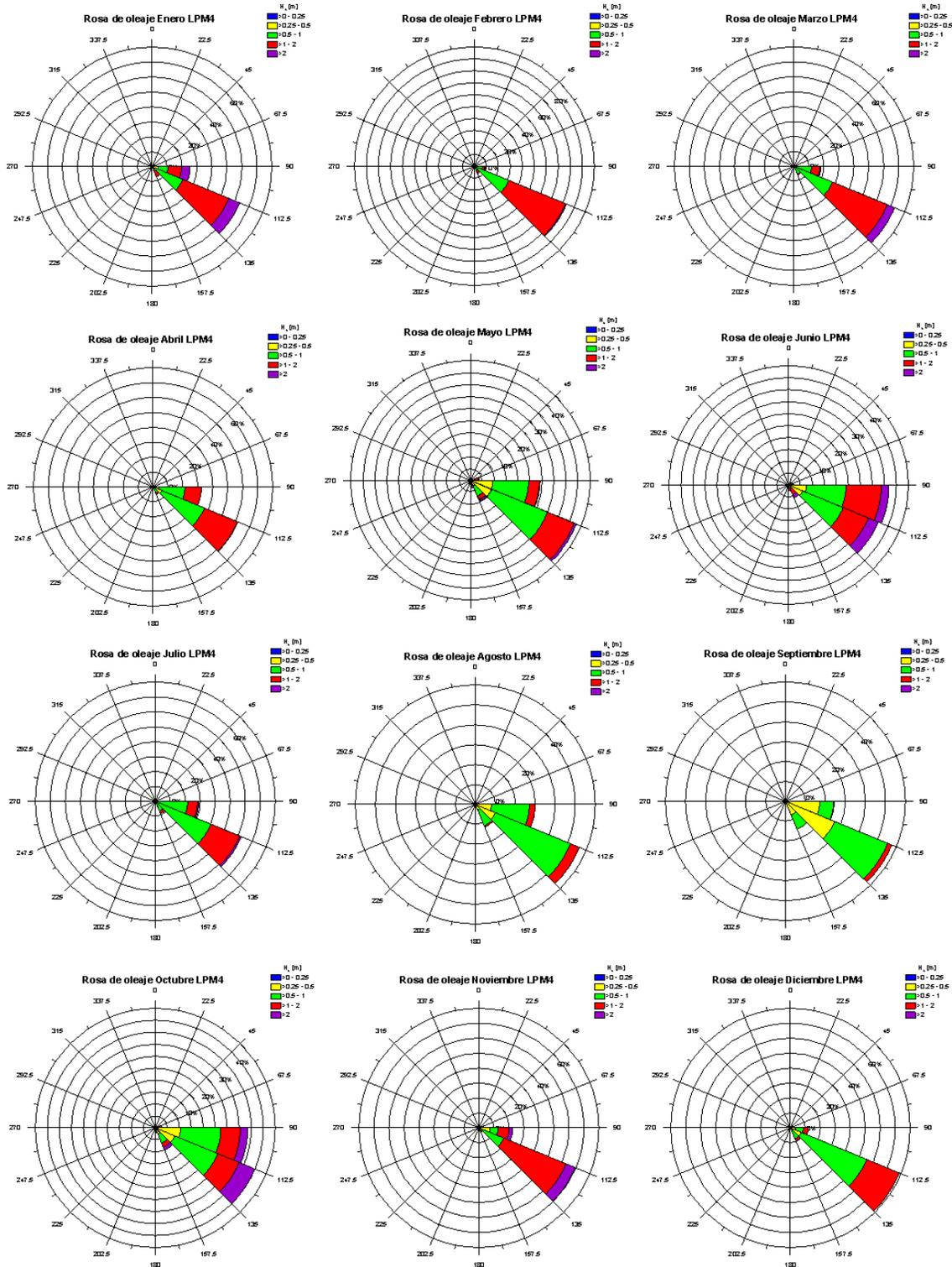


Fig. 54. Rosas de oleaje mensual de LPM4

La Tabla 16 y Tabla 17 de probabilidad conjunta muestran que las olas de 0.5 m a 1 m tienen periodos de entre 5 y 6 s predominantemente mientras que la dirección del oleaje con esta misma altura de ola se concentra en los 112.5° y 135° de dirección.

Tabla 16. Probabilidad conjunta de Hs y Tp para LPM4.

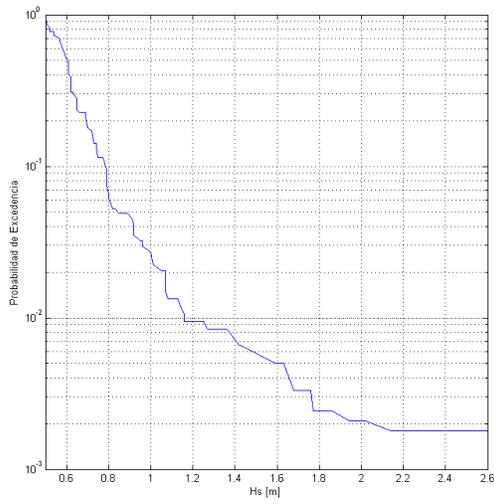
Hs/Tp	Periodo pico Tp [s]																Total	Promedio
	<2.0	2.0-3.0	3.0-4.0	4.0-5.0	5.0-6.0	6.0-7.0	7.0-8.0	8.0-9.0	9.0-10.0	10.0-11.0	11.0-12.0	12.0-13.0	13.0-14.0	14.0-15.0	>15.0			
<0.5	0	1	54	219	223	328	301	55	26	10	2	0	0	0	0	1219	17.486731	
0.5-1.0	0	4	80	245	1030	869	696	329	71	20	5	3	3	1	0	3356	48.142304	
1.0-1.5	0	0	55	13	182	636	453	126	42	4	3	0	3	0	0	1517	21.761584	
1.5-2.0	0	0	96	0	11	81	219	92	16	0	0	0	2	1	0	518	7.4307847	
2.0-2.5	0	0	80	0	0	5	87	71	10	3	0	0	0	0	0	256	3.6723569	
2.5-3.0	0	0	21	0	0	1	11	17	1	2	1	3	2	0	1	60	0.8607087	
3.0-3.5	0	0	7	0	0	0	1	0	4	6	2	7	4	2	1	34	0.4877349	
3.5-4.0	0	0	1	0	0	0	0	0	2	0	1	4	1	0	0	9	0.1291063	
4.0-4.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	2	0.0286903	
>4.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
<b>Total</b>	0	7E-04	0.057	0.068	0.207	0.275	0.254	0.099	0.025	0.006	0.002	0.003	0.002	6E-04	3E-04	6971	100	
<b>Promedio</b>	0	0.072	5.652	6.843	20.74	27.54	25.36	9.898	2.467	0.646	0.201	0.258	0.23	0.057	0.029	100		

Tabla 17. Probabilidad conjunta de Hs y dirección para LPM4.

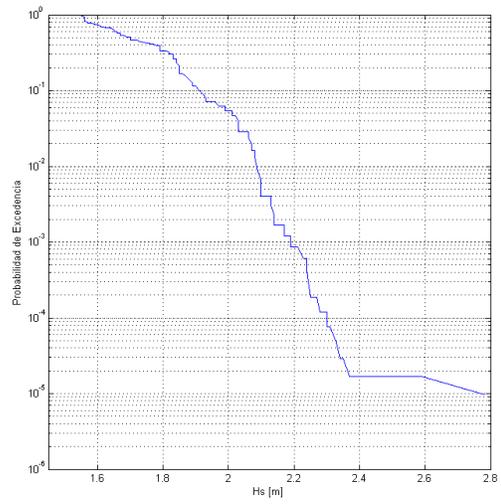
HS/MDir	Dirección de propagación																Total	Promedio
	<22.5	22.5-45.0	45.0-67.5	67.5-90.0	90.0-112.5	112.5-135.0	135.0-157.5	157.5-180.0	180.0-202.5	202.5-225.0	225.0-247.5	247.5-270.0	270.0-292.5	292.5-315.0	315.0-337.5	337.5-360.0		
<0.5	0	2	2	39	470	547	130	16	8	3	2	0	0	0	0	1219	17.4867307	
0.5-1.0	1	1	5	30	924	2001	345	36	5	4	0	1	1	0	2	3356	48.1423038	
1.0-1.5	0	2	2	12	342	1059	80	7	1	5	1	0	1	2	1	1517	21.7615837	
1.5-2.0	4	4	5	9	105	331	26	5	5	4	4	3	5	3	1	4	518	7.43078468
2.0-2.5	3	2	1	6	66	126	14	13	9	4	2	2	2	3	2	1	256	3.67235691
2.5-3.0	1	0	0	1	17	24	4	4	0	2	1	2	3	0	1	0	60	0.86070865
3.0-3.5	1	0	0	1	2	22	5	1	1	0	0	1	0	0	0	0	34	0.4877349
3.5-4.0	0	0	0	0	0	6	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	9	0.1291063
4.0-4.5	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0.02869029
>4.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Total</b>	0.143	0.002	0.002	0.014	0.276	0.591	0.087	0.012	0.004	0.003	0.001	0.001	0.002	0.001	7E-04	0.001	6971	100
<b>Promedio</b>	0.143	0.158	0.215	1.406	27.63	59.07	8.693	1.191	0.416	0.316	0.143	0.115	0.172	0.129	0.072	0.129	100	

## Régimen extremal

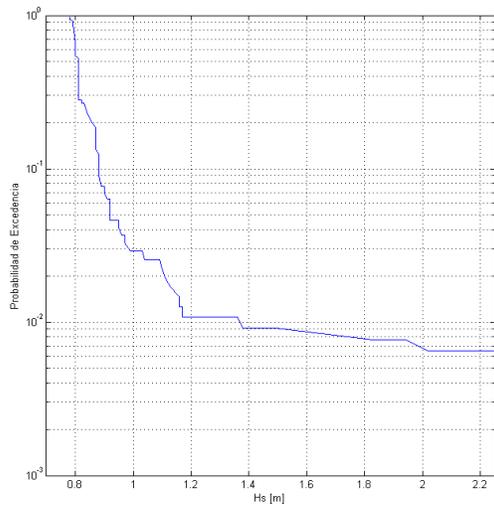
Para obtener el oleaje extremo se analizó estadísticamente la serie de datos, por cada LPM, con la función de distribución de Gumbel para máximos de Silva (2005); como resultado se obtuvieron las siguientes graficas:



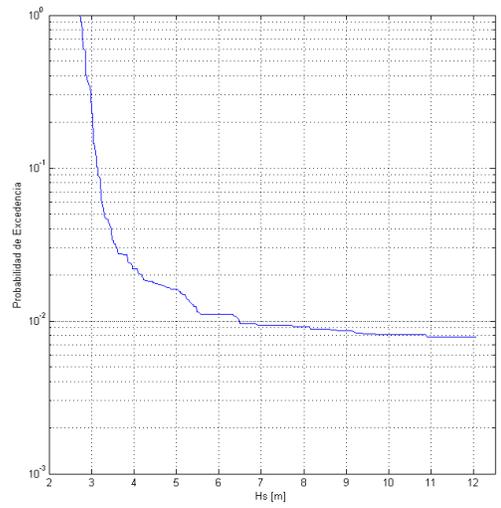
Gráfica 7 Probabilidad de excedencia para LPM0.



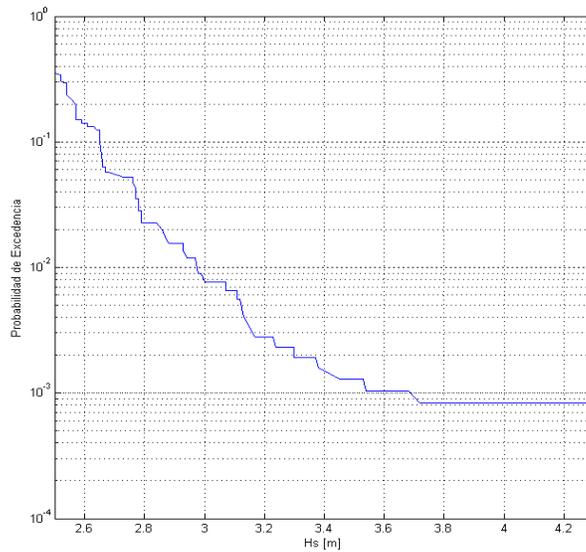
Gráfica 9. Probabilidad de excedencia para LPM2.



Gráfica 8. Probabilidad de excedencia para LPM1.



Gráfica 10. Probabilidad de excedencia para LPM3.



Gráfica 11. Probabilidad de excedencia para LPM4.

### Calulo de la potencia

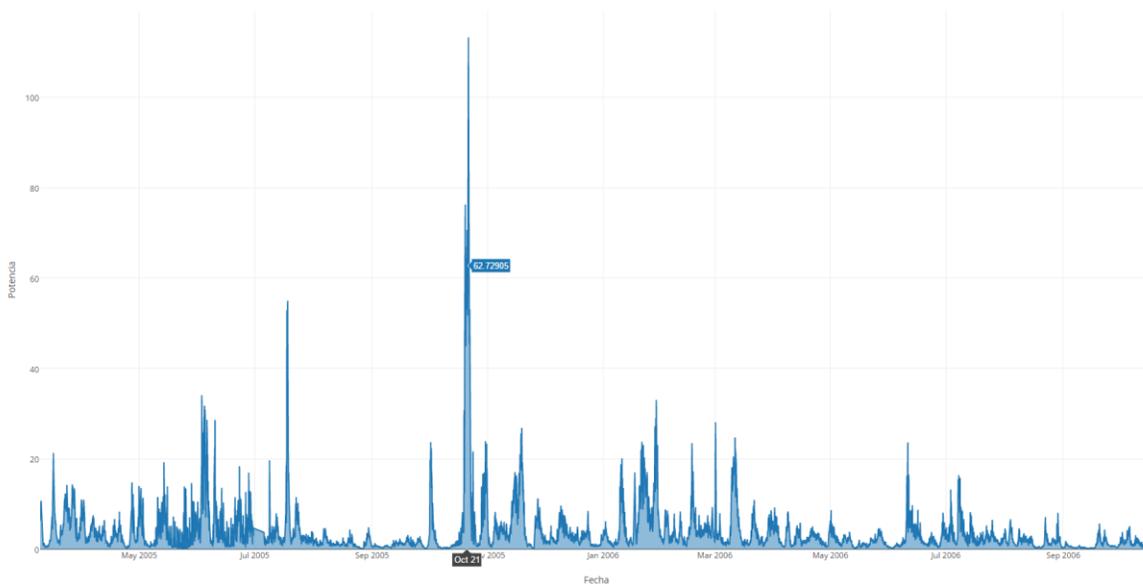
Para el cálculo de la potencia se utilizó la ecuación de Pierson-Mokoswitz (kw/m) para ondas en aguas profundas, en el caso del LPM3.

$$P = 0.458H_s^2T_p$$

Ya que la media de la longitud de onda, calculo por iteración variando  $T_p$  entre 4 y 8 s , es de 19.31 m y dado que la profundidad en cada LPM es de 3.5, 6, 8, y 20 m, se consideran ondas en aguas someras si  $d < \frac{L}{2}$  y en aguas profundas si  $d > \frac{L}{2}$  por esta razón para LPM0, LPM1, LPM2 y LPM4 utilizan la ecuación para aguas someras.

$$P = 0.955H_s^2T_p$$

La siguiente grafica muestra la potencia calculada para toda la serie elemento a elemento de LPM3, el pico más alto que se observa en la grafica de potencia es del huracan Wilma.



*Fig. 55. Distribución temporal de la potencia por metro de frente de ola en kw/m para toda la serie de LPM3.*

Para evitar sobreestimar el cálculo de la potencia, es necesario definir qué fenómenos se pueden considerar como una tormenta. Una forma de definir estadísticamente una tormenta es cuando el oleaje supera el umbral de 1.5 veces la altura de ola significativa media anual por un periodo mayor a doce horas continuas. Bajo este criterio, quedan incluidos dentro de la categoría de tormenta tanto las tormentas tropicales, los huracanes, así como los frentes fríos que periódicamente inciden en la zona.

La altura umbral fue calcula por mes, por año y por toda la serie de datos, la Fig. 56 y Fig. 57 muestran la altura umbral de toda la serie para LPM1 y LPM3 como ejemplo y la Tabla 18 muestra los valores de potencia, altura umbral, media de  $H_s$  y  $T_p$  para cada LPM a modo de resumen.

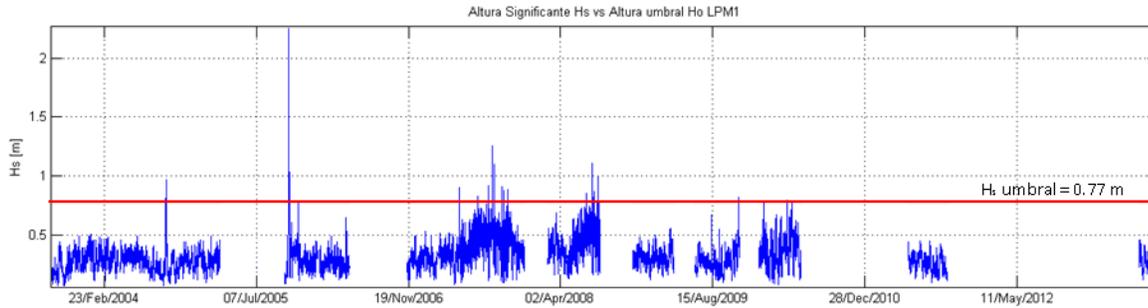


Fig. 56. Altura significativa de LPM1 con un altura umbral de 0.77 m.

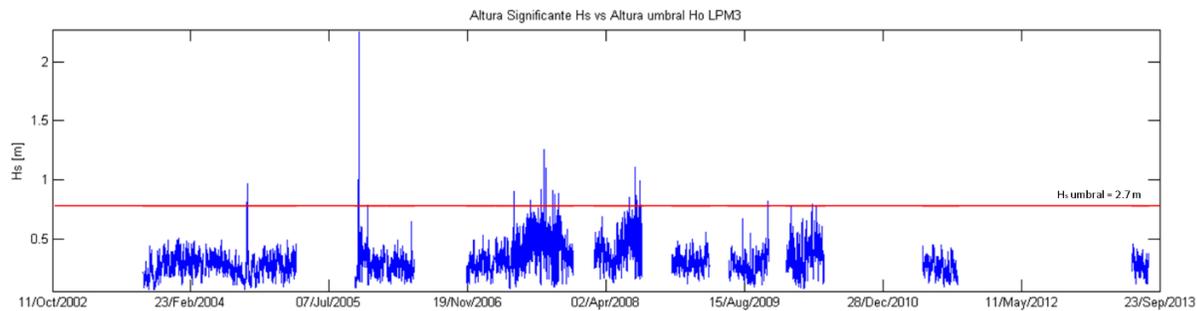


Fig. 57. Altura significativa de LPM3 con una altura umbral de 2.7 m.

La potencia fue calculada por mes, por año y por toda la serie de cada instrumento, la siguiente tabla muestra la potencia calculada por instrumento, no se incluyen todas las potencias calculadas.

Tabla 18. Potencia total por LPM.

LPM	MediaHs [m]	MediaTp [s]	Hs Umbral [m]	Potencia sin Tormentas [kw/m]
0	0.1943328	4.664072	0.485832	<b>0.168213495</b>
1	0.3081275	4.943367	0.77031875	<b>0.448215784</b>
2	0.6147181	6.427092	1.53679525	<b>2.319369223</b>
3	1.082853	6.244758	2.7071325	<b>3.127071</b>
4	0.9370383	6.520318	2.34259575	<b>2.366381</b>

La potencia mensual por cada LPM se encuentra en la tabla Tabla 19, sin considerar tormentas.

Tabla 19. Potencia mensual en kw/m para LPM0.

Mes	LPM0			LPM1			LPM2			LPM3			LPM4		
	Media Hs [m]	Media Tp [s]	Potencia [kw/m]	Media Hs [m]	Media Tp [s]	Potencia [kw/m]	Media Hs [m]	Media Tp [s]	Potencia [kw/m]	Media Hs [m]	Media Tp [s]	Potencia [kw/m]	Media Hs [m]	Media Tp [s]	Potencia [kw/m]
Enero	0.2183288	4.521196	<b>0.20581582</b>	0.3001037	4.993817	<b>0.42951536</b>	0.7919399	7.303989	<b>4.37469652</b>	1.316957	6.704483	<b>5.3256688</b>	1.245187	7.711203	<b>5.47591591</b>
Febrero	0.2176042	4.153244	<b>0.18781288</b>	0.2920304	5.05762	<b>0.41191319</b>	0.6708631	6.77317	<b>2.91114044</b>	1.109756	6.455036	<b>3.640987</b>	1.075	7.22128	<b>3.822052</b>
Marzo	0.2239142	4.039557	<b>0.19341956</b>	0.3261251	4.25879	<b>0.43257164</b>	0.6789488	6.555013	<b>2.88569867</b>	1.211964	6.52424	<b>4.408052</b>	1.136719	6.717547	<b>3.97541462</b>
Abril	0.189337	4.19263	<b>0.14355602</b>	0.2948073	3.958594	<b>0.32856462</b>	0.633943	6.559442	<b>2.51750701</b>	1.098091	6.221738	<b>3.436007</b>	0.9083171	6.59	<b>2.49015209</b>
Mayo	0.1714588	4.659059	<b>0.13080404</b>	0.3340451	3.624728	<b>0.38626824</b>	0.6033089	5.932099	<b>2.06201218</b>	1.040042	5.943432	<b>2.94445</b>	0.8408653	5.504213	<b>1.78243447</b>
Junio	0.1724167	4.848736	<b>0.13765455</b>	0.3471855	4.494396	<b>0.51736598</b>	0.6225023	6.586949	<b>2.43764014</b>	1.166428	6.074137	<b>3.785</b>	1.103099	6.010141	<b>3.34949336</b>
Julio	0.1595896	5.141231	<b>0.12504884</b>	0.3355342	5.172271	<b>0.55610683</b>	0.5508459	6.421787	<b>1.8608849</b>	0.9597546	6.005374	<b>2.53353</b>	0.9337042	7.157335	<b>2.85782379</b>
Agosto	0.1449534	4.186898	<b>0.08401417</b>	0.2817366	5.548877	<b>0.42062493</b>	0.4876721	6.351896	<b>1.44265528</b>	0.8167905	5.967667	<b>1.82344</b>	0.6665457	6.576653	<b>1.33822848</b>
Septiembre	0.1499779	4.890985	<b>0.10506407</b>	0.253365	5.30616	<b>0.32529468</b>	0.4181501	5.459128	<b>0.91577217</b>	0.6617053	5.783673	<b>1.159841</b>	0.523644	5.887761	<b>0.73941442</b>
Octubre	0.1584424	4.974413	<b>0.11925814</b>	0.2913732	5.587432	<b>0.45301734</b>	0.5456608	6.066322	<b>1.72494138</b>	0.9266806	5.923862	<b>2.329864</b>	0.799893	6.067754	<b>1.77810431</b>
Noviembre	0.2422661	5.03079	<b>0.28198425</b>	0.3068005	5.917306	<b>0.53191168</b>	0.8348473	6.958389	<b>4.631548</b>	1.212129	6.459798	<b>4.346923</b>	1.1785	6.998583	<b>4.45179102</b>
Diciembre	0.1977943	5.384039	<b>0.20115884</b>	0.2813513	5.758924	<b>0.433535403</b>	0.6580622	6.609642	<b>2.73347558</b>	1.184135	6.576054	<b>4.223115</b>	0.8620161	6.919973	<b>2.35505271</b>