



UNIVERSIDAD NACIONAL  
*de* MAR DEL PLATA  
.....

# **Estudio de factibilidad sobre el aprovechamiento de Energía Undimotriz en Mar del Plata**

**Sofía Díaz Vélez**

Universidad Nacional de Mar del Plata

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Industrial

Mar del Plata, Argentina

7 de Octubre de 2015

# **Estudio de factibilidad sobre el aprovechamiento de Energía Undimotriz en Mar del Plata**

**Sofía Díaz Vélez**

Trabajo final presentado como requisito para obtener el título de:  
**Ingeniero Industrial**

Director:

Lic. Juan Pablo Grammatico

Codirector:

Ing. Daniel Laville

Universidad Nacional de Mar del Plata

Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Industrial

Mar del Plata, Argentina

7 de Octubre de 2015



## Resumen

El presente trabajo final tiene por objeto evaluar la factibilidad técnica de aprovechar la Energía Undimotriz en la ciudad de Mar del Plata. La actual matriz energética Argentina depende en un 87% del consumo de combustibles fósiles para abastecer su demanda. La quema de combustibles fósiles representa la principal causa de calentamiento global, problemática que afecta a todos. Por esta razón, resulta imprescindible comenzar a investigar nuevas alternativas de energías renovables.

La Energía Undimotriz, es un tipo de energía marina, renovable, que consiste en el aprovechamiento de la energía cinética y potencial del oleaje para la producción de electricidad. Es un tipo de energía marina, renovable y predecible, con numerosas ventajas comparativas frente a otras energías renovables.

La ciudad de Mar del Plata no posee un registro de datos certeros sobre varios parámetros del mar, entre ellos la altura y el período medios. Por este motivo, se evaluó el potencial energético undimotriz a partir de datos simulados de la página Windguru. De este análisis resultó que el potencial energético undimotriz es de aproximadamente  $34,5 \frac{\text{KW}}{\text{m}}$  (kilowatt por metro de frente de onda).

En la actualidad, los convertidores de energía undimotriz son una tecnología incipiente, con una gran cantidad de proyectos en desarrollo y enorme variedad entre ellos. Los dispositivos de aprovechamiento aun no son competitivos con los métodos de generación tradicionales. Por las razones mencionadas, no se cuenta con información acerca de los costos de instalación y funcionamiento y, por lo tanto, en el presente trabajo no ha sido posible realizar un análisis económico.

A partir de una matriz de selección, se estableció que en la actualidad, la tecnología más apta para ubicar en el puerto de Mar del Plata es el convertidor Wave Star.

## **Palabras Claves**

ENERGÍA UNDIMOTRIZ, MAR DEL PLATA, CONVERTIDORES DE ENERGIA UNDIMOTRIZ, POTENCIAL ENEGETICO MARPLATENSE.

# Contenido

Resumen .....	III
Palabras Claves .....	IV
Contenido .....	V
Índice de Tablas .....	VI
Índice de figuras .....	VII
Tabla de unidades .....	IX
Glosario.....	IX
<b>I. Introducción .....</b>	<b>1</b>
1.1. Objetivo general y específicos.....	1
<b>II. Marco Teórico.....</b>	<b>1</b>
2.1. Necesidad de Invertir en energías renovables.....	1
2.1.1. .... ¿Por qué invertir en el desarrollo de la Energía Undimotriz?	7
2.2. Conceptos básicos sobre el oleaje .....	8
2.3. Principios de la Energía Undimotriz.....	13
2.4. Clasificación de las tecnologías de conversión de energía undimotriz.....	17
2.5. Características de la costa Marplatense.....	20
2.6. Teoría del proceso de toma de decisiones .....	23
<b>III. Desarrollo .....</b>	<b>24</b>
3.1. Selección de un punto estratégico de la costa Marplatense .....	24
3.2. Etapa 1: Identificar un problema.....	30
3.3. Etapa 2: Identificar criterios de selección. ....	31
3.4. Etapa 3: Asignar peso a los criterios de selección.....	32
3.5. Etapa 4: Desarrollo de alternativas.....	33
3.5.1. ....Voith hydro Wavegen: Columna de agua oscilante	33
3.5.2. ....Wave Dragon	35
3.5.3. ....Pelamis	36
3.5.4. ....OPT: Power buoy Mark 3 (OWC)	38
3.5.5. ....Wave Star	39
3.5.6. ....Aquamarine Power: Oyster	40
3.5.7. ....Wello Oy: The Pinguin	42
3.5.8. ....AWS Ocean Energy	43
3.5.9. ....Carnegie Wave Energy: CETO	44

3.5.10.	WERPO.....	44
3.5.11.	Argentina presente: UTN-FRBA.....	45
3.6.	Etapa 5: Análisis de alternativas.....	46
3.6.1.	..... Estado de desarrollo de la tecnología	48
3.6.2.	..... Simplicidad de instalación	48
3.6.3.	..... Simplicidad de mantenimiento	49
3.6.4.	..... Supervivencia	51
3.6.5.	..... Impacto ambiental	52
3.7.	Etapa 6: Selección de dispositivos .....	53
<b>IV.</b>	<b>Conclusión.....</b>	<b>55</b>
<b>V.</b>	<b>Recomendaciones.....</b>	<b>57</b>
<b>VI.</b>	<b>Bibliografía .....</b>	<b>57</b>
<b>VII.</b>	<b>Anexo I: Datos de altura de ondas.....</b>	<b>60</b>
<b>VIII.</b>	<b>Anexo II: Datos de periodo de ondas.....</b>	<b>61</b>

## Índice de Tablas

Tabla 1. Fuente: Balance Energético Nacional 2013. Secretaría de Energía de la Nación. .....	5
Tabla 2. Oferta de Energía primaria agrupada. Fuente: elaboración propia.....	5
Tabla 3. Cuadro comparativo de la potencia por unidad de superficie de las energías renovables más utilizadas con respecto a la undimotriz. Fuente: (Grupo de investigación Energía Undimotriz UTN, 2011).....	8
Tabla 4. Ventajas y desventajas de los tipos de instalaciones en función de la distancia a la costa. Fuente: elaboración propia.....	18
Tabla 5. Resumen de parámetros. Fuente: Elaboración propia. Datos: <a href="http://www.windguru.cz">http://www.windguru.cz</a> .....	23
Tabla 6. Resumen de ventajas y desventajas de zonas de la ciudad de Mar del Plata. Fuente: elaboración propia. ....	29
Tabla 7. Resumen de tecnologías 1. Fuente: elaboración propia .....	47
Tabla 8. Resumen de tecnologías 2. Fuente elaboración propia. ....	47
Tabla 9. Estado actual de la tecnología. Fuente: elaboración propia .....	48
Tabla 10. Consideraciones para calificar la simplicidad de la instalación. Fuente: elaboración propia.....	48
Tabla 11. Simplicidad de la instalación. Fuente: elaboración propia .....	49

Tabla 12. Acceso al mantenimiento. Fuente: elaboración propia.....	50
Tabla 13. Complejidad del mantenimiento. Fuente: elaboración propia.....	50
Tabla 14. Simplicidad del mantenimiento. Fuente elaboración propia. ....	51
Tabla 15. Consideración para calificar la supervivencia. Fuente: elaboración propia.....	51
Tabla 16. Supervivencia. Fuente: elaboración propia. ....	52
Tabla 17. Impacto ambiental. Fuente: elaboración propia. ....	53
Tabla 18. Matriz de Selección de convertidor de la Energía Undimotriz. Fuente: Elaboración propia. ....	54
Tabla 19. Posición de cada uno de los dispositivos. Fuente: elaboración propia. ....	54
Tabla 20. Datos de altura máxima, mínima y promedio por mes. Datos: windguru.....	61
Tabla 21. Datos de altura de onda 1.....	61
Tabla 22. Datos de altura de onda 2.....	60
Tabla 23. Resumen de valores de altura de onda en la ciudad de Mar del Plata. Fuente: elaboración propia.....	60
Tabla 24. Datos de período máximo, mínimo y promedio por mes. Datos: windguru.....	61
Tabla 25. Resumen de valores de periodo de onda en la ciudad de Mar del Plata. Fuente: elaboración propia. ....	61

## Índice de figuras

Figura 1. Fuente: WEC Survey of World Resources Energy 2013.....	1
Figura 2. Fuente: WEC Survey of World Resources Energy 2020.....	4
Figura 3. Oferta de energía primaria Argentina 2013, BEN. Fuente: Elaboración propia. .	5
Figura 4. Parámetros básicos de una onda. (González, 2014) .....	10
Figura 5. Espectro de energía de un océano. Fuente: Técnicas de pronóstico de oleaje para las costas de Costa Rica, 2003. ....	11
Figura 6. Movimiento de las moléculas de agua. Fuente: Técnicas de pronóstico de oleaje para las costas de Costa Rica, 2003. ....	12
Figura 7. Energía de la ola. Fuente: Técnicas de pronóstico de oleaje para las costas de Costa Rica, 2003.....	15
Figura 8. Formas de aprovechar la energía de las ondas. Fuente: (Haim, 2011).....	16
Figura 9. Potencial energético mundial. Fuente: <a href="http://www.mecanica.frba.utn.edu.ar/energiaundimotriz">http://www.mecanica.frba.utn.edu.ar/energiaundimotriz</a> .....	20
Figura 10. Altura máxima, mínima y promedio en el periodo de tiempo analizado. Fuente: elaboración propia. Datos: <a href="http://www.windguru.cz">http://www.windguru.cz</a> .....	21

Figura 11. Periodo máximo, mínimo y promedio en el lapso de tiempo analizado. Fuente: elaboración propia. Datos: <a href="http://www.windguru.cz">http://www.windguru.cz</a> .....	22
Figura 12. Escollera emisario submarino. Fuente: <a href="https://www.google.com.ar/maps/">https://www.google.com.ar/maps/</a> .....	26
Figura 13. Estación de Observaciones Costeras. Fuente: <a href="https://www.google.com.ar/maps/">https://www.google.com.ar/maps/</a> .....	27
Figura 14. Escollera sur, Puerto de Mar del Plata. Fuente: <a href="https://www.google.com.ar/maps/">https://www.google.com.ar/maps/</a> .....	28
Figura 15. Carta Náutica. Fuente: Servicio de Hidrografía Naval, 2014. ....	30
Figura 16. Ponderación de los criterios de selección. Fuente elaboración propia. ....	32
Figura 17. Principio de funcionamiento OWC. Fuente: Weveplan.eu.....	34
Figura 18. Principio de funcionamiento del sistema Wave Dragon. Fuente: Wave Dragon .....	35
Figura 19. Diagrama del principio de funcionamiento Pelamis. Fuente: <a href="http://ecomedioambiente.com">ecomedioambiente.com</a> .....	37
Figura 20. Power Bouy Mark 3. Fuente: Ocean Power Technology .....	39
Figura 21. Wave Star. Fuente: <a href="http://wavestarenergy.com/">http://wavestarenergy.com/</a> .....	40
Figura 22. Diagrama Oyster. Fuente: Aquamarine Power .....	41
Figura 23. Diagrama de corte The Pinguin. Fuente: Wello Oy .....	42
Figura 24. AWS-III. Fuente: <a href="http://awsocan.com">awsocan.com</a> .....	43
Figura 25. CETO Carnegie Energy. Fuente: <a href="http://carnegiewave.com/">http://carnegiewave.com/</a> .....	44
Figura 26. Prototipo de planta WERPO. Fuente: <a href="http://werpo.us/">http://werpo.us/</a> .....	45
Figura 27. Dispositivo undimotriz UTN BA-FRBA. Fuente: <a href="http://www.mecanica.frba.utn.edu.ar/energiaundimotriz">http://www.mecanica.frba.utn.edu.ar/energiaundimotriz</a> .....	46
Figura 28. Gráfico de distribución de frecuencia. Fuente: elaboración propia. Datos: Windguru.....	60

## Tabla de unidades

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
$\lambda$	Longitud de onda	m	$L = \frac{v}{f} = v \cdot T$
C	Celeridad: Velocidad de propagación de la onda	$\frac{m}{s}$	$C = \frac{gT}{2\pi}$
H	Altura de onda	m	
h	Profundidad	m	
$\rho$	Densidad del agua salada	$\frac{kg}{dm^3}$	$\rho = 1,025$
T	Periodo	S	
Et	Energía total	$\frac{Kj}{m^2}$	$E_t = \frac{\rho g H^2}{8}$
Fe	Flujo de energía	$\left[ \frac{Kw}{m} \right]$	$F = \frac{\rho g H^2}{8} C_g = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi}$
P	Potencia por metro de frente de onda	$\left[ \frac{Kw}{m} \right]$	$P = 0,98 H^2 T$

## Glosario

**Altura de onda (H):** es la diferencia entre el pico y el valle de una onda.

**Bagazo:** Es el residuo de materia una vez extraído su jugo. Se utiliza comúnmente el residuo de la caña de azúcar para generar energía.

**Energía Undimotriz u Olamotriz:** es un tipo de energía marina, renovable, que consiste en el aprovechamiento de la energía cinética y potencial del oleaje para la producción de electricidad.

**Generador Eléctrico:** es un dispositivo capaz de mantener una diferencia de potencial entre dos puntos (llamados polos, terminales o bornes) transformando la energía mecánica en electricidad.

**Longitud de onda (L):** es la distancia entre dos picos o dos valles consecutivos.

**Onda:** Se denomina onda a todo tipo de oscilación en una superficie de agua. Las ondas en los océanos son originadas diversas causas. Entre estas causas se pueden señalar: el viento, las fuerzas de atracción gravitacional que ejercen la Luna y el Sol sobre las masas oceánicas, los maremotos, las tormentas, etc. Sin embargo, de todas estas causas, el viento constituye el agente que genera las ondas más comunes y de mayor densidad energética.

**Ola:** Se denomina ola a la ruptura de la onda. Cuando la altura de la onda iguala a la profundidad por la cual viaja se produce el quiebre o "ruptura".

**Periodo (T):** es el tiempo en segundos que tarda un valle o un pico de la onda en recorrer su longitud de onda.

**Recurso energético:** Sustancia sólida, líquida o gaseosa de la cual es posible extraer energía a través de diferentes procesos.

**Recursos renovables:** Recursos de los cuales se puede extraer energía en forma ilimitada.

# I. Introducción

La energía undimotriz es la energía proveniente de las ondas marinas. Las ondas del mar se originan por diversas causas pero de todas ellas, el viento es el agente que genera las ondas más comunes y de mayor densidad energética. Este tipo de energía marina, es limpia, renovable, predecible y, además, se encuentra disponible.

En el presente trabajo se describirán los principios fundamentales de la energía undimotriz y se evaluará la factibilidad técnica de aprovechar dicha energía en la ciudad de Mar del Plata. Para ello, en primer lugar, se seleccionará un punto de la costa marplatense y se evaluará el recurso disponible.

Posteriormente se analizará la tecnología disponible en el mercado. Se describirán los convertidores de energía undimotriz de mayor difusión a nivel mundial y se seleccionarán los más apropiados, desde el punto de vista técnico, para el punto de la costa seleccionado anteriormente.

Se recurrirá al proceso de toma de decisiones para seleccionar las tecnologías más aptas para la ciudad de Mar del Plata. Debido a que se trata de una tecnología incipiente y a que no se conocen los costos de instalación y operación, la selección carecerá de análisis económico. Finalmente se extraerán conclusiones y recomendaciones.

## 1.1. Objetivo general y específicos

- ❖ **Objetivo general**
  - Evaluar la factibilidad técnica de aprovechar la energía undimotriz en la ciudad de Mar del Plata.

- ❖ **Objetivos específicos**

- Informar la importancia de invertir en energías renovables y particularmente en energía undimotriz.
- Seleccionar un punto de la costa marplatense que favorezca el aprovechamiento de energía undimotriz.
- Conocer los distintos dispositivos de aprovechamiento de energía undimotriz disponibles en el mercado.
- Seleccionar, a partir del proceso de toma de decisiones, uno o varios dispositivos de aprovechamiento de energía undimotriz que podrían utilizarse en el punto de la costa marplatense seleccionado.

## II. Marco Teórico

### 2.1. Necesidad de Invertir en energías renovables

Durante miles de años, la generación de energía se centró en el consumo de recursos no renovables. Estas energías, llamadas “tradicionales”, generan grandes impactos ambientales entre los cuales se destaca el calentamiento global, ocasionado por la quema de combustibles fósiles, y los desechos radioactivos, provenientes de la energía nuclear.

Tomando como referencia datos del Consejo Mundial de la Energía o *World Energy Council* para 2011 la oferta mundial de energía primaria estaba representada por la siguiente matriz energética:

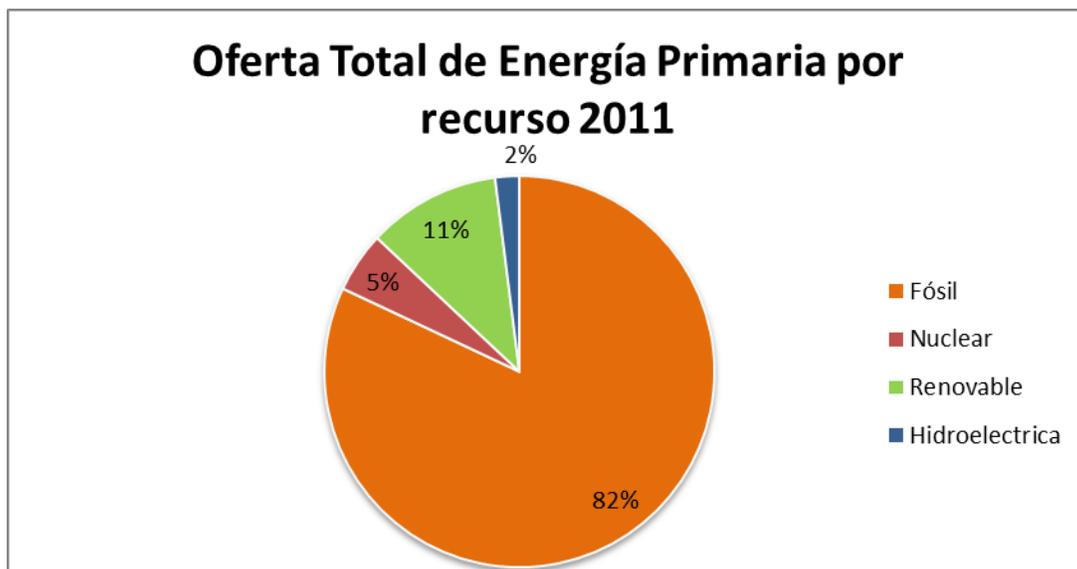


Figura 1. Fuente: WEC Survey of World Resources Energy 2013

Como se observa en la Figura 1. Fuente: WEC Survey of World Resources Energy 2013 la fuente principal de energía proviene de combustibles fósiles (gas natural, carbón y

petróleo), en segundo lugar de energías renovables, en tercer lugar de energía nuclear y por último de centrales hidroeléctricas.

Las externalidades de la generación de energía a partir de combustibles fósiles no solo se observan sobre la población asentada en las zonas aledañas de explotación, sino que, además, su efecto es el principal enemigo del planeta: el calentamiento global.

El calentamiento global es causado por gases de efecto invernadero: vapor de agua, dióxido de carbono, metano, óxido de nitrógeno, ozono y clorofluorocarbonos. La emisión de estos gases, provocada en un 90 por ciento por la acción humana, impide que los rayos infrarrojos refractados salgan de la atmósfera, aumentando la temperatura del globo (Kliksberg, 2011).

La quema de combustibles fósiles para la obtención de energía eléctrica, es la principal fuente de emisión de dióxido de carbono. El calentamiento global tiene aparejado una cantidad infinita de consecuencias, tales como: aumento de la temperatura en las zonas más áridas, incendios forestales, desaparición de glaciares, aumento del nivel del mar, incremento del volumen de lluvias, mayor cantidad de mosquitos transmisores de enfermedades, desastres “naturales”, etc.

Una alternativa diferente, pero no menos nociva para el medio ambiente, es la energía nuclear. A lo largo de la historia, varios científicos definieron y estudiaron los átomos, la estructura de la materia, los electrones, protones, neutrones, la radioactividad natural y artificial. Sin embargo, no fue hasta después de desarrollar la bomba atómica, durante la segunda guerra mundial en el denominado “proyecto Manhattan”, que se pensó en obtener energía a partir de átomos. La energía atómica nace como justificación de las millonarias inversiones en bombas nucleares.

La generación de energía a partir de centrales atómicas representa una alternativa poco recomendable para reemplazar a los combustibles fósiles. Esto se debe a que genera residuos nucleares peligrosos para la salud y el medio ambiente, y a que los accidentes nucleares catastróficos como los de Fukushima o Chernobil pueden producirse en algún lugar del mundo una vez cada 10 o 20 años (Instituto Max Planck, 2012).

Las energías renovables ocupan el segundo lugar, como es posible observar en la Figura 1. Fuente: WEC Survey of World Resources Energy 2013. Sin embargo, debe destacarse que, dentro de esta categoría se engloban diferentes tipos de energía:

1. Energía Solar
2. Energía Eólica
3. Energía Geotérmica
4. Biomasa
5. Energías marinas
  - a. Energía de las corrientes: obtenida de las corrientes oceánicas.
  - b. Energía osmótica: es la energía producida por los gradientes de salinidad.
  - c. Energía térmica oceánica: es la energía producida por las diferencias de temperatura a diferentes profundidades.
  - d. Energía mareomotriz: es la energía de las masas de agua en movimiento. La generación de energía mareomotriz se compone de tres formas principales, a saber: la energía mareomotriz, la energía de barrera de mareas y la energía de las mareas dinámicas.
  - e. Energía de las ondas.

Los diferentes tipos de energías mencionadas anteriormente se engloban dentro del título de “energías renovables” y la sumatoria de todas ellas ocupa un aparente segundo lugar. Además, si comparamos los datos presentados en la Figura 1. Fuente: WEC Survey of World Resources Energy 2013 con datos de la misma fuente del año 1993, las energías renovables representaban un 10 por ciento de la matriz primaria mundial. Esto quiere decir que las energías renovables solo aumentaron un 1% en 18 años. Las proyecciones realizadas por el *World Energy Council* indican que para el 2020 las energías renovables van a representar el 16% de la generación de energía mundial, ganando terreno sobre las energías fósiles (Figura 2. Fuente: WEC Survey of World Resources Energy 2020).



Figura 2. Fuente: WEC Survey of World Resources Energy 2020

La situación en Argentina no se aleja de las tendencias globales. Según el balance energético nacional del año 2013, la oferta interna total de energía primaria asciende a 81.114 miles de toneladas equivalente de petróleo, mientras que no se observan datos relevantes de energías renovables. Se observa a continuación en la Tabla 1. Fuente: Balance Energético Nacional 2013. Secretaría de Energía de la Nación. de qué tipo de energía proviene la oferta:

Oferta interna de energía primaria en el año 2013 [miles de Tep <sup>1</sup> ]	
Energía Hidráulica	3.583
Nuclear	1.850
Gas Natural	42.777
Petróleo	26.699
Carbón Mineral	1.254
Leña	797
Bagazo <sup>2</sup>	851
Biodiesel	2.260
Otros Primarios	1.044
Total	81.114

<sup>1</sup> Tep: tonelada equivalente de petróleo

<sup>2</sup> Bagazo: Es el residuo de materia una vez extraído su jugo. Se utiliza comúnmente el residuo de la caña de azúcar para generar energía.

Tabla 1. Fuente: Balance Energético Nacional 2013. Secretaría de Energía de la Nación.

Resulta conveniente agrupar los datos presentados en la tabla 2 de la siguiente manera:

Oferta de energía primaria 2013 [miles de Tep]		
Energía Hidráulica	Energía Hidráulica	3.583
Nuclear	Nuclear	1.850
Gas Natural	Combustible Fósil	70.730
Petróleo		
Carbón Mineral		
Leña	Energía Renovable	3.908
Bagazo		
Biodiesel		
Otros Primarios	Otros Primarios	1.044

Tabla 2. Oferta de Energía primaria agrupada. Fuente: elaboración propia.

Con el fin de brindar una mejor visualización de los datos presentados anteriormente se los representa gráficamente en la Figura 3. Oferta de energía primaria Argentina 2013, BEN. Fuente: Elaboración propia.:



Figura 3. Oferta de energía primaria Argentina 2013, BEN. Fuente: Elaboración propia.

El 87% de la matriz energética Argentina está formada combustibles fósiles (petróleo, gas natural y carbón). La quema de combustibles fósiles genera grandes cantidades de dióxido de carbónico (CO<sub>2</sub>), dicho gas tiene incidencia en el efecto invernadero. La Argentina emite aproximadamente unas 200 millones de tCO<sub>2</sub>e (tonelada de dióxido de

carbono equivalente) por año a la atmósfera provenientes de la quema de combustibles fósiles (Argentina debe modificar su matriz energética, Ex Secretarios de Energía, 2014).

La estrategia energética nacional actual hace foco en el yacimiento de combustibles fósiles no convencionales de Vaca Muerta. Se espera que la formación de hidrocarburos no convencionales sea la solución soberana al problema de abastecimiento energético de Argentina. Se planifica el futuro del sistema energético en base al consumo de combustibles fósiles no renovables, lo cual no concuerda con el concepto de desarrollo sustentable (Argentina debe modificar su matriz energética, Ex Secretarios de Energía, 2014).

Para comprender la gravedad de la situación actual global resulta imprescindible introducir algunos conceptos desarrollados por el economista mexicano Enrique Leff en su libro Racionalidad Ambiental (2004). Leff explica [que] “Los límites de crecimiento económico los establece la ley límite de la entropía, que gobierna los fenómenos de la naturaleza y que conduce el proceso irreversible e ineluctable de degradación de la materia y la energía en el universo”. Este fenómeno natural no se puede evitar, y se ve agravado por los daños que el hombre ha ocasionado en su entorno. Se debe aceptar que la contaminación actual no va a poder repararse y, como dice Leff, la mayor aspiración que se puede tener es retardar el colapso del sistema a través de programas de conservación. (Leff, 2004)

Por otra parte, el mundo actual ha cambiado drásticamente en los últimos 20 años. La tecnología se ha convertido en uno de los principales motores de desarrollo económico y social. Todos los aspectos de la vida humana se han visto afectados por la tecnología de la información (TI) e Internet. Todas las tecnologías funcionan con electricidad y por lo tanto su demanda aumenta constantemente. Según la Agencia Internacional de la Energía (IEA), desde 1970 hasta el 2010 la población mundial se duplicó, mientras que la demanda de energía creció 2,3 veces.

De esta manera, es necesario crear nuevas fuentes de energía para cumplir con la creciente demanda del mundo que nos rodea, y es imprescindible que dichas energías sean renovables, limpias y amigables con el medio ambiente. Invertir en el desarrollo de energías renovables se ha convertido en la única opción disponible para acompañar un desarrollo económico, tecnológico y social sustentable.

### 2.1.1. ¿Por qué invertir en el desarrollo de la Energía Undimotriz?

En un mundo con una demanda energética que aumenta exponencialmente año a año, y donde los recursos energéticos tradicionales se están agotando, es necesario encontrar nuevas alternativas de abastecimiento de energía limpia y renovable.

El agua es un extraordinario vector energético por su capacidad de acumulación y transporte de energía durante largas distancias con pérdida mínimas de energía y, considerando que el 71% del planeta está compuesto de agua, los mares se transforman en una de las mayores fuentes de potencial energético del planeta. Además, la energía de las ondas presenta una mayor facilidad para predecir la eficiencia del recurso debido a su estabilidad a lo largo del tiempo (Grupo de investigación Energía Undimotriz UTN, 2011).

Es posible clasificar a las energías marinas en 5 grandes grupos: gradiente térmico, gradiente salino, corrientes, mareas y undimotriz. Los dos primeros sistemas (gradiente térmico y marino) se encuentran actualmente en una etapa de investigación. En cuanto a los mecanismos de corrientes, mareas y undimotrices, ya existen proyectos que superaron la etapa puramente teórica.

De las energías marinas probablemente la más conocida sea la energía mareomotriz, la cual está vinculada al aprovechamiento de la amplitud en los niveles de las mareas. El principio de funcionamiento de la energía mareomotriz es equivalente al de las centrales hidráulicas. Consiste en el almacenamiento de agua aprovechando los desniveles de las mareas, la cual, posteriormente, se hace pasar por turbinas hidráulicas situadas entre el embalse y el mar para utilizar la energía cinética y de presión del fluido.

Sin embargo, el impacto ambiental que produce ha generado un total rechazo a su implementación (Pelissero, Haim, Oliveto, Galia, & Tula, Aprovechamiento de la Energía Undimotriz, 2011). Este tipo de energía solo puede ser aprovechada mediante obras de enorme magnitud que impactan fuertemente sobre la flora y la fauna, principalmente por la modificación del lecho marino como consecuencia de la barrera, y sobre el paisaje, debido a que provoca un cambio irreversible. Su implementación sólo se justifica cuando están agotadas todas las fuentes hidroeléctricas fluviales de un país.

En el caso de las corrientes de mareas, sólo han demostrado utilidad a pequeña escala, como por ejemplo para iluminación de boyas y balizas. En tanto, la diferencia de

temperaturas entre la superficie y la profundidad, sólo es aplicable en mares tropicales (Tedesco, 2009).

La energía undimotriz supera en densidad energética a la energía eólica y solar, se calcula que su potencia oscila entre 40 a 100 kW por cada metro de frente de onda, además de mantenerse constante durante largos periodos de tiempo (Legaz, 2011). La energía posible de ser aprovechada es superior a las otras alternativas renovables de mayor difusión, como se muestra en la Tabla 3. Cuadro comparativo de la potencia por unidad de superficie de las energías renovables más utilizadas con respecto a la undimotriz. Fuente: (Grupo de investigación Energía Undimotriz UTN, 2011)

Fuente energética	Potencia por cada unidad de superficie $\left[\frac{W}{m^2}\right]$
Biomasa	0,6
Solar	200
Eólica	400 a 600
Undimotriz	2.000 a 3.000

**Tabla 3. Cuadro comparativo de la potencia por unidad de superficie de las energías renovables más utilizadas con respecto a la undimotriz. Fuente: (Grupo de investigación Energía Undimotriz UTN, 2011)**

Como se observa en la Tabla 3. Cuadro comparativo de la potencia por unidad de superficie de las energías renovables más utilizadas con respecto a la undimotriz. Fuente: (Grupo de investigación Energía Undimotriz UTN, 2011) la energía undimotriz resulta 5 veces más concentrada que la energía eólica y 30 veces más concentrada de la energía solar. La energía undimotriz resulta más conveniente que la energía eólica debido a que la densidad del agua es muy superior al aire (835 veces mayor) lo cual posibilita obtener la misma energía con equipos menores. Además, si bien la energía de las ondas es variable, es relativamente constante en comparación con la energía eólica (Fernandez Chozas, 2015).

## 2.2. Conceptos básicos sobre el oleaje

Se denomina onda a todo tipo de oscilación en la superficie de agua que sea periódica. Las ondas se originan en el océano por diversas causas entre las cuales se puede mencionar: el viento, las fuerzas de atracción gravitacional que ejercen la luna y el sol sobre las masas oceánicas, las variaciones de la presión atmosférica, el movimiento de

placas tectónicas y la rotación de la tierra. Sin embargo, de todas ellas, el viento es el agente que genera las ondas más comunes y de mayor densidad energética. Resulta importante destacar que, como en todo movimiento ondulatorio, la onda transporta energía pero no masa.

Cuando el aire ejerce presión sobre la superficie del mar, este se pone en contacto con el agua. La fuerza que se genera entre el aire y el agua modifica la superficie del océano, dando lugar a pequeños rizos, conocidos como **olas de capilaridad**. Las olas de capilaridad aumentan la superficie de contacto, la cual incrementa la fricción entre agua y viento. Esto provoca el crecimiento de la onda que, cuando ha alcanzado un cierto tamaño, facilita que el viento pueda ejercer una mayor presión sobre ella con el consiguiente incremento de esta (Lizano R., 2003).

Para describir el fenómeno del oleaje se han desarrollado diversas teorías, pero en la práctica es comúnmente utilizada la teoría descrita por Airy en 1845, también conocida como teoría de ondas de pequeña amplitud, *Stokes* de primer orden o simplemente teoría lineal.

La propagación del oleaje en un fluido es un proceso no lineal, Airy simplificó su análisis físico y matemático, con el fin de estudiar dicha propagación como un proceso lineal, tomando las siguientes consideraciones:

1. La onda es regular y bidimensional. (No evoluciona en el tiempo ni en el espacio)
2. El fluido es incompresible y los efectos de la viscosidad, tensión superficial y turbulencia son despreciables.
3. El fondo es profundo y de profundidad constante.
4. La amplitud de onda es pequeña con relación a la longitud de onda y al fondo

Esta teoría tiene como finalidad describir las propiedades para un ciclo de onda y son invariables a lo largo de éste, posee tres parámetros principales:

1. El período ( $T$ ), definido como el tiempo en segundos que transcurre entre el paso sucesivo de dos crestas de onda por un punto estacionario, es decir, el tiempo que tarda una cresta o un valle en recorrer su longitud de onda ( $\lambda$ ).

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

2. Altura de onda ( $H$ ), distancia vertical entre la cresta y el valle de la onda.
3. Profundidad ( $h$ ), distancia vertical entre el nivel de agua significativa y el fondo.

Además, es necesario definir otros parámetros, no menos importantes tales como:

- ❖ La longitud de onda ( $\lambda$ ), distancia horizontal entre dos crestas o valles sucesivos de la onda. Para profundidades indefinidas la longitud de onda se define como  $\lambda = \frac{gT^2}{2\pi}$
- ❖ Amplitud:  $a = \frac{h}{2}$
- ❖ La celeridad o velocidad de fase (C), la cual representa la velocidad de propagación de la forma de onda y puede calcularse  $C = \frac{\lambda}{T} = \frac{gT}{2\pi}$
- ❖ Frecuencia angular ( $\omega$ ), el tiempo que tarda una partícula de agua en cumplir un ciclo.
- ❖ Velocidad horizontal y vertical de la partícula de agua.
- ❖ Aceleración horizontal y vertical de la partícula de agua. (González, 2014)

Los parámetros anteriores y otros complementarios pueden ser determinados teóricamente a través de sus formulaciones. En la figura se muestra un esquema de los parámetros básicos de una onda.

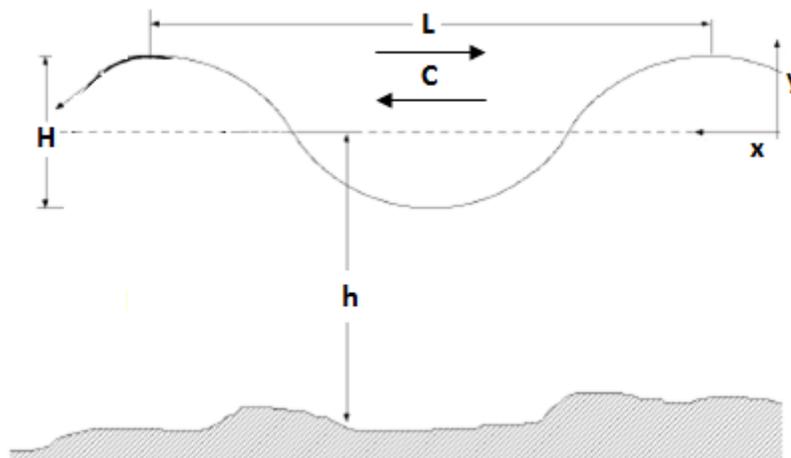
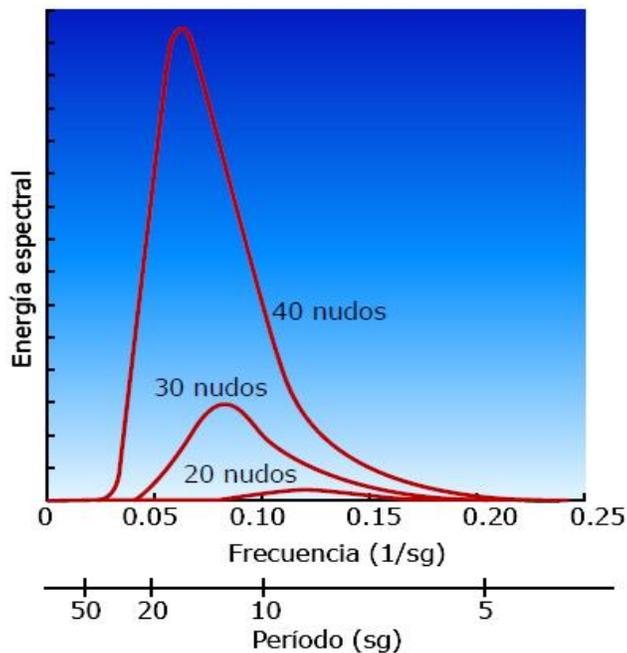


Figura 4. Parámetros básicos de una onda. (González, 2014)

El tamaño de las ondas generadas por el viento depende de tres factores:

- ❖ La velocidad del viento,
- ❖ El tiempo durante el cual el viento este ejerciendo presión sobre la superficie,

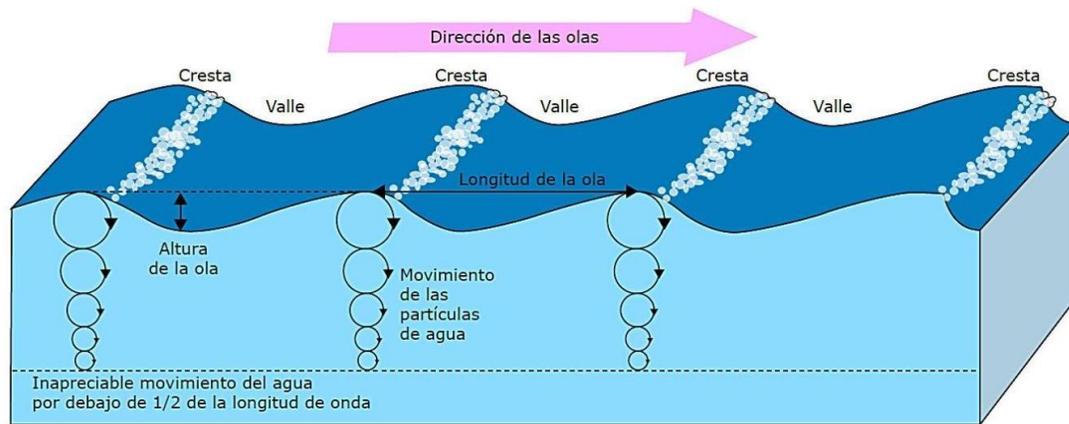
- ❖ La distancia o alcance sobre la cual la energía del viento se transfiere al océano para formar las ondas.



**Figura 5. Espectro de energía de un océano. Fuente: Técnicas de pronóstico de oleaje para las costas de Costa Rica, 2003.**

Como se observa en la figura 5 cuanto mayor es la velocidad del viento, mayor es la altura de la onda, más baja es su frecuencia y más alto es su período. La dirección con la que las ondas viajan viene fijada por la dirección del viento que las generó. Por tanto, en una zona dada pueden llegar ondas procedentes de distintos lugares y con diferentes direcciones. Como es de esperar, las ondas resultantes son complejas.

Por otra parte, resulta interesante destacar que las ondas de los océanos están constituidas por moléculas de agua que se mueven formando círculos. En el océano, en zonas profundas, las partículas de agua describen un movimiento circular, mientras que, en aguas costeras describen un movimiento elipsoidal. El comportamiento de las ondas depende en gran medida de la relación que existe entre el tamaño de las ondas y la profundidad del agua donde ésta se está moviendo.



**Figura 6. Movimiento de las moléculas de agua. Fuente: Técnicas de pronóstico de oleaje para las costas de Costa Rica, 2003.**

La velocidad de propagación de las ondas  $C$ , está dada por la siguiente ecuación:

$$C^2 = \frac{gT}{2\pi} \tanh(kh) \text{ Ecuación I}$$

Donde  $K = \frac{2\pi}{\lambda}$  es el número de onda y:

- ❖  $h$ : profundidad del agua
- ❖  $\lambda$ : la longitud de onda
- ❖  $g$ : la aceleración de la gravedad
- ❖  $\tanh$ : tangente hiperbólica

Entonces, si " $kh$ " es muy grande, es porque la profundidad ( $h$ ) es grande. Esto se cumple cuando la relación entre la profundidad ( $h$ ) y la longitud de onda ( $\lambda$ ) es mayor que 0.5. De esta manera, la  $\tanh(kh)$  es aproximadamente 1, por lo que:

$$C^2 = \frac{g}{k} \text{ Ecuación II}$$

Donde  $K = \frac{2\pi}{\lambda}$  y  $\lambda = \frac{gT^2}{2\pi}$ , por lo tanto

$$C = \frac{gT}{2\pi} \text{ Ecuación III}$$

En esta  $C = \frac{gT}{2\pi}$  Ecuación III se observa que viajan más rápido aquellas ondas que tienen mayor período.

Si, por el contrario, " $kh$ " es muy pequeña, es porque la profundidad ( $h$ ) es pequeña (aguas someras), entonces:

$$C = \sqrt{gh} \text{ Ecuación IV}$$

De la  $C=\sqrt{gh}$  Ecuación IV es posible observar que la velocidad de las ondas depende de la profundidad (h) por la cual viajan. A mayor profundidad mayor velocidad y, por lo tanto, mayor energía cinética.

### 2.3. Principios de la Energía Undimotriz

La Energía Undimotriz u Olamotriz es un tipo de energía marina, renovable, que consiste en el aprovechamiento de la energía cinética y potencial del oleaje para la producción de electricidad.

La energía undimotriz es una forma de almacenar la energía solar ya que es un derivado terciario de esta. Esto se debe a que el calentamiento de la superficie terrestre genera el viento, y el viento genera las ondas (Fernandez Chozas, 2015). Sin embargo, la ventaja de este tipo de energía frente a otros tipos de energía renovable radica en la propiedad que poseen las ondas para desplazarse grandes distancias con bajos niveles de pérdida de energía (EOI Escuela de negocios).

El océano se compone de la superposición de muchas ondas senoidales puras, cuya superficie puede ser reconstruida como suma de ondas de amplitud variable, llamada análisis espectral. Conforme se acercan a la costa, las ondas cambian gradualmente su velocidad de propagación y su dirección. Este comportamiento se lo conoce como Refracción de ondas.

Cada onda viaja con características propias, es decir, su propia velocidad, periodo, altura de onda y dirección. Sin embargo, la envolvente de todas estas ondas viaja con una velocidad distinta a las ondas individuales y se denomina velocidad de grupo  $C_g$ . Esta velocidad puede calcularse de diferentes maneras según la profundidad de las aguas por la cual este viajando la onda. Es decir, una serie de ondas viaja con distintas velocidades de grupos desde su punto de generación, en aguas profundas, hasta llegar la costa, donde atraviesa aguas poco profundas o someras.

Es posible dividir al océano en tres zonas:

1. **Aguas profundas:** En aguas profundas, la velocidad de grupo es menor que la velocidad de fase de cada una de las componentes que la forman. La velocidad de grupo puede ser aproximada como  $C_g = \frac{c}{2}$

2. **Aguas Intermedias**  $C = \frac{\lambda}{T}$

3. **Aguas poco profundas o someras:** En agua somera la velocidad de grupo se iguala a la velocidad de fase, es decir,  $C_g=C$

La celeridad de la onda, al igual que los demás parámetros, pueden ser obtenidos en las tres zonas del océano con mayor o menor simplificación.

Para profundidades indefinidas  $C_g = \frac{C}{2} = \frac{gT}{4\pi}$

La potencia de las ondas depende del cuadrado de la altura de la onda y del periodo o frecuencia de movimiento. Cuanto mayor es la velocidad del viento, mayor será la altura de la onda y, por lo tanto, se obtendrán valores más elevados de energía y potencia de onda. A continuación se presentan las expresiones de la energía total, el flujo de energía y la potencia por metro de frente de onda

$$\text{Energía total } \left[ \frac{\text{KJ}}{\text{m}^2} \right] = \frac{\rho g H^2}{8} \text{ Ecuación V}$$

$$\text{Flujo de energía } \left[ \frac{\text{Kw}}{\text{m}} \right] = \frac{\rho g H^2}{8} C_g = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi} \text{ Ecuación VI}$$

Siendo:

- ❖  $\rho$  la densidad del agua salada, cuyo valor se aproxima a  $\rho=1.025 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ,
- ❖  $g$  la aceleración de la gravedad  $g=9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
- ❖  $H$  la altura significativa de la onda en metros. La altura significativa se define como la altura promedio de la tercera parte de las ondas más altas en un registro.
- ❖  $T$  es el periodo del pico de la onda en segundos

Reemplazando en la **Flujo de energía**  $\left[ \frac{\text{Kw}}{\text{m}} \right] = \frac{\rho g H^2}{8} C_g = \frac{\rho g^2 H^2 T}{32\pi}$  **Ecuación VI** resulta:

$$\text{Potencia } \left[ \frac{\text{Kw}}{\text{m}} \right] = 0,98 H^2 T \text{ Ecuación VII}$$

A la hora de diseñar dispositivos convertidores de energía undimotriz, se debe tener en cuenta que, para capturar la totalidad de la energía de una onda, los aparatos deben interceptar completamente los movimientos de las partículas de agua, es decir, deberían capturar la energía de todos los movimientos circulares de la onda, desde la superficie hasta las profundidades. Sin embargo, ya que las orbitas más profundas y pequeñas

contienen poca energía no resulta viable, desde el punto de vista técnico y económico, tratar de captarlas todas.

Con el fin de decidir cuánto debe introducirse, debajo de la superficie del mar, un dispositivo de captación de energía del oleaje, ha de considerarse que el 95% de la energía de una onda se encuentra entre la franja comprendida entre la superficie y una profundidad de un cuarto de la longitud de onda  $L$ , cómo es posible observar en la figura 7 (Lizano R., 2003).

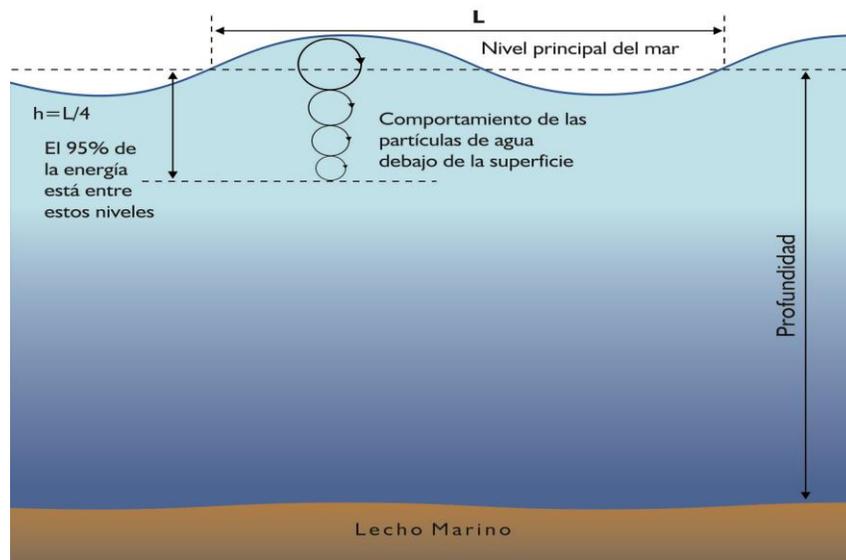


Figura 7. Energía de la onda. Fuente: Técnicas de pronóstico de oleaje para las costas de Costa Rica, 2003.

La energía presente en las ondas marinas puede clasificarse de la siguiente manera:

1. La energía cinética, función de la velocidad de la onda.
2. La energía potencial, función de la altura de la onda.
3. La energía hidráulica, función de la diferencia de presión.

Se representan gráficamente los 3 tipos de energías que contienen las ondas marinas en la Figura 8. Formas de aprovechar la energía de las ondas. Fuente: (Haim, 2011)



Figura 8. Formas de aprovechar la energía de las ondas. Fuente: (Haim, 2011)

En función del tipo de energía que se desee aprovechar se diseñan los dispositivos. Es por este motivo que existen una gran cantidad patentes de dispositivos undimotrices en todo el mundo. Sin embargo, la mayoría de los equipos utilizan la energía potencial de elementos flotantes para transformar su energía mecánica en energía eléctrica mediante compresión de:

1. Un fluido hidráulico: el cual se envía a una turbina acoplada a un generador eléctrico.
2. El aire: en este caso, la entrada o salida de la onda aumenta o disminuye el volumen de aire en una cámara, este aire atraviesa una turbina acoplada a un generador eléctrico.

También es posible aprovechar la diferencia de presión que existe entre la cresta y el valle de la onda, interponiendo una turbina de flujo axial.

Las plantas de transformación de energía undimotriz a eléctrica están constituidas, generalmente, por una cierta cantidad de dispositivo. En su mayoría, los equipos modulares generan energía eléctrica en alterna, en el mismo equipo se transforma a corriente continua y, finalmente, se conecta la energía de todos los dispositivos para ser enviada mediante un único cable submarino a una estación transformadora de corriente continua a alterna.

## 2.4. Clasificación de las tecnologías de conversión de energía undimotriz

Existen diferentes formas de clasificar a los convertidores de la energía de las ondas. A continuación, se presentan las principales clasificaciones:

1. Clasificación de los convertidores en función de la posición de emplazamiento respecto a la costa (Chozas, 2008):
  - 1) **Instalaciones sobre la costa (dispositivos de primera generación):** se construyen sobre rocas emplazadas o escolleras, donde la relación entre la profundidad ( $h$ ) y la longitud de onda ( $\lambda$ ) va desde 0 a  $\frac{1}{20}$ .
  - 2) **Instalaciones en aguas poco profundas (dispositivos de segunda generación):** están situadas en aguas donde la relación entre la profundidad ( $h$ ) y la longitud de onda ( $\lambda$ ) varía entre  $\frac{1}{20}$  y  $\frac{1}{2}$ .
  - 3) **Instalaciones en aguas profundas (dispositivos de tercera generación):** se ubican en aguas donde la relación entre la profundidad ( $h$ ) y la longitud de onda ( $\lambda$ ) es mayor a 0,5.

Se resume a continuación las ventajas y desventajas de cada tipo de instalación.

	Ventajas	Desventajas
Instalaciones sobre la costa	<p>Instalación simple,</p> <p>Fácil acceso para realizar mantenimiento,</p> <p>No requieren de sistemas de amarre,</p> <p>No utilizan cableado submarino.</p>	<p>Reciben constantemente el impacto de la onda, lo cual afecta su supervivencia.</p> <p>La instalación de estos dispositivos, generalmente, se realiza en forma individual.</p> <p>No es aplicable en todos los tipos de costas.</p> <p>Si no se dispone de una construcción rocosa de buen emplazamiento, debe realizarse dicho proyecto, lo cual</p>

		aumenta significativamente los costos de instalación.
Instalaciones en aguas poco profundas	Ofrecen mejores potenciales del oleaje que las instalaciones sobre la costa. Deben trasladar la energía una distancia menor que las instalaciones en aguas profundas por lo que requieren menos metros de cableado submarino que las aguas profundas.	Su instalación y mantenimiento es más complejo que en las instalaciones emplazadas sobre la costa. Impacto visual debido a que los dispositivos son visibles desde la costa y modifican el paisaje natural.
Instalaciones en aguas profundas	Ofrecen los mejores potenciales de energía debido a que, a medida que aumenta la distancia a la costa y consecuentemente la profundidad, la densidad energética aumenta.	La supervivencia del equipo corre peligro, Su instalación y mantenimiento son más complejos, Se incrementan los costos de operación debido a la utilización de varios metros de cableado submarino, e incremento de pérdidas de energía por transmisión.

**Tabla 4. Ventajas y desventajas de los tipos de instalaciones en función de la distancia a la costa.**  
Fuente: elaboración propia.

2. Clasificación de los convertidores de energía undimotriz en función del modo de obtención de la energía (Chozas, 2008):
  - 1) Sistemas pasivos o estáticos: La estructura permanece inmóvil durante todo el proceso de conversión. La energía se genera a partir del movimiento de las partículas de agua.
  - 2) Sistemas activos u oscilantes: La energía se genera a partir del movimiento relativo entre las partes fijas y móviles del sistema. Dentro de esta clasificación pueden diferenciarse dos tipos:
    - ❖ El oleaje actúa directamente sobre el cuerpo móvil.
    - ❖ El movimiento se genera a partir de una interfaz aire-agua, de modo que la onda desplaza al aire, y el aire desplaza al cuerpo

móvil. Este sistema es dinámicamente más lento pero no por ello tiene menor rendimiento.

3. Clasificación de convertidores de energía undimotriz de acuerdo con el sistema de captura de energía (Iglesias, G., Alvarez, M. and García, P., 2011):
  - 1) Dispositivos que generan electricidad por medio de turbinas acopladas a un generador. Esta categoría abarca la mayoría de los dispositivos disponibles en el mercado actualmente y puede realizarse una subdivisión de acuerdo al fluido que utiliza:
    - ❖ Agua
    - ❖ Aceite
    - ❖ Aire
  - 2) Dispositivos que utilizan la energía de las ondas para mover un mecanismo (ya sea lineal o rotacional) y luego transformar ese movimiento en electricidad sin un fluido intermedio.
4. Clasificación de los convertidores de energía undimotriz en función de la posición relativa respecto al frente de onda (Chozas, 2008):
  - 1) Atenuadores: dispositivos largos colocados en forma perpendicular al frente de onda, es decir, paralelos al avance de la onda. Un ejemplo de este tipo de convertidor es el *Pelamis*. Su principal ventaja se debe a que las fuerzas se compensan a ambos lados de la estructura, por lo que el equipo está expuesto a menores daños y requieren menos esfuerzos de anclaje.
  - 2) Absorbedores puntuales: dispositivos que poseen dimensiones pequeñas respecto a la longitud de onda de la onda incidente. Un ejemplo de este tipo es el *Power Buoy*. Estos dispositivos pueden ser flotantes, semisumergidos o sumergidos. Su principal ventaja se debe a que sus dimensiones reducidas le permita aprovechar la energía de las ondas sin importar su dirección.
  - 3) Totalizadores o terminadores: dispositivos largos cuyo eje se coloca en forma paralela al frente de onda, es decir, perpendicular al avance de la onda. Un ejemplo de este tipo es el *Wave Dragon*. (Drew, Plummer, Sahinkaya, 2009)

## 2.5. Características de la costa Marplatense

El 71% del planeta está compuesto por agua. Argentina cuenta con 5.000km de longitud de costa, lo cual representa que a los 2,8 millones de km<sup>2</sup> de territorio continental se le adicionan 4,8 millones de km<sup>2</sup> de aguas bajo soberanía y jurisdicción nacional. El potencial energético undimotriz que posee Argentina, en comparación con otros países, se encuentra representado en la figura 9. Este mapa mundial fue elaborado por el Instituto de Ingenieros Mecánicos de Gran Bretaña. Los valores se encuentran expresados en potencia por metro de frente de onda [ $\frac{Kw}{m}$ ].

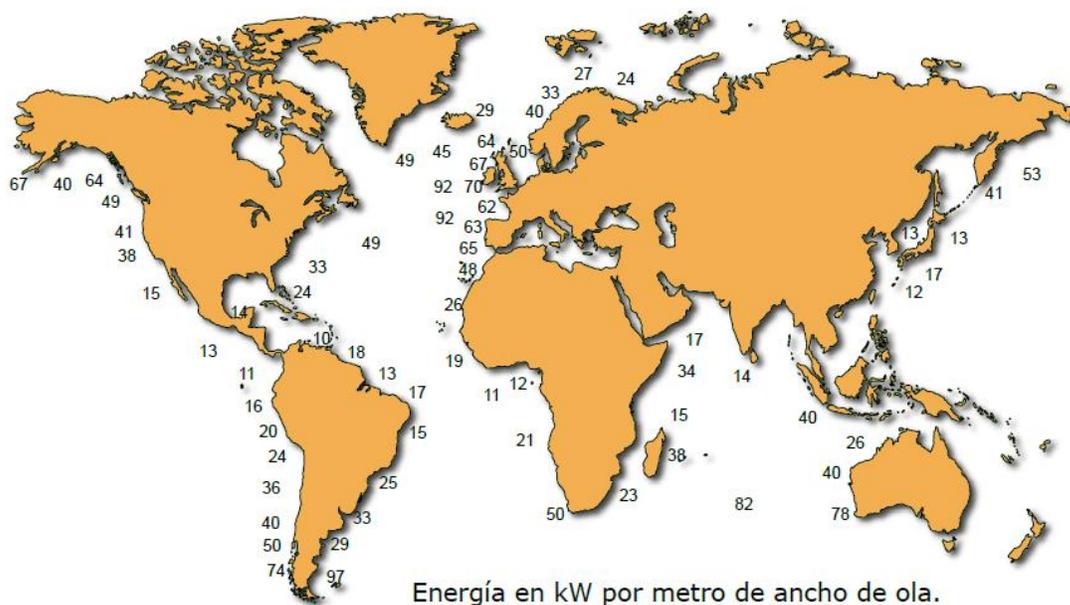


Figura 9. Potencial energético mundial. Fuente: <http://www.mecanica.frba.utn.edu.ar/energiaundimotriz>

Como se observa en la figura anterior, Argentina tiene un potencial que varía desde los 29  $\frac{Kw}{m}$  a los 97  $\frac{Kw}{m}$ . La Patagonia Argentina, cuenta con unos de los mejores recursos energéticos a nivel mundial.

Particularmente la ciudad de Mar del Plata, el objeto de estudio de este trabajo, posee 39.2 km de costa marítima donde la profundidad varía muy lentamente, los suelos son arenosos y arcillosos. Es una ciudad en donde el mar es el gran protagonista, la pesca y el turismo costero son unas de las principales actividades económicas, pero, sin embargo,

no se cuenta con información certera sobre datos del oleaje, tales como altura y periodo de onda.

La ciudad de Mar del Plata no posee datos medidos del oleaje. La Estación de Observaciones Costeras (EOC), dependiente del Instituto de Investigación Marina y Costera (IIMYC), lucha desde hace años por colocar un Oligrafo<sup>3</sup> en la ciudad. Hasta la actualidad no lo han conseguido, y los únicos datos con los que cuentan se registran desde hace dos años mediante observación directa. Estos datos se registran dos veces por día (de lunes a viernes), desde el muelle de los pescadores, Mar del Plata y, dado que no se emplean elementos de medición, los datos dependen de la subjetividad del observador y, por lo tanto, no son confiables (Prario, 2015).

Ante esta situación se debe recurrir a datos pronosticados y abiertos a la comunidad. En las Figura 10. Altura máxima, mínima y promedio en el periodo de tiempo analizado. Fuente: elaboración propia. Datos: <http://www.windguru.cz> Figura 11. Periodo máximo, mínimo y promedio en el lapso de tiempo analizado. Fuente: elaboración propia. Datos: <http://www.windguru.cz> se muestran datos obtenidos de la página Windguru desde el 1° de enero de 2014 hasta el 31 de agosto de 2015. En los gráficos, se analiza la altura y el periodo del oleaje. Para ambas variables, se considera valores máximos, mínimos y promedio.

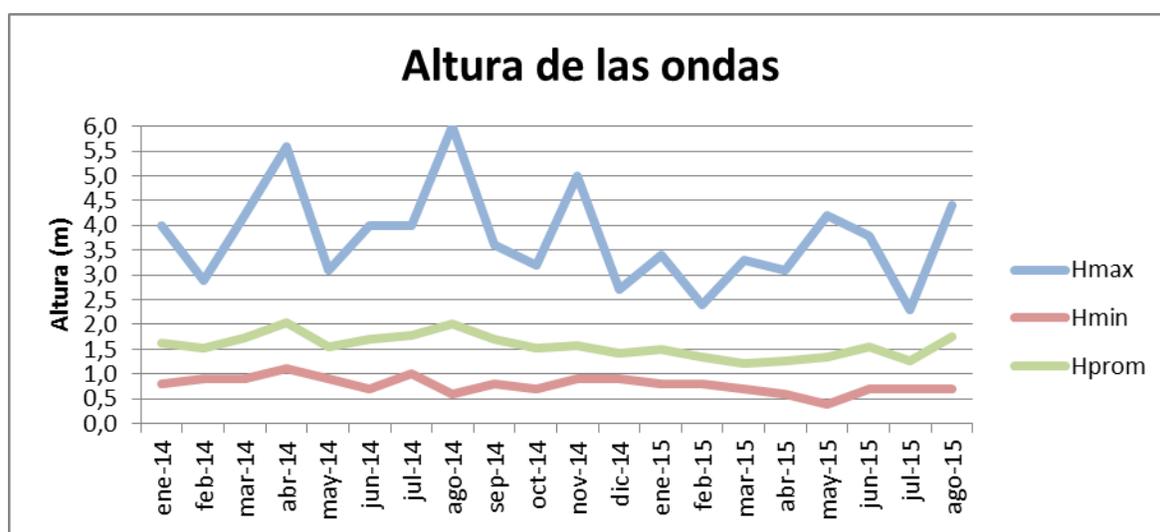


Figura 10. Altura máxima, mínima y promedio en el periodo de tiempo analizado. Fuente: elaboración propia. Datos: <http://www.windguru.cz>

<sup>3</sup> Oligrafo: Instrumento utilizado para medir la altura y periodo del oleaje.

En el Anexo I: Datos de altura de ondas. Se presentan los datos extraídos de la página web Windguru.

Como se observa en la Figura 10. Altura máxima, mínima y promedio en el periodo de tiempo analizado. Fuente: elaboración propia. Datos: <http://www.windguru.cz> los valores de altura promedio de las ondas no presentan grandes variaciones, oscilando entre 1,2 m y 2 m. De igual modo, los valores mínimos, también se mantienen constantes mes a mes. Sin embargo, los valores máximos de ondas son los que presentan mayores variaciones teniendo picos durante las fuertes tormentas.

A la hora de analizar el recurso undimotriz, no solo la altura del oleaje es importante, sino también el periodo de la onda. Como se describió anteriormente, en la Potencia  $\left[\frac{Kw}{m}\right] = 0,98 H^2 T$  Ecuación VII, la potencia por metro de frente de onda afecta al periodo y al cuadrado de la altura ( $0,98 H^2 T$ ).

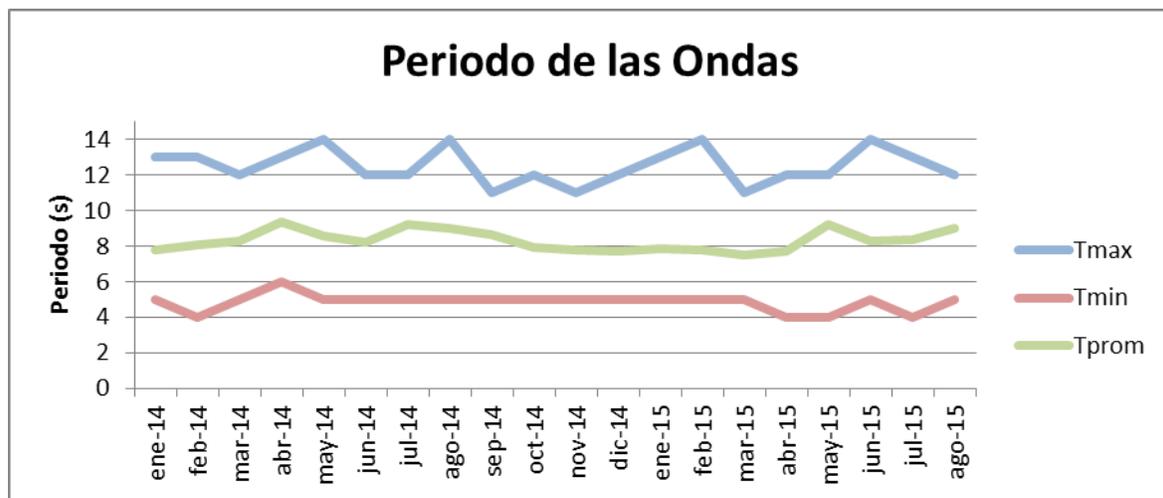


Figura 11. Periodo máximo, mínimo y promedio en el lapso de tiempo analizado. Fuente: elaboración propia. Datos: <http://www.windguru.cz>

En el Anexo II: Datos de periodo de ondas. Se presentan los datos extraídos de la página web Windguru.

Análogamente al comportamiento de la altura del oleaje, los valores mínimos y promedios registrados a lo largo de los meses se mantienen constantes. El periodo promedio oscila, mes a mes, entre 8 y 9 segundos. Por su parte, los valores máximos son los que

presentan mayor variabilidad. Como se mencionó anteriormente, a mayor período, mayor altura de onda y, por lo tanto, mayor energía y potencia.

La energía undimotriz que posee un lugar determinado, en este caso la ciudad de Mar del Plata se obtiene a partir de la altura significativa de la onda y el periodo medio. Sin embargo, a la hora de diseñar un dispositivo debe tomarse en consideración los valores extremos. En la tabla 5 se resumen los valores de las dos variables intervinientes en el potencial del recurso, los datos y el detalle del cálculo se observan en el Anexo I y Anexo II:

	Altura [m]	Período [s]
Mínimo	0,4	4
Promedio	1,6	8
Máximo	6,0	14
Significativo	2,1	

Tabla 5. Resumen de parámetros. Fuente: Elaboración propia. Datos: <http://www.windguru.cz>

Tomando la altura significativa de la onda y el periodo medio es posible obtener la potencia del recurso undimotriz marplatense:

$$P = 0,98H^2T = 0,98(2,1)^2(8) = 34,5 \frac{KW}{m}$$

## 2.6. Teoría del proceso de toma de decisiones

A partir de las características de la costa marplatense descritas anteriormente, se procederá a seleccionar un punto de la costa. Una vez seleccionada la ubicación, se aplicara un proceso de toma de decisiones para seleccionar el o los dispositivos más aptos para la ciudad de Mar del Plata.

Se utilizara el proceso de toma de decisiones descrito por Robbins y Coulter en el capítulo 6 de su libro "Administración". Esta herramienta fue aprendida en la materia Organización y dirección industrial III. A continuación se presentan las etapas del proceso de toma de decisiones (Robbins/Coulter, 2005):

1. Etapa 1: Identificar un problema. A partir de la existencia de un problema o, más específicamente de la discrepancia entre la situación actual y la situación deseada, comienza el proceso de toma de decisiones.

2. Etapa 2: Identificar criterios de selección. Los criterios de selección son aquellas características pertinentes para tomar una decisión.
3. Etapa 3: Asignar peso a los criterios de selección.
4. Etapa 4: Desarrollo de alternativas. Se describirán las tecnologías de conversión undimotriz disponible en el mercado y de mayor difusión a nivel mundial.
5. Etapa 5: Análisis de alternativas. En esta etapa se evalúan las alternativas en base a los criterios de selección definidos en la etapa 2.
6. Etapa 6: Selección de una alternativa. Se calificará a cada dispositivo en una escala de 1 a 5, donde 5 es la mejor puntuación y 1 la peor puntuación. Posteriormente afectara los criterios por la ponderación establecida y se los sumará. El dispositivo con la mayor puntuación será el seleccionado.
7. Etapa 7: Implementar la alternativa
8. Etapa 8: Evaluar la eficacia de la decisión

El presente trabajo final no abarca las etapas 7 y 8. Se propondrá la mejor elección de la tecnología disponible en el mercado y se harán recomendaciones a mediano plazo.

## **III. Desarrollo**

### **3.1. Selección de un punto estratégico de la costa Marplatense**

Cómo se mencionó anteriormente, la ciudad de Mar del Plata no posee un registro de datos del mar. Por lo tanto, no es posible escoger un punto de la ciudad considerando el potencial de cada zona como criterio de selección.

De todos modos, existen algunos criterios que deben tenerse en cuenta de seleccionar una zona para aprovechar la energía de las ondas del mar:

1. Contar con una escollera que sobrepase la rompiente de las ondas. Colocar el dispositivo cerca de una escollera tiene numerosas ventajas:
  - a. Facilita la instalación del dispositivo,
  - b. Facilita el acceso al dispositivo para realizar el mantenimiento,
  - c. Evita la utilización de cableado submarino, el cual tiene un costo muy elevado ( $1.000.000 \frac{US\$}{km}$ ),
2. Reducir el impacto ambiental al mínimo. La instalación de un convertidor de energía undimotriz, genera en mayor o menor medida, un impacto visual. Mar del Plata es una ciudad turística, por lo tanto no modificar el paisaje natural de la ciudad y por sobretodo no interferir en las zonas destinadas a la recreación marítima de las personas, es otro punto a tener en cuenta.
3. No interferir en la actividad económica. Mar del Plata es una ciudad portuaria por lo tanto no debe interferir el ingreso al puerto ni interferir en la actividad pesquera.

Para el análisis se plantean 3 zonas posibles con escolleras que sobrepasen la rompiente:

1. Zona 1: Escollera que protege al emisario submarino. En el norte de la ciudad, la empresa Obras Sanitarias Sociedad de Estado (OSSE), ha construido un emisario submarino de 4km de distancia, para su instalación se construyó una escollera que sobrepasa la rompiente a una distancia máxima de 167m de la costa.

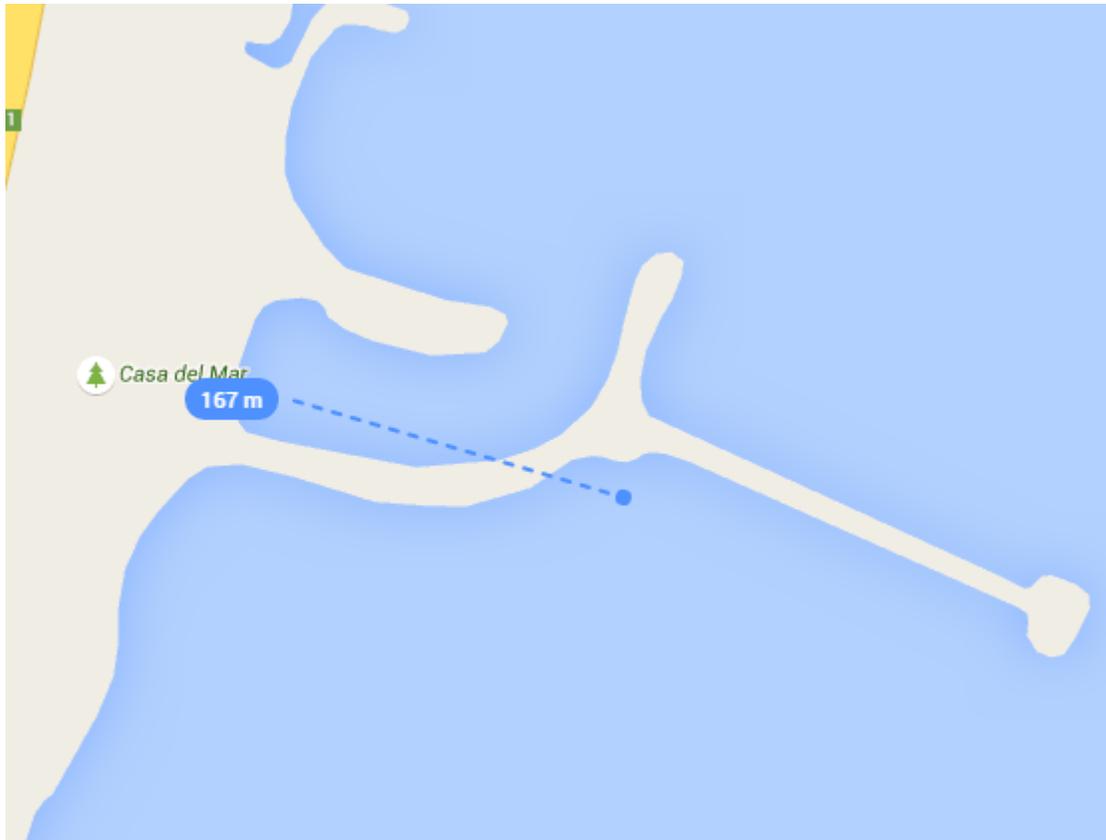


Figura 12. Escollera emisario submarino. Fuente: <https://www.google.com.ar/maps/>

2. Zona 2: Estación de Observaciones Costeras (EOC), espigón de los pescadores.

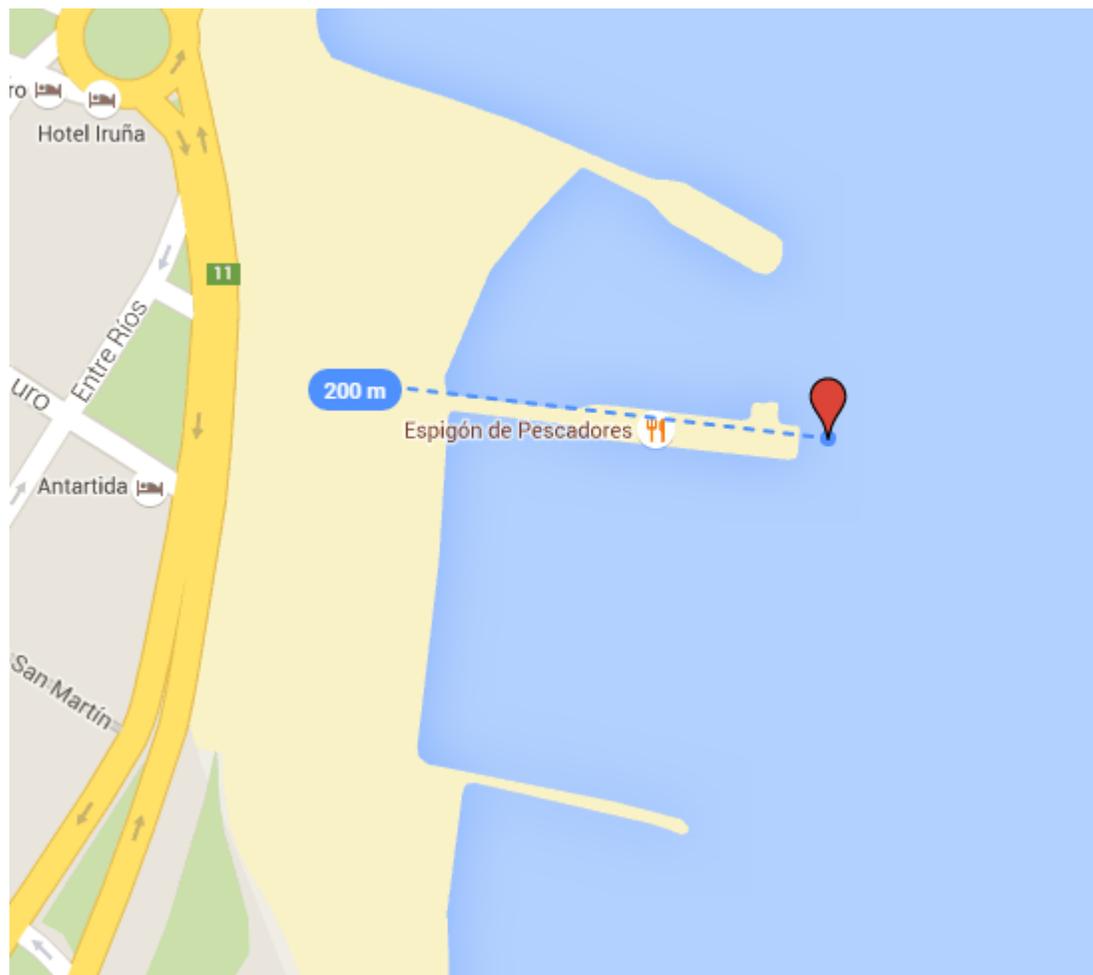


Figura 13. Estación de Observaciones Costeras. Fuente: <https://www.google.com.ar/maps/>

3. **Zona 3:** Escollera Sur. Puerto de la ciudad de Mar del Plata, se propone colocar el dispositivo a una distancia de 1,4m de la costa como se muestra en la Figura 14. Escollera sur, Puerto de Mar del Plata. Fuente: <https://www.google.com.ar/maps/>

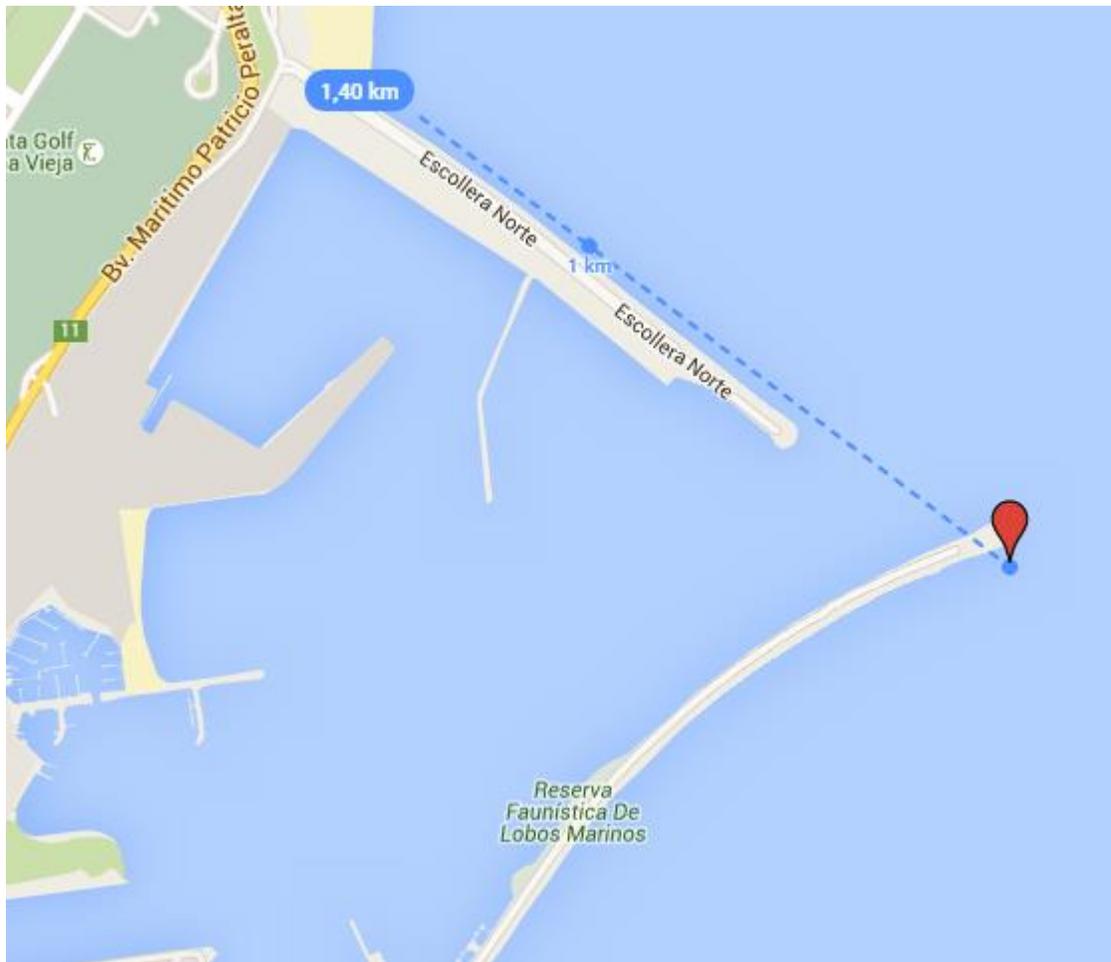


Figura 14. Esollera sur, Puerto de Mar del Plata. Fuente: <https://www.google.com.ar/maps/>

Se resumen las ventajas y desventajas de las zonas:

	Ventajas	Desventajas
Zona 1	<p>Su ubicación no interfiere con la vida turística, debido a que no se trata de una playa que permita el acceso al público.</p> <p>Se encuentra a una mayor distancia de la costa que la zona 2 y por lo tanto a mayor profundidad mayor energía undimotriz.</p> <p>Posee disponibilidad para instalar una planta de conversión en tierra y acceso de grúas para la instalación de dispositivos.</p>	<p>Se encuentra a una distancia de 167m de la costa, menor respecto a la zona 3.</p> <p>La esollera no facilita el acceso con grúas para realizar la instalación del dispositivo.</p>
Zona 2	La Estación de Observaciones costeras lleva	Se trata de una zona sumamente

	años trabajando para la colocación de un oligrafo en la zona, es probable que en el corto plazo comiencen a registrar datos certeros sobre el oleaje.	turística de la ciudad. “El muelle de los pescadores” es una postal típica de la ciudad y colocar un dispositivo generaría un gran impacto visual. No es posible colocar una estación de generación eléctrica sobre el muelle. Posee menor distancia desde la costa que las zonas 1 y 3.
Zona 3	La escollera sur brinda acceso una zona de mayor profundidad que las otras 2. A 1,6 Km de la costa ofrece una mayor profundidad, lo cual significa un mejor recurso. Se trata del marco del puerto de la ciudad, por lo cual la instalación de un dispositivo no generaría un gran impacto visual. Posee disponibilidad para instalar una planta de conversión en tierra y acceso de grúas para la instalación de dispositivos.	No se cuenta don datos certeros de altura y período de onda.

**Tabla 6. Resumen de ventajas y desventajas de zonas de la ciudad de Mar del Plata. Fuente: elaboración propia.**

De la tabla 6 resulta evidente que la zona más apropiada para la instalación de un dispositivo undimotriz es la zona 3: Escollera sur. En las cercanías de dicha zona las profundidades varían entre los 4,3 m a 7,9 m, como se observa en la figura 15. La profundidad de la costa marplatense se incrementa muy lentamente. Esta característica se vuelve fundamental a la hora de seleccionar un dispositivo debido que muchos de ellos requieren una profundidad mínima.

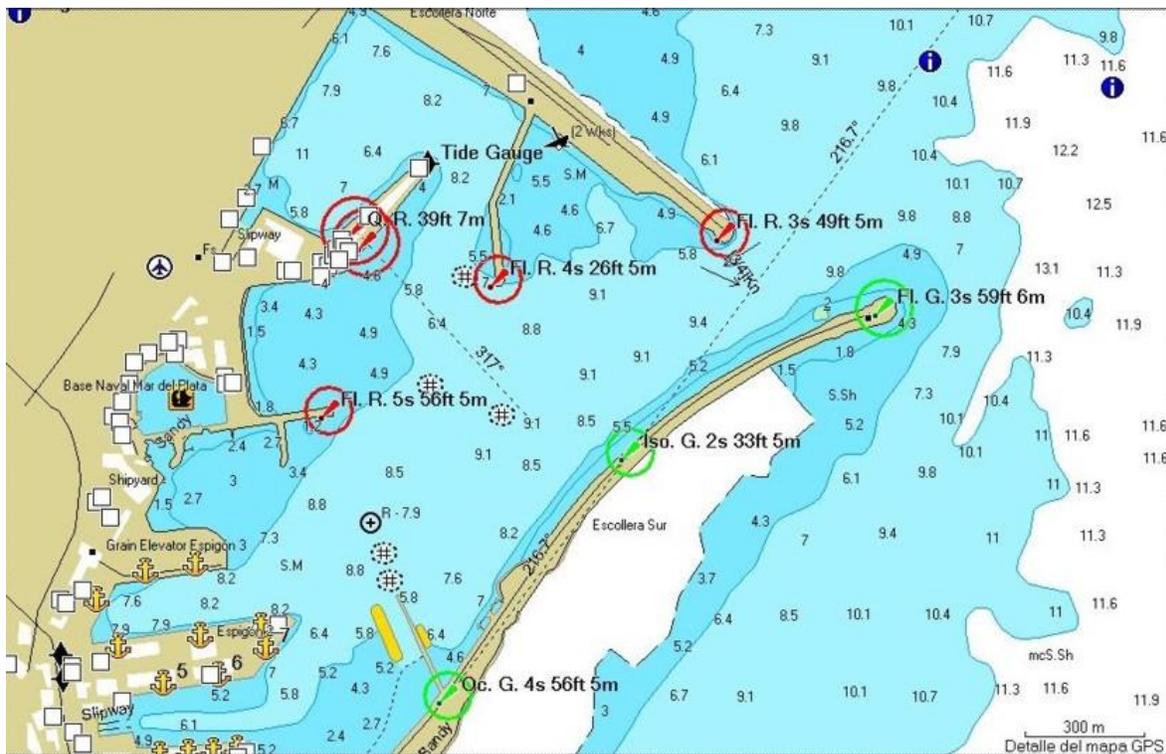


Figura 15. Carta Náutica. Fuente: Servicio de Hidrografía Naval, 2014.

### 3.2. Etapa 1: Identificar un problema

Una vez identificada la necesidad de modificar la matriz energética, presentados los beneficios que posee la energía undimotriz por sobre las demás energías renovables, y seleccionado un punto estratégico de la costa marplatense, donde será posible aprovechar un potencial energético de aproximadamente  $34,5 \frac{kW}{m}$  (kW por metro de frente de onda), se procederá a dar solución al siguiente problema:

***No existen dispositivos que actualmente aprovechen la energía undimotriz en Mar del Plata.***

A partir de la identificación del problema se da comienzo al proceso de toma de decisiones.

### 3.3. Etapa 2: Identificar criterios de selección.

A continuación se identifican los criterios de selección que servirán de base para finalmente seleccionar el dispositivo más apto para la ciudad de Mar del Plata:

1. Estado de desarrollo de la tecnología
2. Facilidad de instalación
3. Facilidad de mantenimiento. Este criterio se evaluará a partir de dos subcriterios, cada uno de ellos con una ponderación de 0,5.
  - a. Acceso para realizar el mantenimiento
  - b. Complejidad del mantenimiento.
4. Supervivencia
5. Impacto ambiental. Al igual que la facilidad de mantenimiento, se evaluarán dos subcriterios, cada uno de ellos con una ponderación de 0,5.
  - a. Impacto visual
  - b. Impacto sonoro

Es importante destacar que podrían seleccionarse otros criterios de selección tales como:

- ❖ Relación entre la eficiencia de conversión del oleaje y el peso del equipo.
- ❖ Relación entre el costo de instalación y los kW que se pueden obtener con dicho convertidor.

Sin embargo, esta información no se encuentra disponible en la actualidad debido a que todos los convertidores aún se encuentran en una etapa de estudio y cada uno de ellos busca mejorar su diseño. Existe una gran diversidad de dispositivos aprovechadores de energía undimotriz y esto se debe a que aún no se establecido una tecnología superior a las demás, todos los proyectos actuales realizan pruebas de funcionamiento pero no publican abiertamente información acerca del rendimiento real de los equipos.

Por otra parte, actualmente la energía undimotriz no es competitiva económicamente con otros métodos de generación de energía. Todos los proyectos que han llegado a la etapa de prueba y se han conectado a la red eléctrica, lo han logrado gracias a subsidios estatales. Es por este motivo que, hoy en día, no es posible evaluar la factibilidad económica debido a que no se cuenta con información certera acerca de los costos de instalación, operación ni de mantenimiento.

Los inconvenientes relacionados con la falta de información descriptos anteriormente se solucionan optando por criterios de selección que puedan calificarse a partir información disponible para todos los convertidores. Cada criterio se calificará a cada dispositivo con una escala de 1 a 5.

### 3.4. Etapa 3: Asignar peso a los criterios de selección.

Una vez definidos los criterios de selección se le otorga a cada uno el siguiente peso, como se observa en la Figura 16. Ponderación de los criterios de selección. Fuente elaboración propia.:

Criterio de selección	Ponderación
Estado de desarrollo de la tecnología	0,3
Simplicidad de la instalación	0,2
Simplicidad del mantenimiento	0,2
Supervivencia	0,25
Impacto ambiental	0,05

Figura 16. Ponderación de los criterios de selección. Fuente elaboración propia.

El **estado de desarrollo de la tecnología** posee un peso importante debido a que es el criterio que le da validez a todos los demás. Esto se debe a que, si se trata de una tecnología que ha pasado la instancia de prueba y se ha logrado obtener energía eléctrica mediante ese método, posiblemente la ubicación del dispositivo y el diseño se mantengan. Por el contrario, si se trata de una tecnología que aún se encuentra en la etapa de prueba, puede estar sujeta a cambios significativos de diseño y/o ubicación del dispositivo.

En segundo lugar, se establece una ponderación de 0,25 a la **supervivencia**. Esto se debe a que resulta imprescindible que el dispositivo cuente con las herramientas necesarias para sobrevivir en un ambiente agresivo como es el mar. Aquellos convertidores que reciban el impacto directo de la onda son los que contarán con menor calificación.

En tercer lugar, se ubican la **simplicidad de mantenimiento y de instalación** con una ponderación de 0,2. El mantenimiento de cualquier equipo es una tarea que se realiza en forma periódica, por lo tanto es de crucial importancia seleccionar un convertidor de energía undimotriz con alta calificación en este criterio. En referencia a la instalación, si

bien es una tarea que se realiza una sola vez, su simplicidad está directamente relacionada con el costo de instalación el cual, en ocasiones, supera ampliamente el costo del dispositivo.

Finalmente, se establece una ponderación de 0,05 al **impacto ambiental**. El impacto ambiental posee una importancia menor en relación a los criterios descritos anteriormente debido a que se trata de una tecnología amigable con el medio ambiente. Este criterio se compone de dos subcriterios: el impacto visual y el impacto sonoro. En ambos casos aquellos dispositivos que se ubiquen en las cercanías de la costa tendrán menor calificación, debido a que se encuentran en la cercanía de los ciudadanos.

### **3.5. Etapa 4: Desarrollo de alternativas.**

Existe una gran cantidad de mecanismos que permiten explotar la energía de las ondas. Esta diversidad constructiva se debe a que algunos equipos aprovechan la energía potencial, otros la energía cinética y otros la hidráulica. En todo el mundo se patentaron más de mil dispositivos, de los cuales, su gran mayoría, no ha llegado a la etapa de prueba.

El objetivo del presente trabajo es analizar la tecnología disponible en el mercado para conseguir el aprovechamiento de la energía undimotriz en la ciudad de Mar del Plata. Para ello, se analizarán los dispositivos de mayor difusión a nivel mundial.

#### **3.5.1. Voith hydro Wavegen: Columna de agua oscilante**

La columna de agua oscilante u OWC (*Oscillating Water Column*) aprovecha la energía de las ondas mediante la oscilación del agua en el interior de una cámara de aire. El primer dispositivo fue instalado por la empresa Voith en Islay, al sur de Escocia, en el año 2000,

con una potencia pico de 500KW (Catálogo GEMA, 2014). Fue la primer planta, en todo el mundo, de generación de energía de las ondas conectada a la red.

El principio de operación consiste en la variación de presión de aire en el interior de una columna. A medida que la onda ingresa en la cavidad se ejerce fuerza sobre el aire encerrado en el interior de la columna, es decir, la presión de aire aumenta y éste es obligado a atravesar una turbina. Contrariamente, el retroceso de la onda hace que la presión disminuya provocando que el aire fluya en la cámara y vuelva a mover la turbina. Esta turbina posee un diseño especial que le permite aprovechar el flujo en ambos sentidos. Finalmente, se acopla la turbina a una máquina de inducción conectada a la red (Waveplan, 2009). El mecanismo de funcionamiento del sistema OWC se presenta en la figura 17.

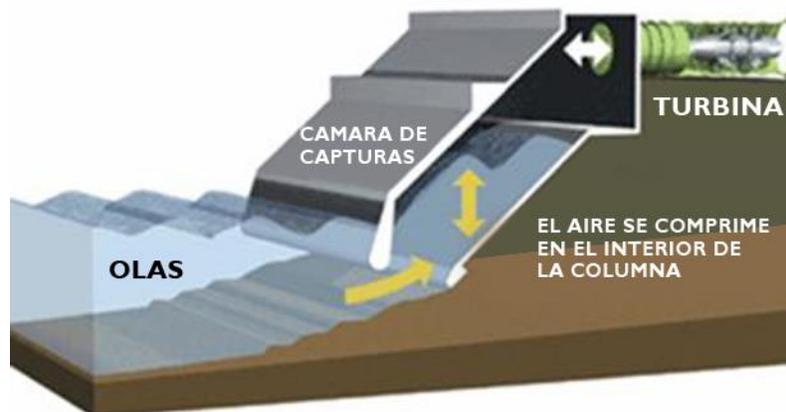


Figura 17. Principio de funcionamiento OWC. Fuente: Weveplan.eu

La eficiencia de los dispositivos OWC depende, en gran medida, de la frecuencia de las ondas incidentes. Con geometrías optimizadas la eficiencia puede variar entre 10% y 90%. La principal ventaja de estos dispositivos se debe a se trata de un dispositivo colocado sobre la costa, no requiere cableado submarino y el sistema de conversión no está en contacto con el agua.

### 3.5.2. Wave Dragon

El sistema Wave Dragon fue desarrollado por un grupo de compañías lideradas por Wave Dragon ApS de Dinamarca. Se trata de un dispositivo de aguas profundas, flotante y de construcción robusta que lo hace permanecer prácticamente inmóvil (Wave Dragon, 2009).

El principio de funcionamiento de este dispositivo consiste en tomar agua por el frente del equipo, donde las ondas son concentradas en dirección a una rampa. De esta manera se llena un reservorio ubicado a un nivel más alto. Este reservorio consiste en dos brazos laterales de 58m de largo en total. La energía eléctrica se produce cuando el agua del reservorio es devuelta al mar y pasa a través de una serie de turbinas hidroeléctricas (Kaplan) acopladas a un generador. (Catálogo GEMA, 2014). El sistema se presenta en la Figura 18. Principio de funcionamiento del sistema Wave Dragon. Fuente: Wave Dragon

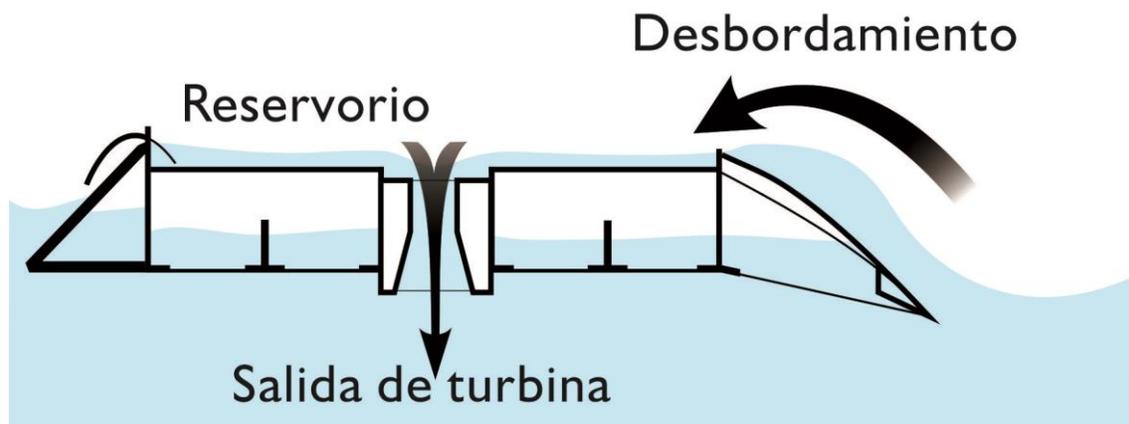


Figura 18. Principio de funcionamiento del sistema Wave Dragon. Fuente: Wave Dragon

El primer prototipo conectado a la red se instaló en Nissum Bredning, Dinamarca. Fue sometido a numerosas pruebas en el periodo 2003 a 2009, su potencia era de 20 KW y en la actualidad se están realizando mejoras en el diseño con el fin de instalar un equipo de 4MW en las costas de Wales y Portugal (Wave Dragon, 2009).

Entre las principales ventajas se destaca que este dispositivo toma la tecnología existente madura de las centrales hidroeléctricas y la utiliza de manera novedosa en alta mar. Las turbinas del dispositivo son las únicas partes móviles, lo cual facilita enormemente su mantenimiento. Por otra parte, utiliza materiales y componentes estándar lo cual disminuye los costos de fabricación (Wave Dragon, 2009).

### 3.5.3. Pelamis

El convertidor de energía de las ondas Pelamis fue inventado en Escocia por la empresa Ocean Power Delivery Ltd. (OPD), fundada en el año 1998 y actualmente conocida bajo el nombre Pelamis Wave Power. Pelamis, “serpiente” en griego, es el dispositivo de mayor difusión a nivel mundial. En 2004 se presentó el primer prototipo a escala real Pelamis 1.

Este dispositivo estaba compuesto por cuatro cilindros articulados de 3,5 m de diámetro y 30 metros de longitud que hacen de flotadores y tres cilindros articulados de 3,5 m de diámetro y 5 m de longitud que son las unidades generadoras de energía. Esta estructura, con 140 m de longitud total, es anclada y semisumergida en aguas profundas, a una distancia que varía entre 5 km a 10 km de la costa.

Durante el periodo comprendido entre el año 2004 a 2007, el Centro Europeo de Energías Marinas (The European Marine Energy Centre, EMEC) realizó pruebas sobre el funcionamiento del Pelamis 1, las cuales dieron como resultado una serie de cambios técnicos que condujeron al desarrollo de un dispositivo de segunda generación, Pelamis 2. Este nuevo prototipo se compuso de 5 secciones conectadas a los cilindros articulados de 4 m de diámetro y una longitud total de 180 m (The European Marine Energy Centre, 2015). Las empresas responsables del proyecto son EON y Scottish Power Renewables. (Catálogo GEMA, 2014).

El principio de funcionamiento del Pelamis se basa en aprovechar el movimiento serpenteante de arriba a abajo y de lado a lado, que se produce en la articulación mediante pistones hidráulicos. La energía hidráulica se envía a un tanque unificador de presión y, posteriormente, el fluido pasa a una turbina hidráulica conectada a un

generador

eléctrico,

ver

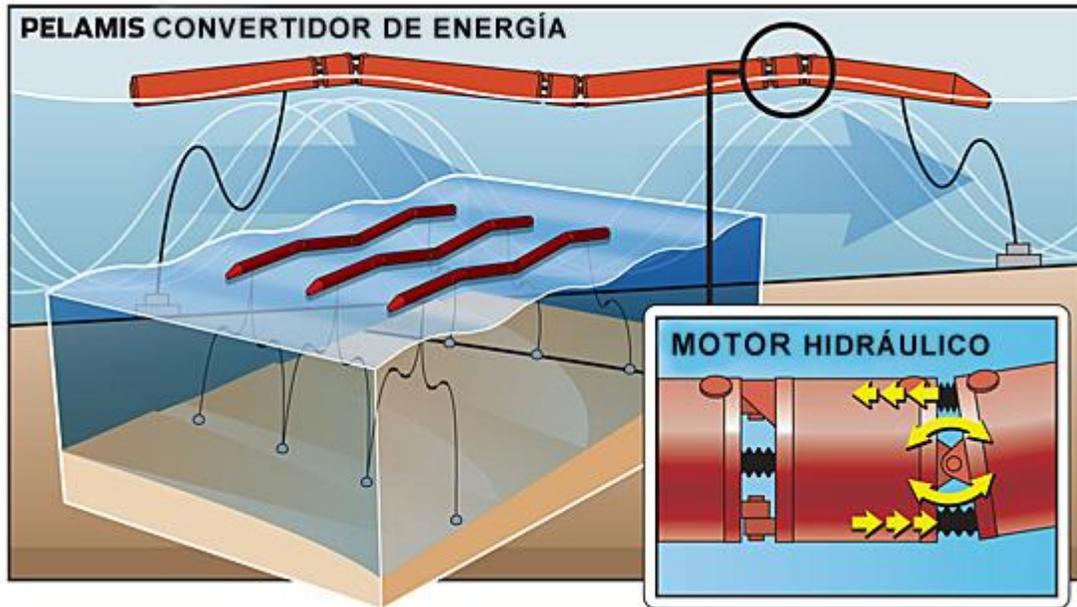


Figura 19. Diagrama del principio de funcionamiento Pelamis. Fuente: [ecomedioambiente.com](http://ecomedioambiente.com) Cada unidad del Pelamis tiene una potencia nominal total de 750 KW (Chozas, Una aproximación al aprovechamiento de la energía de las olas para la generación de electricidad, 2008).

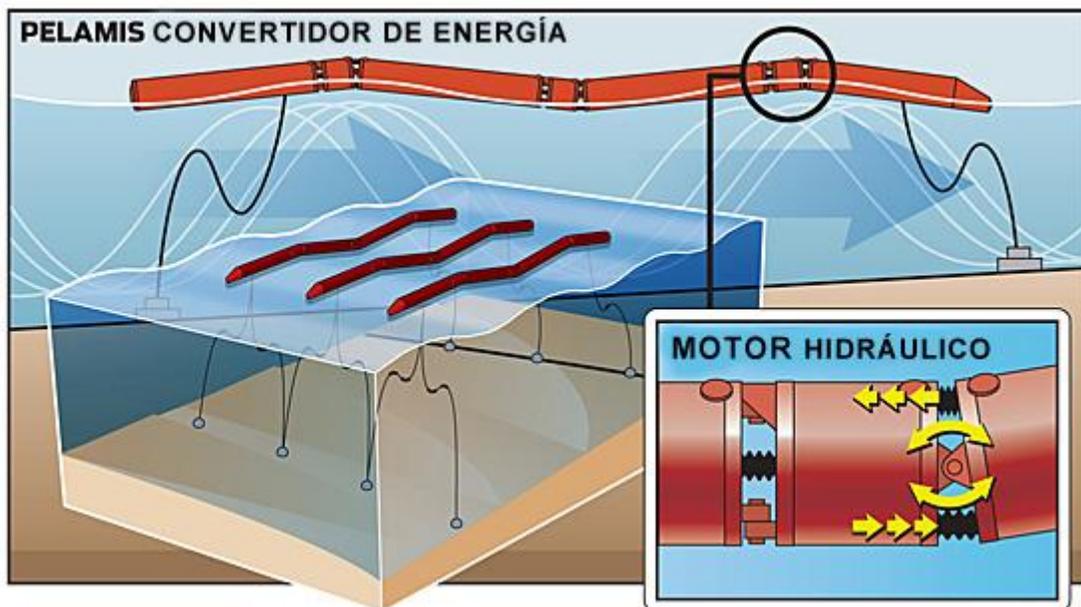


Figura 19. Diagrama del principio de funcionamiento Pelamis. Fuente: [ecomedioambiente.com](http://ecomedioambiente.com)

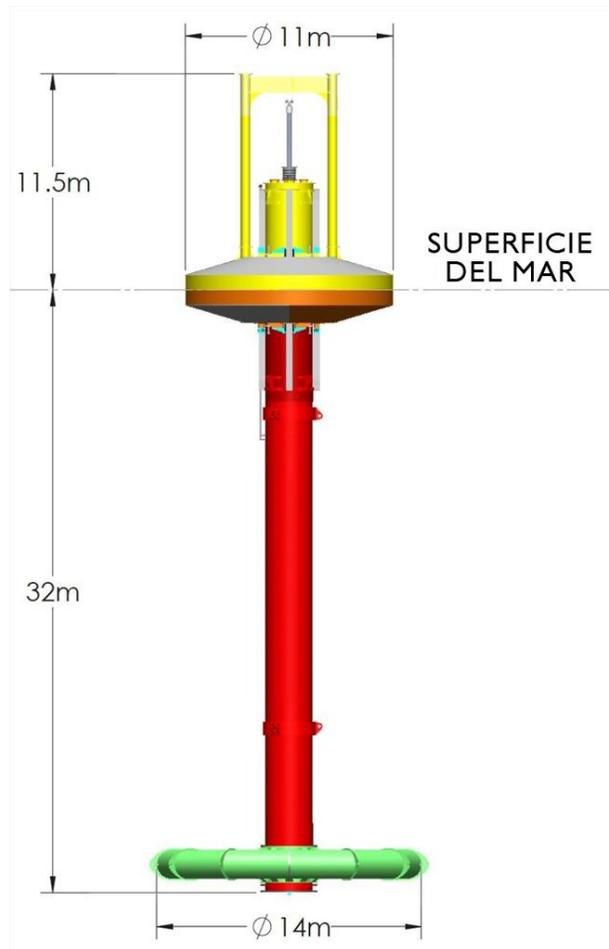
La construcción y desarrollo del Pelamis ha pasado por las manos de varias empresas, hoy en día el proyecto se encuentra parado, y ya no quedan dispositivos en el mar. A

comienzos de este año, la empresa quebró con una deuda de 15 millones de euros. La propiedad intelectual, patentes y otros activos de Pelamis fueron comprados por Highlands and Islands Enterprise (HIE). Esta nueva empresa es un organismo creado para apoyar el desarrollo de la energía de las ondas en Escocia totalmente financiada por el gobierno de dicho país (The Scotsman, 2015).

#### **3.5.4. OPT: Power buoy Mark 3 (OWC)**

La empresa estadounidense, *Ocean Power Technologies* (OPT), es una de las empresas pioneras en la industria de la energía undimotriz. Su diseño patentado bajo el nombre Powerbuoy se clasifica como absorbedores puntuales ha sido sometido a pruebas de 1997.

La última versión diseñada por OPT es Powerbuoy Mark 3. La primer unidad a escala 1:1 se fabricó en Escocia en 2011 y fue sometida a pruebas en la costa oriental de este país. Durante la fase de prueba alcanzo una potencia de 866 KW. Se trata de un dispositivo capaz de aprovechar la energía de las ondas que varían de 1m a 6m y debe ser colocado a una profundidad mínima de 32m.



**Figura 20. Power Bouy Mark 3. Fuente: Oceam Power Technology**

Los absorbedores puntuales están compuestos por un cilindro central fijo y una boya exterior, la parte móvil del equipo. El principio de funcionamiento consiste en el accionamiento de unos pistones hidráulicos aprovechando el movimiento de la parte móvil conforme pasa el oleaje. Estos pistones comprimen aceite a presión y este hace girar una turbina acoplada a un generador. Actualmente la empresa se encuentra desarrollando un nuevo prototipo, Mark 4 que será de 2,4 MW de potencia (Oceam Power Technology).

### 3.5.5. Wave Star

La empresa Danesa Wave Star, creó un dispositivo que aprovecha la energía de las ondas por medio de absorbedores de multipunto. Cuenta con una cantidad determinada de flotadores que, con el paso de las ondas, suben y bajan accionando bombas

hidráulicas que conduce aceite a presión a través de una turbina hidráulica acoplada a un generador (Catálogo GEMA, 2014).

Wave Star ha pasado por prototipos de diferentes escalas con la particularidad de haberlos probado en el mar. En 2004 se realizó el modelo a escala 1:40 al cual se le realizaron más de 1.300 pruebas de funcionamiento con el fin de optimizar el concepto. En 2005 se diseñó la escala 1:10, se lo colocó en el mar de Nissum Bredning, Dinamarca, como si se tratara de una máquina de gran escala con el objetivo de aprender acerca de los problemas prácticos de operación en el mar. Este modelo fue conectado a la red a mediados de 2006 y desde entonces ha registrado más de 15.000 h de funcionamiento en el mar y sobrevivido a 15 tormentas sin daños. (Wave Star, 2015)

El modelo de media escala se instaló en 2009 en Hanstholm. Su instalación llevó 2 días y se ha construido un puente para acceder a la máquina como se observa en la Figura 21. Wave Star. Fuente: <http://wavestarenergy.com/> Este modelo se encuentra conectado a la red desde febrero del 2010, está compuesto por dos flotadores de 25 kW cada uno. A medida que el sistema duplica su escala, la profundidad de instalación se duplica y, por lo tanto, la altura de las ondas aumenta. El modelo en escala 1:1 contará con una potencia de 600KW. (Wave Star, 2015)



Figura 21. Wave Star. Fuente: <http://wavestarenergy.com/>

### 3.5.6. Aquamarine Power: Oyster

Aquamarine Power es una empresa fundada en el año 2005 en Edimburgo. Esta empresa desarrolla la tecnología Oyster (ostra, en español) cuyo objetivo es aprovechar la energía de las ondas cercanas a la costa (The European Marine Energy Centre, 2015). La fabricación del primer dispositivo a escala 1:1 se produjo en el año 2008.

El dispositivo consiste en una base semisumergida que se apoya sobre el lecho marino en una profundidad que varía de 10 m a 15m, a una distancia de la costa de aproximadamente 500m. El primer prototipo Oyster 1 tenía una potencia de 315kw, la segunda generación Oyster 800, proporciona una potencia 800kw. (Aquamarine Power, 2015). Este último dispositivo se instaló en el mar a finales de 2011 y está conectado a la red desde junio de 2012. Actualmente comenzaron a realizarse pruebas de funcionamiento en el sitio de prueba de Billia Croo de EMEC (The European Marine Energy Centre, 2015).

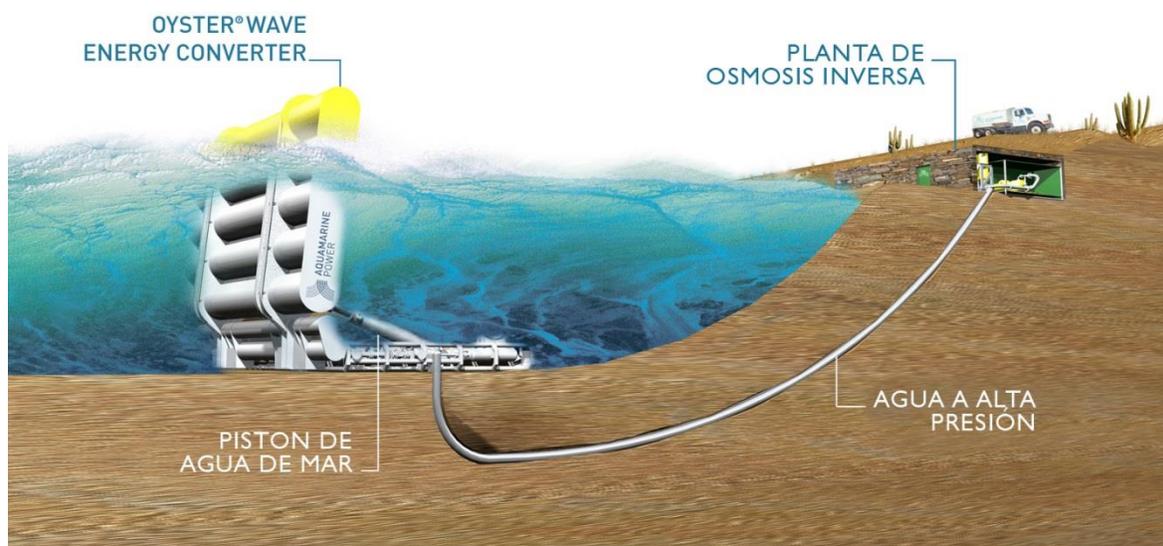


Figura 22. Diagrama Oyster. Fuente: Aquamarine Power

El principio de funcionamiento consiste en un flotador que se articula con la base que, con el vaivén producido por el paso de las ondas, acciona dos pistones hidráulicos que envían agua a presión a través de una tubería submarina hacia la costa, como se observa en la figura 22. Una vez en la costa, el fluido ingresa a una cámara homogeneizadora de presión y luego atraviesa una turbina Paltón acoplada a un generador (Catálogo GEMA, 2014). La principal ventaja de este dispositivo es que la conversión se produce fuera del agua, lo cual facilita el acceso y por ende su mantenimiento.

### 3.5.7. Wello Oy: The Pinguin

Wello Oy es una empresa fundada en 2008 en Finlandia. Luego de investigar numerosos conceptos sobre el aprovechamiento de la energía de las ondas desde 1976, seleccionó como único modelo "el pingüino" (The Pinguin WEC). El prototipo de The Pinguin se ha ido probando con éxito en laboratorios y en el mar y se ha perfeccionado hasta llegar al modelo actual de 1600T, 30 m de largo, 9m de alto, de los cuales solo 2m son visibles por encima de la superficie y una potencia nominal 500Kw (The European Marine Energy Centre, 2015).

Su principio de funcionamiento se basa en capturar la energía de rotación generada por el movimiento de su casco en forma asimétrica que rola y cabecea con el paso del oleaje. Este movimiento tiene como fin acelerar y mantener las revoluciones de un volante de inercia de giro alojado en el interior del casco, como se observa en el diagrama de corte de la Figura 23. Diagrama de corte The Pinguin. Fuente: Wello Oy Este movimiento acciona un generador que produce energía eléctrica que se envía a la costa mediante un cableado submarino (Catálogo GEMA, 2014).

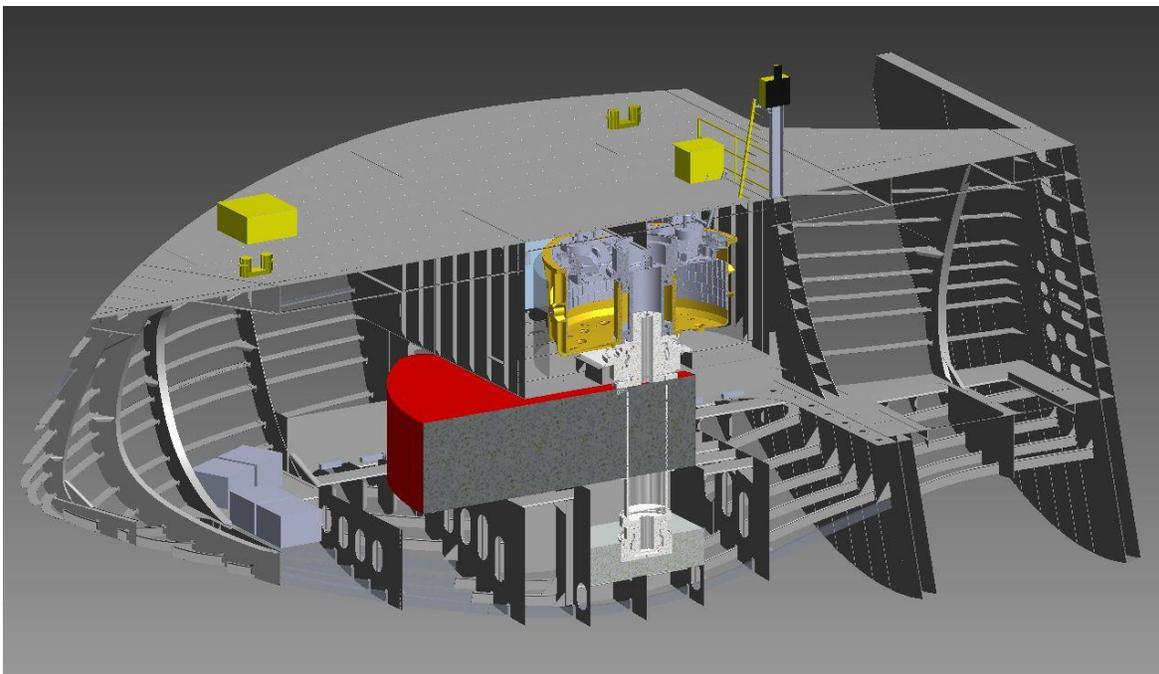


Figura 23. Diagrama de corte The Pinguin. Fuente: Wello Oy

Las principales ventajas de este dispositivo se deben a que convierte la energía de las ondas en electricidad directamente con el movimiento continuo de rotación, es decir, la

energía de alimentación se llevó directamente del rotor al generador utilizando el mismo eje y reduciendo las pérdidas de conversión. (Wello Oy, 2015)

Por otra parte, al tratarse de una investigación con larga trayectoria, se ha prestado especial atención en los costos de fabricación. Los componentes utilizados en la fabricación del pingüino son los mismos que se utilizan en las turbinas de viento, mientras que la fabricación del casco requiere de componentes disponibles en cualquier astillero (Wello Oy, 2015).

### 3.5.8. AWS Ocean Energy

AWS Ocean Energy, con sede en Inverness, Escocia, desarrolla un dispositivo absorbedor multimembrana. En el año 2014, el prototipo AWS-III de media escala fue sometido a pruebas en Orkney (Renewable Energy Focus, 2014). El equipo a escala comercial contara con unos 60 m de diámetro y se podrá instalar en profundidades que varían entre los 75m y los 150m, su potencia nominal será de 2,5MW.

El principio de funcionamiento consiste en un cilindro flotante que aprovecha el movimiento de las ondas para accionar pistones neumáticos que comprimen el aire para ser enviado a una turbina acoplada un generador (Catálogo GEMA, 2014).



Figura 24. AWS-III. Fuente: awsoccean.com

### 3.5.9. Carnegie Wave Energy: CETO

Carnegie Wave Energy es una empresa Australiana que ha patentado un dispositivo undimotriz bajo el nombre "CETO". Luego de 10 años de investigación, desarrollo y numerosas pruebas han llegado a desarrollar el prototipo actual, CETO 5, en el marco del proyecto Perth (*Perth Wave Energy Project*).

Se trata de una tecnología simple y robusta, el único en todo el mundo que se encuentra totalmente sumergido. Está compuesto por boyas sujetas a unidades de bombeo. Con el paso de las ondas se genera energía hidráulica, la cual se trasmite a la costa mediante una tubería, ver en la figura 25, una vez en la costa el agua sometida a presión acciona un motor hidráulico acoplado a un generador (Carnegie Wave Energy, 2015).



Figura 25. CETO Carnegie Energy. Fuente: <http://carnegiwave.com/>

El sistema se encuentra ubicado en el mar de Fermatle, Australia, a unos 25 m de profundidad y 3 km mar adentro de HMAS Stirling, la base naval más grande de Australia. El sistema de generación eléctrica en tierra, terminado en enero de 2015, se encuentra conectado a la red desde febrero del mismo año. El prototipo CETO 5 cuenta con un diámetro de 11m, y una potencia nominal de 240KW. (Power Technology, 2015)

### 3.5.10. WERPO

*Wave Electricity Renewable Power Ocean* (WERPO) es una empresa Israelí formada en 2014, su tecnología fue inicialmente diseñada por la firma SDE Ltd. El inventor de esta

tecnología, Shmuel Ovadia, obtuvo su patente en 1997 en los Estados Unidos. (WERPO, 2015)

El principio de funcionamiento se basa en generar presión hidráulica a partir del movimiento de las ondas. El dispositivo se sujeta en tierra, cuenta solo con el 10% del dispositivo bajo el agua lo cual facilita el mantenimiento y disminuye los costos de transmisión de energía. Además, el sistema cuenta con componentes modulares que ocupan poco espacio y pueden adaptarse fácilmente a cualquier terreno.

Esta tecnología se ha ido mejorando con el paso del tiempo por medio de 11 modelos. Su último modelo supero las expectativas de sus diseñadores entregando una potencia de 60KW. Actualmente se encuentran en la etapa final de la construcción de una planta en China de 150 KW.

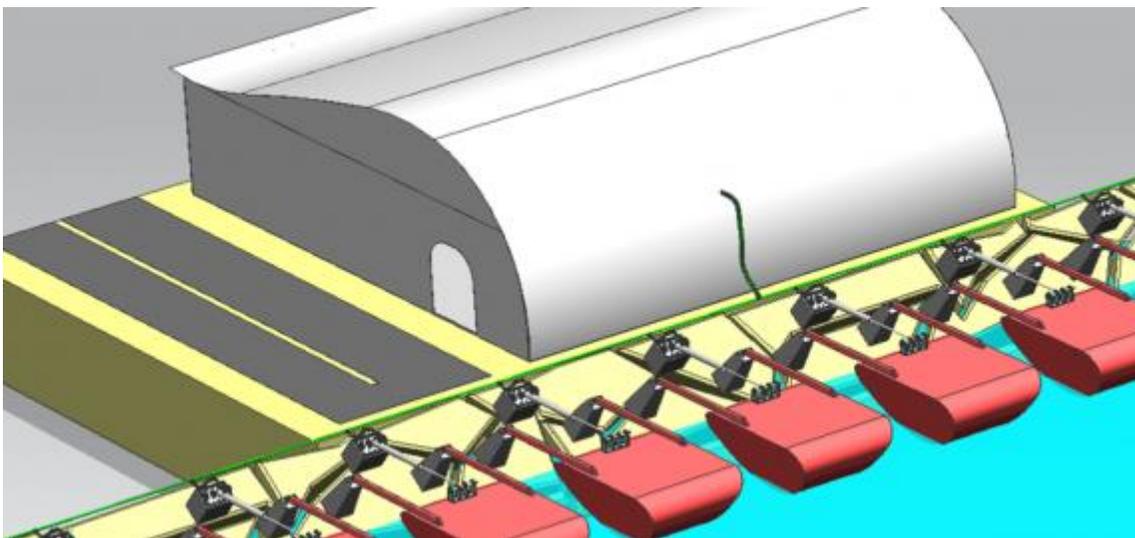


Figura 26. Prototipo de planta WERPO. Fuente: <http://werpo.us/>

### 3.5.11. Argentina presente: UTN-FRBA

La Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Buenos Aires (UTN – FRBA) ha creado un grupo de investigación interdisciplinario dirigido y coordinado por los Ings. Mario Pelissero y Alejandro Haim respectivamente.

El equipo está compuesto de dos boyas unidas cada una a un brazo de palanca los cuales están unidos en un cuerpo central compuesto por una cadena cinemática acoplada a un generador, ver Figura 27. Dispositivo undimotriz UTN BA-FRBA. Fuente:

<http://www.mecanica.frba.utn.edu.ar/energiaundimotriz> El principio de funcionamiento consiste en aprovechar la energía potencial variable de las ondas y transformarla en un movimiento rectilíneo uniforme, para luego acoplarlo a un generador eléctrico. (Grupo de Investigación Undimotriz UTN-FRBA, 2015)



Figura 27. Dispositivo undimotriz UTN BA-FRBA. Fuente: <http://www.mecanica.frba.utn.edu.ar/energiaundimotriz>

Cada boya posee un diámetro de 3m y un peso de 10 t, la altura de los brazos es de 6 m. Sera capaz de entregar una potencia nominal de 30KW por boya, es decir, 60KW por equipo. Se trata de un dispositivo de aguas intermedias que debe colocarse a una profundidad tal que le permita situarse detrás de la rompiente. Hasta el día de la fecha el grupo de investigación ha construido un prototipo de escala 1:20, otro de escala 1:10 y se ha comenzado el diseño del equipo en escala 1:1.

Las principales ventajas de este dispositivo se deben a que, por un lado, transforma la energía undimotriz en mecánica eléctrica sin pasar a otro tipo de energía como la hidráulica, por ejemplo. Esto aumenta el rendimiento de la conversión ya que el pasaje de un tipo de energía a otro posee un rendimiento individual que posteriormente se multiplica para obtener el rendimiento total del sistema. Por otro lado, el sistema conversor de energía no se encuentra sumergido, lo cual facilita el mantenimiento y aumenta su vida útil.

### 3.6. Etapa 5: Análisis de alternativas.

En primer lugar, resulta imprescindible destacar que los equipos se dimensionan en función al lugar donde van a ser instalados. La potencia nominal de los dispositivos que contienen boyas, se obtiene con los valores de onda y periodo medio anual. Otros

equipos, como por ejemplo el Pelamis, definen su potencia nominal a partir de la articulación máxima que permite el equipo. Por lo tanto no puede considerarse a la potencia nominal como un criterio de selección. Para comenzar el análisis se resume a continuación las principales características de las tecnologías disponibles en el mercado:

Dispositivo	Empresa - Ente investigador	País	Estado actual de la tecnología	Potencia Nominal
Columna de agua oscilante	Voith hydro Wavegen	Escocia	Tecnología conectada a la red	500 kw
Wave Dragon	Wave Dragon	Dinamarca	Tecnología probada, mejorándose el diseño.	20 Kw
Pelamis	Pelamis	Escocia	Tecnología retirada del agua	750 Kw
Power buoy Mark 3	OPT	Escocia	Tecnología probada, mejorándose el diseño.	566 kw
Wave Star	Wave Star	Dinamarca	Modelo de media escala conectada a la red	25 kw
Oyster	Aquamarine Power	Escocia	Tecnología conectada a la red	800 Kw
The Pinguin	Wello Oy	Finlandia	Tecnología probada	500 kw
AWS-III	AWS Ocean Energy	Escocia	Tecnología en estudio	2500 kw
CETO 5	Carnegie Wave Energy	Australia	Tecnología conectada a la red	240 kw
WERPO	WERPO	Israel	Tecnología conectada a la red	60/240 kw
UTN-FRBA	UTN-FRBA	Argentina	Diseño de escala 1:1	

Tabla 7. Resumen de tecnologías 1. Fuente: elaboración propia

Dispositivo	Tipo de convertidor	Ubicación del sistema de conversión	Obtención de energía	Fluido de trabajo	Cableado submarino
Columna de agua oscilante	Totalizador	Sobre la costa	sistema pasivo	Aire	no
Wave Dragon	Totalizador	Aguas profundas		Agua de mar	si
Pelamis	Atenuador	Aguas profundas	sistema activo	Aceite	si
Power buoy Mark 3	Absorbedor puntual	Aguas profundas	sistema activo	Aceite	si
Wave Star	Absorbedor puntual	Aguas intermedias	sistema activo	Aceite	Si/No
Oyster	Totalizador	Aguas intermedias	sistema activo	Agua de mar	si
The Pinguin	Absorbedor puntual	Aguas intermedias/aguas profundas	sistema activo	sistema mecánico	si
AWS-III	Absorbedor puntual	Aguas profundas	sistema activo	Aire	si
CETO 5	Abasorvedor puntual	Aguas profundas	sistema activo	Agua de mar	no- tubería si
WERPO	Absorbedor puntual	Sobre la costa	sistema activo	Agua	no
UTN-FRBA	Absorbedor puntual	Aguas intermedias	sistema activo	sistema mecánico	si/no

Tabla 8. Resumen de tecnologías 2. Fuente elaboración propia.

A continuación se procederá a calificar a los convertidores de energía undimotriz bajo los criterios seleccionados anteriormente.

### 3.6.1. Estado de desarrollo de la tecnología

Debido a que el estudio de la energía de las ondas es muy reciente, el estado en el cual se encuentren actualmente las tecnologías es un importante criterio de decisión. El mejor de los casos es cuando el convertidor ha pasado numerosas pruebas en estala 1:1 y se encuentra conectado a la red. Por el contrario, el peor de los casos son aquellas tecnologías que estuvieron operando en el agua y decidieron retirarse, confirmando que no es factible obtener un buen rendimiento de energía undimotriz mediante ese método. A continuación se calificaran los dispositivos:

Dispositivo	Estado actual de la tecnología	Calificación
Columna de agua oscilante	Tecnología conectada a la red	5
Wave Dragon	Tecnología probada, mejorándose el diseño.	4
Pelamis	Tecnología retirada del agua	1
Power buoy Mark 3	Tecnología probada, mejorándose el diseño.	4
Wave Star	Tecnología conectada a la red	5
Oyster	Tecnología conectada a la red	4
The Pinguin	Tecnología probada	3
AWS-III	Tecnología en estudio	2
CETO 5	Tecnología conectada a la red	5
WERPO	Tecnología probada, mejorándose el diseño.	4
UTN BA-FRBA	Diseño de escala 1:1	2

Tabla 9. Estado actual de la tecnología. Fuente: elaboración propia

### 3.6.2. Simplicidad de instalación

Si bien no se cuenta con información disponible sobre costos de instalación, existen criterios que determinan la complejidad de la instalación. Cuanto más compleja es la instalación, mayor será el costo. Se considerara la ubicación de los dispositivos para calificar los convertidores de energía undimotriz:

Ubicación del sistema de conversión	Calificación
Sistemas ubicados sobre la costa	4
Sistemas ubicados en aguas intermedias	3
Sistemas ubicados en aguas profundas	1

Tabla 10. Consideraciones para calificar la simplicidad de la instalación. Fuente: elaboración propia

Resulta importante destacar que el punto de la costa marplatense seleccionado permite la accesibilidad de equipos, es decir, pueden trasladarse con facilidad sobre la escollera sur grúas y otras máquinas necesarias para realizar la instalación.

Ubicar sistemas en aguas profundas es relativamente más complejo debido a que deben utilizarse barcos para transportar el equipo, si, además, se trata de dispositivos anclados, se debe contar con personal especializado para trabajar a grandes profundidades. De igual modo, instalar dispositivos en aguas intermedias requiere la utilización de transporte y personal calificado, pero trabajar en profundidades medias es menos dificultoso que trabajar en aguas más profundas.

El mejor caso es trabajar sobre tierra firme, donde el acceso es fácil. Sin embargo, los dispositivos ubicados sobre la costa deben recibir el impacto de directo de la onda lo cual dificulta la instalación. En ocasiones se realizan infraestructuras provisorias para evitar el impacto de las ondas y se retira dicha estructura una vez que la instalación ha finalizado. De todos modos, las instalaciones sobre la costa no requieren de cableado submarino lo cual constituye el principal factor de complejidad de la instalación.

Dispositivo	Ubicación del sistema de conversión	Calificación
Columna de agua oscilante	Sobre la costa	4
Wave Dragon	Aguas profundas	1
Pelamis	Aguas profundas	1
Power buoy Mark 3	Aguas profundas	1
Wave Star	Aguas intermedias	3
Oyster	Aguas intermedias	3
The Pinguin	Aguas intermedias/aguas profundas	2
AWS-III	Aguas profundas	1
CETO 5	Aguas profundas	1
WERPO	Sobre la costa	4
UTN-FRBA	Aguas intermedias	3

Tabla 11. Simplicidad de la instalación. Fuente: elaboración propia

### 3.6.3. Simplicidad de mantenimiento

Para evaluar la simplicidad del mantenimiento se tendrán en cuenta dos criterios, por un lado, el acceso para realizar el mantenimiento y, por el otro, la complejidad del mantenimiento. Tanto el acceso como la complejidad de la tarea en sí, son igual de importantes a la hora de calificar el manteniendo. Por lo tanto, cada subcriterio tendrá una

ponderación de 0,5. En la Tabla 12. Acceso al mantenimiento. Fuente: elaboración propia. y la Tabla 13. Complejidad del mantenimiento. Fuente: elaboración propia. se enlistan las consideraciones que se tomaran para calificar a los convertidores:

Acceso para realizar el mantenimiento	Calificación
Equipos cuya conversión se realiza en tierra	5
Equipos cuya conversión se realiza en aguas intermedias	3
Equipos cuya conversión se realiza en aguas profundas	1

Tabla 12. Acceso al mantenimiento. Fuente: elaboración propia.

Complejidad del mantenimiento	Calificación
Equipos pasivos	5
Equipos con partes móviles sin contacto con el agua	4
Equipos con partes móviles en contacto con el agua	1

Tabla 13. Complejidad del mantenimiento. Fuente: elaboración propia.

A continuación, en la

	Simplicidad del mantenimiento		
	Acceso para realizar el mantenimiento	Complejidad del mantenimiento	Calificación total
Ponderación/ Dispositivo	0,5	0,5	1
Columna de agua oscilante	5	5	5
Wave Dragon	1	1	1
Pelamis	1	1	1
Power buoy Mark 3	1	1	1
Wave Star	3	4	3,5
Oyster	3	1	2
The Penguin	2	4	3
AWS-III	1	1	1
CETO 5	1	1	1
WERPO	5	3	4
UTN BA-FRBA	3	4	3,5

Tabla 14. Simplicidad del mantenimiento. Fuente elaboración propia. se calificara a cada dispositivo:

	Simplicidad del mantenimiento		
	Acceso para realizar el mantenimiento	Complejidad del mantenimiento	Calificación total
Ponderación/ Dispositivo	0,5	0,5	1
Columna de agua oscilante	5	5	5

Wave Dragon	1	1	1
Pelamis	1	1	1
Power buoy Mark 3	1	1	1
Wave Star	3	4	3,5
Oyster	3	1	2
The Penguin	2	4	3
AWS-III	1	1	1
CETO 5	1	1	1
WERPO	5	3	4
UTN BA-FRBA	3	4	3,5

Tabla 14. Simplicidad del mantenimiento. Fuente elaboración propia.

### 3.6.4. Supervivencia

El mar es un ambiente sumamente agresivo, la supervivencia de cada dispositivo es un indicador de la resistencia de los convertidores ante circunstancias extremas, como por ejemplo tormentas. Se relaciona directamente con el tipo de dispositivo. Los convertidores totalizadores, reciben el impacto de las ondas constantemente y, por lo tanto, serían el peor caso.

Los atenuadores se ubican en forma perpendicular al frente de onda compensando las fuerzas a ambos lados de la estructura y, por lo tanto, representan el mejor caso. Los absorbedores puntuales representan el caso intermedio, aunque en algunos casos podrían tener una mejor calificación si tienen mecanismos que le permiten hacer frente a circunstancias extremas. Por ejemplo, los convertidores diseñados por la UTN de Buenos Aires y por la empresa Wave Star, poseen un mecanismo que permite levantar los brazos del equipo cuando exista alerta de tormenta y se espere que las ondas rompan sobre el dispositivo. A continuación se resumen las calificaciones que serán parámetro para calificar a cada convertidor:

Tipo de dispositivo	Calificación de supervivencia
Atenuador	5
Absorbedor con mecanismo de emergencia	4
Absorbedor puntual	3
Totalizador	1

Tabla 15. Consideración para calificar la supervivencia. Fuente: elaboración propia.

Bajo estas consideraciones se califica a cada dispositivo en la Tabla 16. Supervivencia. Fuente: elaboración propia.

Dispositivo	Tipo de convertidor	Calificación
Columna de agua oscilante	OWC	1
Wave Dragon	Totalizador	1
Pelamis	Atenuador	5
Power buoy Mark 3	Absorbedor puntual	3
Wave Star	Absorbedor puntual	4
Oyster	Totalizador	4
The Pinguin	Absorbedor puntual	3
AWS-III	Absorbedor puntual	3
CETO 5	Absorbedor puntual	5
WERPO	Absorbedor puntual	1
UTN BA-FRBA	Absorbedor puntual	4

Tabla 16. Supervivencia. Fuente: elaboración propia.

*Aclaración:* El dispositivo CETO 5 obtiene la mejor calificación debido a que la totalidad del dispositivo se encuentra sumergido. Al estar sumergido, sin importar la forma en la cual se ubique en relación al frente de onda el impacto que reciben del oleaje de alturas extremas es prácticamente nulo.

### 3.6.5. Impacto ambiental

Ubicar un convertidor undimotriz en una ciudad turística como Mar del Plata no es tarea fácil. Si bien, se eligió una zona aledaña al puerto de la ciudad, donde el paisaje está rodeado de barcos, todos los dispositivos undimotrices tendrán un impacto visual y sonoro.

Se calificara, por un lado, el impacto visual de cada dispositivo teniendo en cuenta su tamaño y la proximidad a la costa. Por otro lado, se puntuará el impacto sonoro considerando ubicación de la instalación y el tipo de dispositivos, debido a que aquellos que reciben el impacto de la onda en forma directa causan un mayor impacto sonoro.

A continuación se presenta en la Tabla 17. Impacto ambiental. Fuente: elaboración propia. las calificaciones:

Impacto ambiental			
Dispositivo	Impacto visual	Impacto sonoro	Calificación
Columna de agua oscilante	2	1	1,5
Wave Dragon	4	2	3
Pelamis	4	4	4
Power buoy Mark 3	4	4	4

Wave Star	3	4	<b>3,5</b>
Oyster	4	4	<b>4</b>
The Pinguin	4	4	<b>4</b>
AWS-III	4	4	<b>4</b>
CETO 5	5	5	<b>5</b>
WERPO	3	1	<b>2</b>
UTN BA-FRBA	3	4	<b>3,5</b>

Tabla 17. Impacto ambiental. Fuente: elaboración propia.

Se otorga la mejor calificación al dispositivo CETO 5 debido a que se encuentra sumergido por completo. Los dispositivos que se encuentran en aguas profundas como Plamis, por ejemplo, son prácticamente imperceptibles desde la costa.

### 3.7. Etapa 6: Selección de dispositivos

Como se mencionó anteriormente, la energía undimotriz es una tecnología en estado de desarrollo, por lo tanto no se ha logrado utilizar criterios de selección respaldados con cálculos técnico-económicos y se han establecido criterios a partir de la información disponible.

A partir de los mencionados criterios de selección se han calificado 11 tecnologías. A continuación se presenta en la tabla 18, la matriz de selección:

	Desarrollo de la tecnología	Simplicidad de la instalación	Simplicidad del mantenimiento	Supervivencia	Impacto ambiental	Suma total
Ponderación/ Dispositivo	0,3	0,2	0,2	0,25	0,05	1
Columna de agua oscilante	5	4	5	1	1,5	<b>3,6</b>
Wave Dragon	4	1	1	1	3	<b>2,0</b>
Pelamis	1	1	1	5	4	<b>2,2</b>
Power buoy Mark 3	4	1	1	3	4	<b>2,6</b>
Wave Star	5	3	3,5	4	3,5	<b>4,0</b>
Oyster	4	3	2	4	4	<b>3,4</b>
The Pinguin	3	2	3	3	4	<b>2,9</b>
AWS-III	2	1	1	3	4	<b>2,0</b>
CETO 5	5	1	1	5	5	<b>3,4</b>
WERPO	4	4	4	1	2	<b>3,2</b>
UTN BA-FRBA	2	3	3,5	4	3,5	<b>3,1</b>

Tabla 18. Matriz de Selección de convertidor de la Energía Undimotriz. Fuente: Elaboración propia.

Una vez calificados los convertidores de energía undimotriz y afectado cada criterio por su correspondiente ponderación, se obtiene la calificación final. En la tabla 19, se ordenan los dispositivos de mayor a menor calificación.

	Suma total
<b>Wave Star</b>	<b>4,0</b>
Columna de agua oscilante	3,6
Oyster	3,4
CETO 5	3,4
WERPO	3,2
UTN-FRBA	3,1
The Pinguin	2,9
Power buoy Mark 3	2,6
Pelamis	2,2
Wave Dragon	2,0
AWS-III	2,0

Tabla 19. Posición de cada uno de los dispositivos. Fuente: elaboración propia.

En base a los criterios de selección planteados, la tecnología más apta para la ciudad de Mar del Plata es el convertidor **Wave Star**. Entre las principales ventajas de este convertidor es posible mencionar:

- ❖ Su diseño ha atravesado más de 1.300 pruebas de funcionamiento.
- ❖ La instalación se realiza en aguas intermedias, además, podría instalarse la estación convertidora de energía undimotriz sobre la escollera sur de la ciudad de Mar del Plata. No requiere de cableado submarino.
- ❖ La boya aprovecha el movimiento de las ondas marinas, mientras que el sistema de conversión no se encuentra en contacto con el agua. Esto facilita su mantenimiento.
- ❖ Posee un mecanismo de emergencia, que le permite elevar las boyas durante tormentas.
- ❖ Su impacto sonoro es prácticamente nulo.

Por otro lado, es importante destacar que se trata de una tecnología que permite la repetición, es decir, es posible agregar boyas y por lo tanto extraer mayor cantidad de energía.

Finalmente, todas las tecnologías disponibles actualmente en el mercado fueron diseñadas en función al lugar donde se instalaron. Por lo tanto, todos los convertidores deberían sufrir adaptaciones de diseño antes de poder instalarse en la ciudad de Mar del Plata.

El único dispositivo diseñado en función de las características del recurso marítimo de Buenos Aires, más precisamente del puerto de Quequén, es el convertidor de energía undimotriz que está desarrollando el grupo de investigación de la Universidad Tecnológica Nacional - Facultad Regional Buenos Aires. Sin embargo, dicho proyecto aún no finalizó el diseño de la escala 1:1 y es por este motivo que la puntuación obtenida lo ubica en el sexto lugar. De todos modos, debe seguirse de cerca este proyecto ya que, si sobrepasa la instancia de prueba, sería el dispositivo más apto para la ciudad de Mar del Plata.

## IV. Conclusión

Es momento de buscar fuentes de energía alternativas a las convencionales y a partir del presente trabajo se ha demostrado que la Energía Undimotriz es una fuente de energía renovable, predecible y con un enorme potencial en comparación con otras fuentes de energía renovables.

Frente a la enorme oportunidad de aprovechar este tipo de energía queda en evidencia la necesidad de comenzar a conocer los parámetros del mar relacionados con las ondas marinas, la altura y el período. La ciudad de Mar del Plata no posee un registro de datos certeros sobre estos parámetros. Esta situación debe revertirse para evaluar con más certeza las zonas apropiadas para el aprovechamiento de la energía undimotriz.

Según los cálculos aproximados obtenidos en el presente trabajo, la ciudad de Mar del Plata posee un potencial energético de  $34,5 \frac{Kw}{m}$ . La zona seleccionada para la instalación de dispositivos undimotrices es sobre la escollera sur del puerto de la ciudad de Mar del

Plata, esta zona se ubica a una distancia de 1,4 km de la costa, con profundidades que varían entre los 3m a los 8m.

La energía Undimotriz, es aún una tecnología incipiente. Existen numerosos conceptos de convertidores, con grandes variaciones entre ellos y cada uno diseñado en función del mar donde se desea instalar. Hasta el momento no existe una tecnología definida como óptima, todos los investigadores compiten para obtener mejor rendimiento.

En base a los criterios de selección planteados, se han calificado 11 tecnologías disponibles en el mercado. Como resultado del proceso de toma de decisiones la tecnología que se recomienda para la ciudad de Mar del Plata es el convertidor Wave Star.

De todos modos, es importante conocer con el paso de los años la evolución del dispositivo de la UTN-FRBA. Al igual que el Wave Star el dispositivo Nacional, utiliza una boya que aprovecha la energía potencial de las ondas. La diferencia entre ambos convertidores radica en que Wave Star aprovecha la energía potencial, la convierte en energía hidráulica y, posteriormente acciona una turbina acopala a un generador. Mientras que el convertidor Argentino, aprovecha la energía mecánico-eléctrica. Esto representa una ventaja debido a que pasar de un tipo de energía a otra tiene asociado un rendimiento.

Queda mucho camino por recorrer antes de que la Energía Undimotriz sea competitiva económicamente con otras fuentes de energía renovable, pero para conseguirlo debe invertirse en investigación. No es casualidad que de las 11 tecnologías descritas en el presente trabajo, 5 eran de origen Escoces, este país recibe grandes subsidios del estado para contribuir al desarrollo tecnológico.

## V. Recomendaciones

- ❖ En primer lugar, es de vital importancia comenzar a conocer el mar Argentino, concretamente parámetros como periodo y altura de onda. Contamos con un recurso ilimitado y determinar su verdadero potencial es el punto de partida para conseguir el aprovechamiento de la energía undimotriz.
- ❖ En segundo lugar, debe prestarse especial atención a la evolución de 4 tecnologías:
  - Wave Star
  - Columna de Agua Oscilante
  - CETO 5
  - Dispositivo Undimotriz Argentino, grupo de investigación UTN-FRBA
- ❖ Finalmente, en tercer lugar, debe realizarse la selección del dispositivo más apto para la ciudad de Mar del Plata en base a la factibilidad económica.

## VI. Bibliografía

- Aquamarine Power. (2015). *Aquamarine Power*. Recuperado el 05 de 09 de 2015, de <http://www.aquamarinepower.com/>
- Carnegie Wave Energy. (2015). *Carnegie Wave*. Recuperado el 20 de 09 de 2015, de <http://carnegiewave.com/>
- Catálogo GEMA. (2014). *Catálogo de energías del mar*. Buenos Aires, Argentina.
- Chozas, J. F. (2008). *Una aproximación al aprovechamiento de la energía de las olas para la generación de electricidad*.
- CIIFEN. (s.f.). *Centro Internacional para la investigación del Fenómeno de EL Niño*. Obtenido de <http://www.ciifen.org/>
- Drew, Plummer, Sahinkaya. (2009). *A review of wave energy converter technology*. Bath, UK.
- EOI Escuela de negocios. (s.f.). *Energías del mar*. Madrid.

- Ex Secretarios de Energía. (2014). *Argentina debe modificar su matriz energética*. Resumen ejecutivo, Buenos Aires.
- Fernandez Chozas, J. (4 de mayo de 2015). Dinamarca por la Energía Undimotriz. (Twenergy, Entrevistador) <https://www.youtube.com/watch?v=ylnr7dCclIs>, España.
- González, J. A. (2014). *Estudio experimental y analítico del diseño de OWC para el aprovechamiento de la energía del oleaje*. México D.F.
- Grupo de investigación Energía Undimotriz UTN. (2011). *Aprovechamiento de la Energía Undimotriz en el Mar Argentino*. Buenos Aires.
- Grupo de Investigación Undimotriz UTN-FRBA. (2015). Energías Marina. CAEII. Mar del Plata.
- Haim, I. A. (2011). *Energía Undimotriz*. Facultad Regional de Buenos Aires. Universidad Tecnológica Nacional, Departamento de Ingeniería Mecánica., Buenos Aires.
- <http://comunidad.eduambiental.org/>. (s.f.). Obtenido de <http://comunidad.eduambiental.org/file.php/1/curso/contenidos/docpdf/capitulo22.pdf>
- <http://energia-nuclear.net/>. (s.f.). <http://energia-nuclear.net/>. Obtenido de <http://energia-nuclear.net/que-es-la-energia-nuclear/historia>
- Iglesias, G., Alvarez, M. and García, P. (2011). *WAVE ENERGY CONVERTERS*. Lugo Spain: Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS).
- Instituto Max Planck. (22 de Mayo de 2012). *Probability of contamination from severe nuclear reactor accidents is higher than expected*. Recuperado el 29 de Mayo de 2015, de Max-Planck-Gesells Chaft: [http://www.mpg.de/5809418/reactor\\_accidents](http://www.mpg.de/5809418/reactor_accidents)
- Kliksberg, B. (11 de Diciembre de 2011). El apartheid climático. *Página 12*, págs. [http://www.pagina12.com.ar/especiales/archivo/bernardo\\_kliksberg/011-KLIKSBURG.pdf](http://www.pagina12.com.ar/especiales/archivo/bernardo_kliksberg/011-KLIKSBURG.pdf).
- Leff, E. (2004). Racionalidad Ambiental. En E. Leff, *Racionalidad Ambiental*. Mexico: Siglo XXI.
- Legaz, R. (Compositor). (2011). Energías Marinas. [R. Legaz, Intérprete, & A. d. Renovables, Dirección] Santander, España.
- Lizano R., O. G. (2003). *Técnicas de pronóstico de oleaje para las costas de Costa Rica*.
- Oceam Power Technology. (s.f.). *Oceam Power Technologies*. Recuperado el 10 de 09 de 2015, de <http://www.oceanpowertech.com/>

- Pelissero, M., Haim, P. A., Oliveto, G., Galia, F., & Tula, R. (2011). *Aprovechamiento de la Energía Undimotriz*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
- Pelissero, M., Haim, P. A., Oliveto, G., Galia, F., & Tula, R. (2011). *Aprovechamiento de la Energía Undimotriz*. Ciudad Autónoma de Buenos Aires.
- Power Technology. (2015). Perth Wave Energy Project, Australia. <http://www.power-technology.com/projects/perth-wave-energy-project/>.
- Prario, B. (20 de 03 de 2015). Situación actual de la costa marplatense. (S. Díaz Vélez, Entrevistador)
- Renewable Energy Focus. (14 de 07 de 2014). AWS Ocean Energy conducts wave power generator test.
- Robbins/Coulter. (2005). Administración. En R. y. Coulter, *Administración, octava edición* (págs. 133-156). México: Pearson.
- Secretaría de Energía de la Nación. (s.f.). *Secretaría de Energía*. Recuperado el 2015, de <http://www.energia.gov.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3366>
- Tedesco, C. (6 de Junio de 2009). *www.enernews.com*. Recuperado el 7 de 13 de 2015, de [www.enernews.com](http://www.enernews.com/nota/213148/turbina-argentina-para-la-energia-mareomotriz): <http://www.enernews.com/nota/213148/turbina-argentina-para-la-energia-mareomotriz>
- The European Marine Energy Centre. (2015). *EMEC Orkney*. Recuperado el 2 de 9 de 2015, de <http://www.emec.org.uk/>
- The Scotsman. (14 de 02 de 2015). Pelamis had debts of £15m following collapse. *The Scotsman*.
- Wave Dragon. (2009). *WaveDragon.net*. Recuperado el 07 de 09 de 2015, de <http://www.wavedragon.net/>
- Wave Star. (2015). *Wave Star Energy*. Recuperado el 19 de 9 de 2015, de <http://wavestarenergy.com/>
- Waveplan. (2009). *Wave Energy: State of the art*.
- Wello Oy. (2015). *Wello Oy*. Recuperado el 07 de 09 de 2015, de <http://www.wello.eu/en/penguin>
- WERPO. (2015). *WERPO*. Recuperado el 16 de 09 de 2015, de <http://werpo.us/>

## VII. Anexo I: Datos de altura de ondas.

Se presenta a continuación los cálculos de altura máxima, mínima y promedio en los meses comprendidos entre enero de 2014 y agosto de 2015. Los datos se obtuvieron a partir de la página Windguru.

Mes	Hmax (m)	Hmin (m)	Hprom (m)
ene-14	4	0,8	1,6
feb-14	2,9	0,9	1,5
mar-14	4,2	0,9	1,7
abr-14	5,6	1,1	2,0
may-14	3,1	0,9	1,6
jun-14	4	0,7	1,7
jul-14	4	1	1,8
ago-14	6	0,6	2,0
sep-14	3,6	0,8	1,7
oct-14	3,2	0,7	1,5
nov-14	5	0,9	1,6
dic-14	2,7	0,9	1,4
ene-15	3,4	0,8	1,5
feb-15	2,4	0,8	1,3
mar-15	3,3	0,7	1,2
abr-15	3,1	0,6	1,3

may-15	4,2	0,4	1,3
jun-15	3,8	0,7	1,6
jul-15	2,3	0,7	1,3
ago-15	4,4	0,7	1,8

Tabla 20. Datos de altura máxima, mínima y promedio por mes. Datos: windguru

A continuación se presentan la altura y frecuencia registrada durante el periodo seleccionado.

ALTURA (m)	FRECUENCIA
0,4	3
0,5	1
0,6	12
0,7	33
0,8	81
0,9	118
1	152
1,1	200
1,2	237
1,3	191
1,4	190
1,5	196
1,6	171
1,7	145
1,8	124
1,9	92
2	74
2,1	54
2,2	74
2,3	45
2,4	36
2,5	31
2,6	24

2,7	22
2,8	15

Tabla 21. Datos de altura de onda 1.

ALTURA (m)	FRECUENCIA
2,9	16
3	14
3,1	11
3,2	9
3,3	10
3,4	8
3,5	1
3,6	6

3,7	3
3,8	3
3,9	2
4	6
4,1	2
4,2	2
4,3	3
4,4	1
4,6	1
4,7	2
5	1
5,1	1
5,2	1
5,6	1
5,7	1
6	1

Tabla 22. Datos de altura de onda 2.

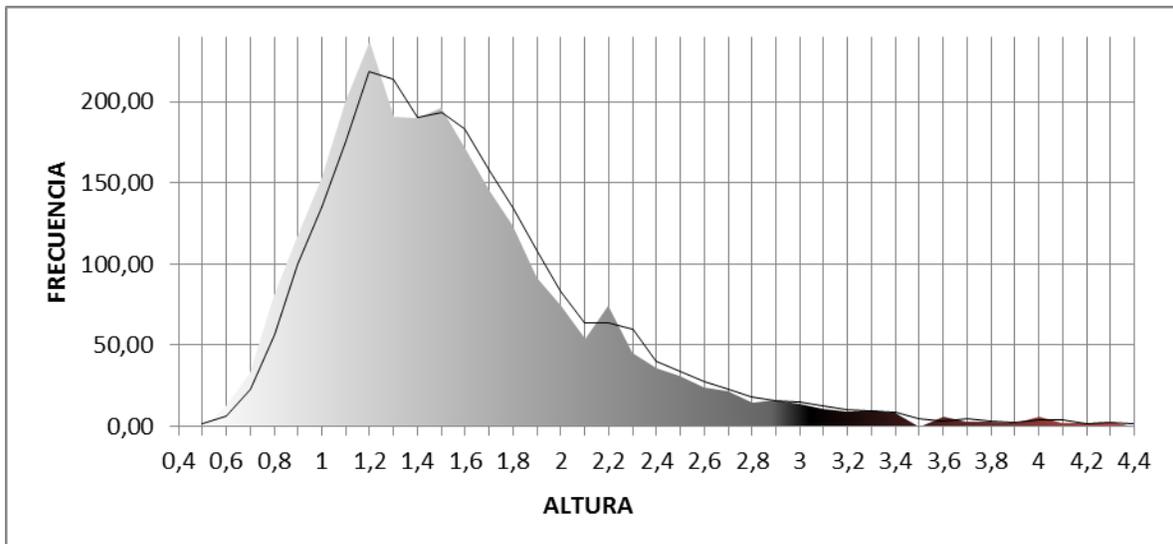


Figura 28. Gráfico de distribución de frecuencia. Fuente: elaboración propia. Datos: Windguru

Considerando el promedio del tercio más alto, se obtiene la altura significativa. Los valores máximo, mínimo, promedio y significativo de la onda en todo el periodo considerado se resumen en la tabla 28.

Altura mínima	0,4 m
Altura Máxima	6 m
Altura Promedio	1,6 m
Altura Significativa	2,1 m

Tabla 23. Resumen de valores de altura de onda en la ciudad de Mar del Plata.  
Fuente: elaboración propia.

## VIII. Anexo II: Datos de periodo de ondas

Análogamente al anexo I, se presenta en el Anexo II, los valores de periodo máximo, mínimo y promedio en la ciudad de Mar del Plata, en los meses comprendidos entre enero de 2014 y agosto de 2015. Los datos se obtuvieron de la página Windguru.

Mes	$T_{\max}$	$T_{\min}$	$T_{\text{prom}}$
ene-14	13	5	8
feb-14	13,0	4	8
mar-14	12	5	8
abr-14	13	6	9
may-14	14	5	9
jun-14	12	5	8
jul-14	12	5	9
ago-14	14	5	9
sep-14	11	5	9
oct-14	12	5	8
nov-14	11	5	8
dic-14	12	5	8
ene-15	13	5	8
feb-15	14	5	8
mar-15	11	5	8
abr-15	12	4	8
may-15	12	4	9
jun-15	14	5	8
jul-15	13	4	8
ago-15	12	5	9

Tabla 24. Datos de periodo máximo, mínimo y promedio por mes. Datos: windguru

A partir de los cálculos correspondientes, se obtienen los valores de periodo máximo, mínimo y promedio de Mar del Plata para la muestra de datos considerada.

$T_{\max}$	14 s
$T_{\min}$	4 s
$T_{\text{prom}}$	8 s

Tabla 25. Resumen de valores de periodo de onda en la ciudad de Mar del Plata.  
Fuente: elaboración propia.