



**UNIVERSIDAD DE TALCA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**EVALUACIÓN TÉCNICA Y ECONÓMICA DE LA IMPLEMENTACIÓN  
DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA BASADO EN LA  
ENERGÍA UNDIMOTRIZ PARA EL SECTOR DE CONSTITUCIÓN**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**PROFESOR GUÍA: JORGE HINOJOSA**

**MARX FELIPE SALAZAR ZÚÑIGA**

**CURICÓ - CHILE**

**2018**

## CONSTANCIA

La Dirección del Sistema de Bibliotecas a través de su encargado Biblioteca Campus Curicó certifica que el autor del siguiente trabajo de titulación ha firmado su autorización para la reproducción en forma total o parcial e ilimitada del mismo.



Two circular official stamps and handwritten signatures in blue ink. The left stamp is from the 'DIRECCIÓN SISTEMA DE BIBLIOTECAS' of the 'UNIVERSIDAD DE TALCA'. The right stamp is from the 'SISTEMA DE BIBLIOTECAS CAMPUS CURICO' of the 'UNIVERSIDAD DE TALCA'.

Curicó, 2022

## **Resumen**

El objetivo de este estudio es evaluar la factibilidad técnica y económica de la implementación de un sistema de generación eléctrico basado en la energía undimotriz para el sector de Constitución. Para ello en primer lugar se realizó una caracterización del sector, extrayendo los datos característicos de las olas del Explorador de Energía Marina, así se seleccionó un punto en la costa de Constitución, el segundo a 1 km del Faro Carranza y el último a 50 km de la Caleta Pellines. Luego se seleccionaron 3 dispositivos diferentes y se calculó el potencial eléctrico teórico que estos lograrían convertir para una planta de 20 MW instalada en los lugares caracterizados. Finalmente se evaluó económicamente esta implementación comparando y analizando los resultados.

Una planta de 20 MW de energía undimotriz para el sector de Constitución no es rentable, si bien, plantas de mayor capacidad pueden alcanzar la rentabilidad en tiempos prudentes esto representa un alto riesgo por el gran tamaño de la inversión.

**Palabras claves:** Energía undimotriz, energía de las olas, energías renovables no convencionales (ERNC), conversor undimotriz.

## **Abstract**

The purpose of this study is the evaluation of the technical and economic factibility at the implementation of an “electrical generation system based on wave energy for *Constitucion*”. To start, a characterization of the sector was made, extracting the waves’s characteristics from the *Explorador de Energías Marinas*, then selecting the first point on the coast of *Constitucion*, the second at 1 km of the Carranza Lighthouse and the last one 50 km from the Pellines fishing creek. Then, 3 different devices were selected, and the theoretical-electric potential was calculated for a 20 MW plant installed in the characterized places. Finally, this implementation was evaluated economically.

A plant of 20 MW of wave energy to *Constitucion* is not profitable, although, larger plants can achieve profitability in prudent time, this could be too risk due to the large amount of the investment.

**Keywords:** Wave energy, nonconventional renewable energies (NCRE), wave energy converter (WEC).

# ÍNDICE GENERAL

<b>1. CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
<b>1.1 ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN</b>	<b>2</b>
1.1.1 La energía marina en el mundo	2
1.1.2 La situación energética chilena	2
1.1.3 Capacidad energética marina en Chile	3
1.1.4 Emplazamiento	4
<b>1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA</b>	<b>5</b>
<b>1.3 SOLUCIÓN PROPUESTA</b>	<b>5</b>
<b>1.4 OBJETIVO GENERAL</b>	<b>6</b>
1.4.1 Objetivos específicos	6
<b>1.5 ALCANCES</b>	<b>6</b>
<b>1.6 RESULTADOS TANGIBLES ESPERADOS</b>	<b>7</b>
<b>1.7 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO</b>	<b>7</b>
1.7.1 Marco teórico	7
1.7.2 Caracterización del potencial undimotriz en la zona de constitución	7
1.7.3 Selección de dispositivos	8
1.7.4 Cálculo de potencia y evaluación económica	8
1.7.5 Conclusión	8
<b>2. CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO</b>	<b>9</b>
<b>2.1 ENERGÍAS MARINAS</b>	<b>10</b>
2.1.1 Undimotriz	10
<b>2.2 ENERGÍA DE LAS OLAS</b>	<b>10</b>
2.2.1 Nomenclatura de las olas	11
<b>2.3 UNDIMOTRIZ: TIPOS DE DISPOSITIVOS DE CAPTACIÓN (WEC)</b>	<b>15</b>
2.3.1 Clasificación de captadores según su ubicación	16
2.3.2 Clasificación según su tamaño y orientación	18
2.3.3 Clasificación según su principio de operación	20
<b>2.4 ESTADO ACTUAL DE LA TECNOLOGÍA</b>	<b>27</b>

2.4.1	Costos de la tecnología	27
<b>2.5</b>	<b>TRATAMIENTO DE DATOS</b>	<b>29</b>
<b>2.6</b>	<b>CÁLCULO DE POTENCIA</b>	<b>30</b>
2.6.1	Factor de planta	31
2.6.2	Factor de planta mínimo rentable	32
<b>2.7</b>	<b>EVALUACIÓN ECONÓMICA</b>	<b>34</b>
2.7.1	Valor actual neto (VAN) y tasa interna de retorno (TIR)	34
<b>3.</b>	<b>CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN DEL POTENCIAL UNDIMOTRIZ EN LA ZONA DE CONSTITUCIÓN</b>	<b>36</b>
3.1	UBICACIÓN <i>ONSHORE</i>	40
3.2	UBICACIÓN <i>NEARSHORE</i>	43
3.3	UBICACIÓN <i>OFFSHORE</i>	45
<b>4.</b>	<b>CAPÍTULO 4: SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS</b>	<b>48</b>
<b>4.1</b>	<b>OWC PICO PLANT</b>	<b>50</b>
4.1.1	Inversión en OWC	50
4.1.2	Matriz de poder	51
<b>4.2</b>	<b>WAVE DRAGON</b>	<b>52</b>
4.2.1	Costos de la tecnología	53
4.2.2	Matriz de poder	54
<b>4.3</b>	<b>PELAMIS WAVE POWER</b>	<b>55</b>
4.3.1	Inversión de Pelamis	55
4.3.2	Matriz de poder	56
<b>4.4</b>	<b>RESUMEN DE DISPOSITIVOS SELECCIONADOS</b>	<b>57</b>
<b>5.</b>	<b>CAPÍTULO 5: CÁLCULO DE POTENCIA Y EVALUACIÓN ECONÓMICA</b>	<b>59</b>
<b>5.1</b>	<b>CÁLCULO DE POTENCIA</b>	<b>60</b>
<b>5.2</b>	<b>EVALUACIÓN ECONÓMICA</b>	<b>65</b>
<b>5.3</b>	<b>EVALUACIÓN AMBIENTAL</b>	<b>71</b>
<b>6.</b>	<b>CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES</b>	<b>73</b>

<b>7. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>77</b>
<b>8. ANEXOS</b>	<b>80</b>
<b>A. DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO DE DISCRETIZACIÓN</b>	<b>81</b>
<b>B. PROFUNDIDADES</b>	<b>82</b>
B.1 Paralelo 1: 35.593	82
B.2 Paralelo 2: 35.454	83
B.3 Paralelo 3: 35.287	84
B.4 Paralelo 4: 35.183	85
<b>C. IMPACTO AMBIENTAL DE UN DISPOSITIVO UNDIMOTRIZ</b>	<b>86</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1.1 Prioridades para el desarrollo de la energía marina en la Zona Centro y Centro Sur .....	4
TABLA 2.1 Clasificación de captadores de olas en función de sus características.....	26
TABLA 2.2 Estimaciones consideradas para la evaluación económica. ....	34
TABLA 3.1 Comparación de Puntos a Estudiar .....	39
TABLA 4.1 Estado de desarrollo de las tecnologías WEC.....	49
TABLA 4.2 Características principales Wave Dragon 7 MW .....	52
TABLA 4.3 Costos de instalación por capacidad instalada kW.....	53
TABLA 4.4 Costos de generación en kWh .....	53
TABLA 4.5 Presupuesto central Pelamis .....	56
TABLA 4.6 Comparación de dispositivos seleccionados .....	58
TABLA 5.1 Comparación de factores de planta y factores de planta mínimo rentable.....	61
TABLA 5.2 Comparación de VAN.....	65

## **CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN**

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

### 1.1 ANTECEDENTES Y MOTIVACIÓN

Las “Energías Renovables No Convencionales” (ERNC) viven hoy su mejor momento a nivel mundial. Desde el año 2010 que las inversiones netas para adiciones de capacidad de energías renovables superan a las inversiones en combustibles fósiles, añadiendo en 2015 un estimado de 147 GW de capacidad a nivel global, el mayor incremento anual jamás registrado a la fecha. También la inversión mundial alcanzó un récord (Sawin, Seyboth, & Sverrisson, 2016) y es cuestión de tiempo para que otras tecnologías, además de la solar y eólica, se disputen el mercado.

#### 1.1.1 La energía marina en el mundo

La situación actual de la energía marina a nivel mundial suele compararse con el desarrollo inicial de la energía eólica *offshore* que se produjo en la década de los 80 y 90. Desde entonces, el sector eólico en general ha crecido exponencialmente, incluyendo la tecnología *offshore*. Este último, solo en 2012 creció en un 33% (Unión Europea, 2014) manteniendo esta tasa de crecimiento hasta la fecha, por ejemplo, en 2015 alcanzó un 40%, con una capacidad total instalada a nivel mundial de 12 GW (Sawin et al., 2016).

Cabe insistir que el vuelco del mercado hacia las energías renovables ya se ha dado, por lo tanto, es de esperarse que el crecimiento de la energía marina sea más acelerado inclusive que el de la energía eólica, con el apoyo público adecuado en las etapas tempranas de desarrollo teniendo en cuenta, además, que gran parte de la tecnología está “migrando” del último al primero. (Karmenu Vella, 2016)

#### 1.1.2 La situación energética chilena

Chile tiene una alta dependencia energética debido a su matriz primordialmente basada en combustibles fósiles, de los que no dispone naturalmente más allá de Magallanes que produce lo necesario para su propio consumo.

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Sin embargo, hasta el año 2016 las energías renovables en Chile alcanzaron un 15% de la capacidad instalada y la adjudicación de más de la mitad de los proyectos licitados ese año. A este paso la meta para el 2050 (70% de la matriz compuesta por ERNC) no sólo se alcanzará, sino que se sobrepasará antes de lo señalado.

### 1.1.3 Capacidad energética marina en Chile

Los recursos de energía renovable totales de Chile son muy diversos. Dentro de estos se encuentran las energías oceánicas, donde sólo en energía de oleaje o undimotriz se estima un potencial teórico bruto de 240 GW (ver FIGURA 1.1) que se distribuyen desde 20 kW/m desde el norte a 50 kW/m a la región de los lagos.

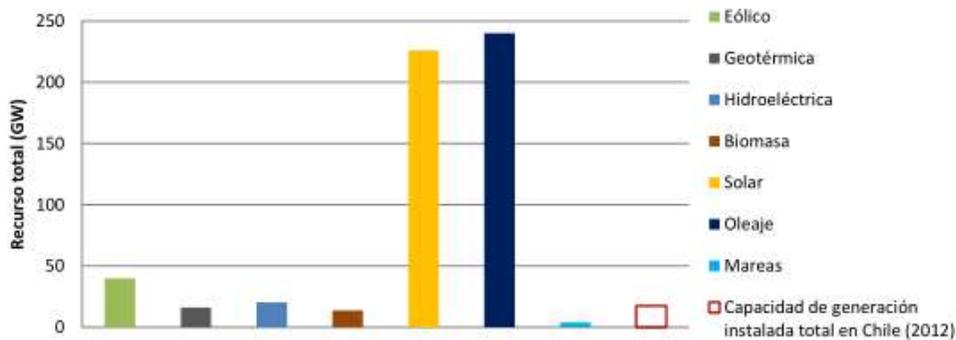


FIGURA 1.1 Recursos de energía renovable totales de Chile versus la capacidad de generación al 2012 (Davies, 2014)

Más hacia el sur los niveles de energía mar adentro son incluso más altos, pero como las tecnologías aún no se han desarrollado estos sectores se ven inaccesibles.

Se estima que toda la costa chilena es apta para el desarrollo de las energías marinas, con más de 4.000 km de costa y considerando la geografía angosta, que lo hace concentrar la demanda energética relativamente cerca del mar. Si a esto se suma la etapa actual de las energías marinas a nivel mundial, sitúa a Chile como el país óptimo para la aplicación, estudio y desarrollo de estas tecnologías.

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

### 1.1.4 Emplazamiento

Considerando el rol social y la influencia que debe tener una universidad de región en el desarrollo local es que siempre se pensó el emplazamiento de este proyecto en la región del Maule, aunque toda la costa chilena es apta para la explotación de la energía undimotriz, pero si el objetivo es al mediano plazo lograr que el país sea competitivo en la materia, es necesario designar lugares estratégicos para comenzar con el desarrollo experimental de estas.

En un informe realizado por Aquatera para el Gobierno de Chile en 2014, con el fin de establecer las bases de un plan de acción para el desarrollo de las energías marinas, se menciona que, es preciso establecer áreas prioritarias para cada región. En dicho estudio, desde Valparaíso hasta Los Ríos se considera como la Zona Centro y Centro Sur, en la TABLA 1.1 se resumen las prioridades para el desarrollo de la energía marina en esta zona, con el fin de ver los potenciales prioritarios en la Región del Maule.

*TABLA 1.1 Prioridades para el desarrollo de la energía marina en la Zona Centro y Centro Sur (Davies, 2014)*

Zona Centro y Centro Sur		Clave:	Buen potencial	Cierto potencial	Poco o sin potencial
<b>Tecnología</b>	Proyectos mareomotrices a pequeña escala	Proyectos mareomotrices a escala grande	Proyectos undimotrices a pequeña escala	Proyectos undimotrices a escala grande	Fabricación de dispositivos
<b>Mercados Energéticos</b>	Red eléctrica	Desalinización y bombeo de agua para la minería	Desalinización de agua para comunidades aisladas	Energía para comunidades aisladas	Acuicultura (salmón)

La Zona Centro y Centro Sur no posee un gran potencial mareomotriz a pequeña ni gran escala, pero el potencial undimotriz es alto, como el potencial para la fabricación de dispositivos. Cabe destacar que esta es la única zona con esta característica según ese estudio. Esto resulta interesante pues la zona centro sur del país puede tener un rol importante en el desarrollo de esta tecnología, lo que puede ser una motivación adicional para la exploración undimotriz en la región.

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Dentro de la región del Maule y como se sugiere en este estudio es preciso designar una zona con una densidad poblacional y uso de borde costero alto. Constitución es la ciudad costera más importante de la Región del Maule, la de mayor densidad poblacional y también mayor actividad costera, posee una fuerte industrialización y crecimiento demográfico por lo que su demanda energética se encuentra en constante aumento. Junto a lo anterior se debe señalar que Constitución cuenta con un importante muelle que facilitaría la eventual extracción y mantenimiento de los dispositivos que se instalasen mar adentro. Además, es la localidad con una subestación más cercana a la costa que, si bien no será considerado en este estudio, disminuiría los costos de transmisión desde la planta a la inyección al SIC. Es por estas razones que se escoge la zona de Constitución para este análisis.

### 1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

La matriz energética en Chile es primordialmente a base de petróleo o derivados. Esto le genera costos económicos y ambientales cada vez mayores al país. Por lo que va tomando importancia considerar otras fuentes energéticas que brinden mayor independencia, preferiblemente que otorguen la oportunidad de producir y desarrollar los dispositivos, además de disponer de estas fuentes de forma natural.

### 1.3 SOLUCIÓN PROPUESTA

Actualmente la energía marina está en fase pre-comercial en el mundo. La oportunidad que esto le ofrece a Chile para convertirse en pionero en el desarrollo de estas tecnologías es insuperable. Sobre todo, si se considera lo angosto de este territorio, en comparación a otros países que han incursionado en tipos de generación *offshore*.

La Región del Maule asumiría un rol clave en el desarrollo de la energía undimotriz, pero antes de iniciar cualquier inversión en estas tecnologías, es necesario tener una idea del punto en que se vuelven técnica y económicamente viables.

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

Para identificar y designar áreas con potencial para la energía undimotriz en el Maule es necesario situarse en una zona costera que brinde argumentos que faciliten la proyección de estas tecnologías en la zona. Constitución, dentro de la región, es la localidad con mayores argumentos para la exploración de las energías marinas.

### **1.4 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar la factibilidad técnica y económica de la implementación de un sistema de generación eléctrica basado en la energía undimotriz para el sector de Constitución.

#### **1.4.1 Objetivos Específicos**

*1.4.1.1 Caracterización del potencial undimotriz en la zona de Constitución.*

*1.4.1.2 Discriminar tipos de captador undimotriz apropiados para la caracterización realizada.*

*1.4.1.3 Comparación de los diferentes tipos de tecnologías seleccionadas.*

*1.4.1.4 Calcular el potencial eléctrico teórico según las tecnologías seleccionadas.*

*1.4.1.5 Estimar desde el punto de vista económico la implementación de los captadores eléctricos seleccionados.*

### **1.5 ALCANCES**

El presente proyecto no considera la construcción ni implementación de las tecnologías estudiadas, pues el tiempo que esto tomaría excede los plazos disponibles. Para evitar que el informe se extienda demasiado, se centrará en el análisis de la energía undimotriz, por ser esta la mayor disponible en el país.

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

La caracterización de la zona se realizará a través de datos teóricos. Los cálculos y estimaciones de esta investigación también serán sólo teóricos, no se hará ninguna instalación física en la zona para el levantamiento de datos o mediciones empíricas, pues para esto se necesita más tiempo que el destinado a una memoria de pregrado.

El objetivo final de este estudio será el análisis técnico y económico del proyecto, estimando los costos relacionados con la inversión y operación de la planta a un nivel de anteproyecto con una precisión del 80%.

### **1.6 RESULTADOS TANGIBLES ESPERADOS**

Un Estudio de factibilidad técnica y económica de la aplicación de una central generadora de energía eléctrica undimotriz proyectada para Constitución.

Un programa que automatice la discretización de los datos de olas características y cálculo de potencia facilitando su análisis para la aplicación de proyectos undimotrices en otros sectores de Chile.

### **1.7 ORGANIZACIÓN DEL DOCUMENTO**

#### **1.7.1 Marco Teórico**

Delimita los conceptos y consideraciones necesarias de dominar para comprender el funcionamiento tanto de la energía de las olas como las tecnologías que las aprovechan, sus diferentes clasificaciones y cómo se relacionan entre ellas.

#### **1.7.2 Caracterización del potencial undimotriz en la zona de Constitución**

Esto se realizará a través del Explorador de Energía Marina, desarrollado como parte de un Convenio de Cooperación entre el Ministerio de Energía y el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile. Este software tiene una precisión de 1 km (Facultad de ciencias físicas y

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

matemáticas de la Universidad de Chile, 2013). Esto se contrastará con datos geográficos como distancia y profundidad del mar extraído tanto de Google Earth Pro además de mapas de la zona para discriminar reservas y lugares protegidos o turísticos. Este objetivo se verifica con la selección y descripción de puntos a estudiar para diferentes ubicaciones de dispositivos.

### **1.7.3 Selección de dispositivos**

Acorde con el primer objetivo específico, se realiza un filtro entre las distintas tecnologías, definiendo criterios y parámetros de comparación para seleccionar convertidores que hayan alcanzado un cierto estado de avance. Finalizando con un análisis y comparación del funcionamiento de los diferentes convertidores seleccionados. Con esto se verifican los objetivos específicos dos y tres.

### **1.7.4 Cálculo de potencia y evaluación económica**

Se continua con el cálculo de potencia, esto trae consigo un cálculo de los ingresos percibidos tanto por venta de la energía como venta de bonos de carbono. Por lo que también se debe realizar un cálculo de toneladas de dióxido de carbono que se dejan de emitir por aplicar esta tecnología. Para finalmente realizar una evaluación económica a nivel de anteproyecto de las diferentes tecnologías seleccionadas y compararlas para seleccionar la más conveniente, siendo esto último el indicador del logro de los últimos dos objetivos específicos.

### **1.7.5 Conclusión**

Finalmente se verifican los indicadores que evalúan el logro de los objetivos y analizan los resultados de estos, conformando las conclusiones del estudio.

## **CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO**

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

### 2.1 ENERGÍAS MARINAS

El recurso de la Energía Marina o de los Océanos, se refiere al recurso de ERNC que utiliza como fuente la energía disponible en los océanos para el aprovechamiento humano. Esta abarca diferentes tipos de fuentes, como el movimiento de las olas (Undimotriz), la oscilación de las mareas (Mareomotriz), el flujo de corrientes marinas, los flujos de los estuarios y las variaciones de salinidad y temperatura.

#### 2.1.1 Undimotriz

Consisten en sistemas que aprovechan el movimiento oscilatorio de las olas. La Energía undimotriz no ha convergido todavía a una tecnología dominante, ya que existen distintos modelos de aprovechamiento energético y, por lo tanto, diferentes dispositivos. Su requerimiento principal es la presencia de olas, siendo óptimo su desempeño en zonas alejadas del Ecuador donde el recurso presenta un mayor potencial.

### 2.2 ENERGÍA DE LAS OLAS

Ola es todo el tipo de oscilación en la superficie del agua que sea periódico. En los océanos son originadas por diversas causas, entre ellas se encuentran el viento, las fuerzas de atracción gravitacional de la Luna y el Sol sobre las masas oceánicas, etc. Sin embargo, de todas ellas es el viento el que contribuye con la mayor densidad energética y genera las olas más comunes. Por esto se considera que las olas del mar son un derivado terciario de la energía solar. En resumen, las olas son el almacén, con una densidad relativamente alta, de la energía solar transmitida por el viento.

La particularidad de las olas es su capacidad de mantener las pérdidas energéticas relativamente bajas, inclusive recorrer grandes distancias puede ser provechoso para el crecimiento de estas, aunque el proceso de formación de las olas es complejo y no se conoce en su totalidad este puede resumirse de la siguiente forma: el viento incide sobre la superficie del mar, la fuerza de roce que se genera entre el aire y el agua modifica la superficie del océano, generando pequeños rizos, conocidos como olas de capilaridad. Estas dan lugar a una mayor superficie de contacto, la cual

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

incrementa la fricción entre agua y viento. A medida que aumenta el tamaño de la ola se facilita que el viento pueda ejercer una mayor fuerza sobre ella con el consiguiente incremento de esta. (González, Pérez, Santos, & Gil, 2009)

### 2.2.1 Nomenclatura de las Olas

Las olas se caracterizan por sus variables físicas y geométricas, como son la amplitud, altura, longitud de onda, periodo etc. Las que se definen en la FIGURA 2.1:

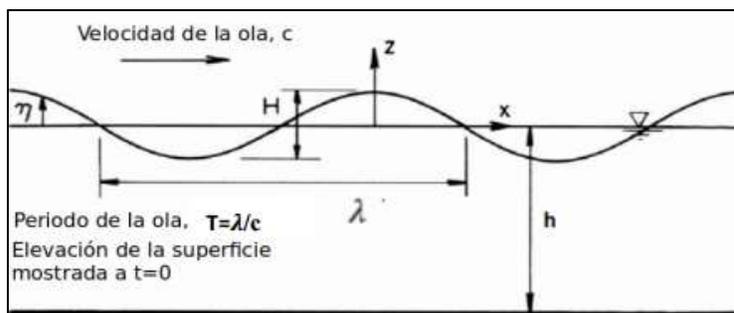


FIGURA 2.1 Características de una onda senoidal pura.  
(González et al., 2009)

En la FIGURA 2.1 se aprecian los diferentes factores que caracterizan una ola con su respectiva nomenclatura, los que se detallan a continuación:

- Longitud de onda ( $\lambda$ ): es la distancia horizontal entre dos crestas o dos depresiones sucesivas.
- Período (T): es el tiempo en segundos entre el paso de dos crestas sucesivas por un mismo punto.
- Altura ( $\eta$ ): distancia entre la cresta de la ola y el nivel medio del mar.
- Amplitud (H): distancia entre la cresta y el valle de la ola.
- Profundidad (h): distancia entre el fondo marino y el nivel medio del mar.

La frecuencia  $f$  de la ola se define como el número de oscilaciones de la superficie de la ola por segundo y es el inverso del periodo. Es decir:

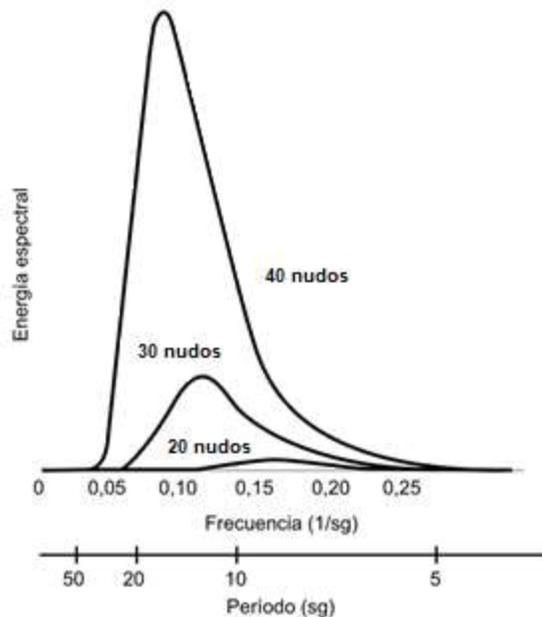
## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

$$f = 1/T \quad (2.1)$$

La velocidad de propagación  $c$  de una ola viene dada por el cociente entre la longitud de onda y el periodo:

$$c = \lambda/T \quad (2.2)$$

Las olas no crecen indefinidamente, la energía de la ola puede estar limitada por el alcance o por la duración de la velocidad del viento. Existe un alcance y duración mínima, para una velocidad del viento dada, en que la energía que adquiere el océano se equilibra con la energía que se pierde obteniéndose lo que se denomina “un océano en completo desarrollo” (ver FIGURA 2.2). Es decir, la altura de las olas alcanza un equilibrio bajo la acción del viento, es lo que se llama mar de viento. Esto es relevante al momento de diseñar estructuras costeras cuya respuesta a distintas condiciones de oleaje deben ser bien estudiadas.



*FIGURA 2.2 Espectro de energía de un océano en completo desarrollo. (González et al., 2009)*

En la FIGURA 2.2 se muestra el espectro de energía para un océano en completo desarrollo para diferentes velocidades del viento. A menor velocidad menor altura del espectro de energía, pero la ola aumenta su frecuencia (o disminuye su periodo).

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

El océano tampoco se compone de ondas senoidales puras, sino más bien son una superposición de muchas de ellas, cuya superficie puede ser reconstruida como la suma de ondas de amplitud variable, llamada análisis espectral. Es la superposición de estas ondas de velocidad, periodo, altura de onda y dirección propias, lo que se observa cuando se mira la superficie del mar. La envolvente de estas olas viaja a una velocidad distinta de la velocidad de las ondas individuales y se le denomina velocidad de grupo ( $c_g$ ).

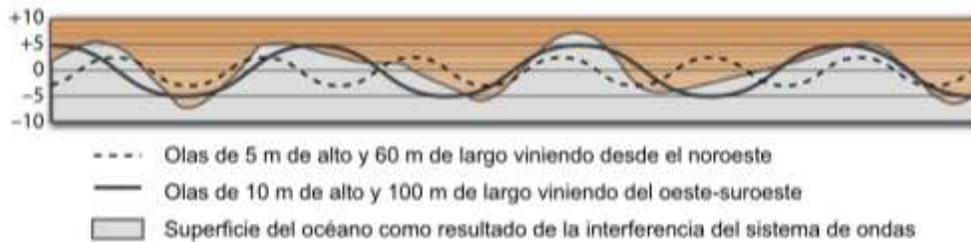


FIGURA 2.3 Superposición de ondas de un estado típico del mar. (González et al., 2009)

Una vez que las olas se alejan del área de generación, sus crestas son más lisas y menos caóticas. A este oleaje se le llama marejada de fondo. Estas olas se dispersan sobre la superficie oceánica con muy poca pérdida de energía, aunque pierden altura, fundamentalmente por dispersión angular como se muestra en la FIGURA 2.4.

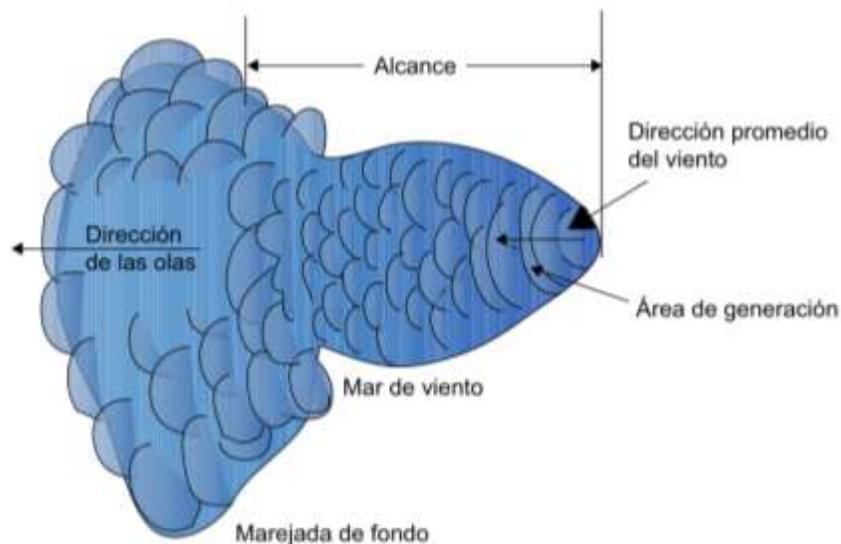


FIGURA 2.4 Marejada de fondo. (González et al., 2009)

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

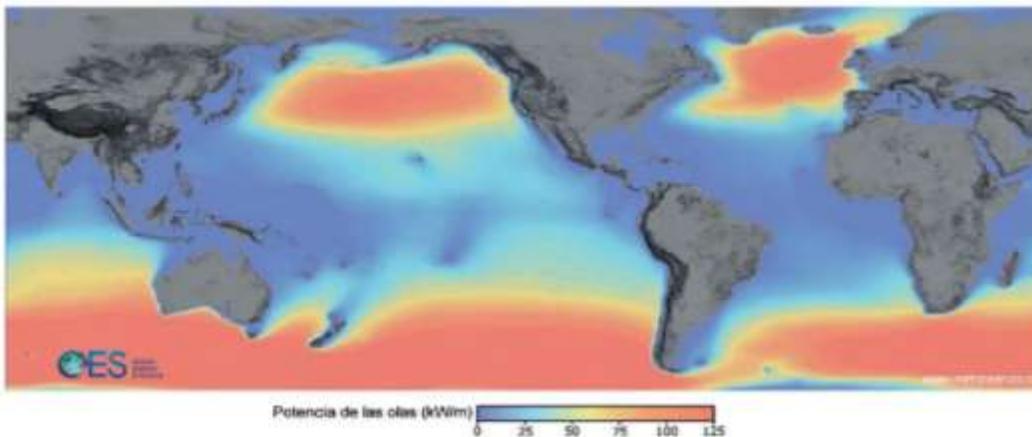
La potencia  $P$ , en kilowatt por metro de frente de ola kW/m, contenida en una ola oceánica idealizada (onda senoidal de amplitud constante, período y longitud de onda bien definidos) puede expresarse según la ecuación 2.3

$$P = \frac{g^2 \rho H^2 T}{32\pi} \left[ \frac{kW}{m} \right] \quad (2.3)$$

La potencia total en cada metro de frente de ola del mar irregular es la suma de las potencias de todos sus componentes. Evidentemente, es imposible medir todas las alturas y períodos de ondas independientemente, por tanto, para estimar la potencia total se utiliza una media. Y para estimar la potencia media total en kW/m se utiliza la ecuación 2.4.

$$P_s = 0.5 H_s^2 T_e \quad (2.4)$$

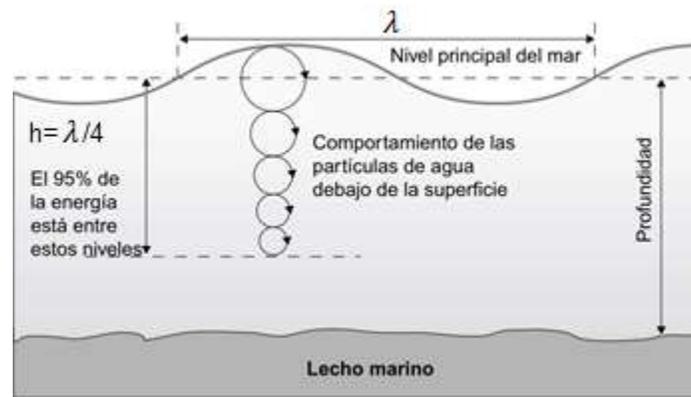
Como la mayoría de las fuentes renovables, la energía de las olas se encuentra distribuida en el globo terráqueo de forma desigual. La actividad de las olas se ve incrementada entre las latitudes de  $30^\circ$  y  $60^\circ$  en ambos hemisferios. Y Constitución se encuentra en el paralelo  $35^\circ$  Sur.



*FIGURA 2.5 Mapa potencial energía Undimotriz en el mundo. (Rojas Larco, 2009)*

A la hora de decidir cuánto debe introducirse, debajo de la superficie del mar un dispositivo de captación de energía del oleaje ha de tenerse presente que el 95% de la energía de una ola se encuentra en la franja comprendida entre la superficie y una profundidad de un cuarto de la longitud de onda  $\lambda$ .

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO



*FIGURA 2.6 Franja donde se encuentra el 95% de la energía de la ola. (González et al., 2009)*

A esto se debe que cuando las olas llegan a sectores en que la profundidad es menos que un cuarto de su longitud de onda, las pérdidas de energía se vuelven muy significativas. Las olas pierden gradualmente su potencia al acercarse a la costa debido a la fricción que se produce entre las partículas de agua más profundas y el fondo del mar.

### **2.3 UNDIMOTRIZ: TIPOS DE DISPOSITIVOS DE CAPTACIÓN (WEC)**

Al dispositivo diseñado para la captación de energía de las olas se le denomina “Convertor de Energía de las Olas (WEC)” lejos de converger a una tecnología dominante, con el tiempo se han diversificado tanto, sobre todo en la última década, que se ha llegado a contabilizar más de mil prototipos diferentes. (López Roper, Andreu, & Ceballos, 2015)

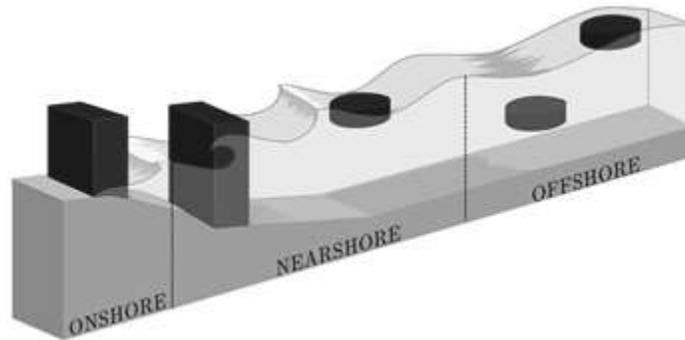
Si bien es cierto que no se tiene un preciso conocimiento sobre todos los desarrollos que se están llevando a cabo en todo el mundo, los dispositivos undimotrices se pueden clasificar en base a ciertas características como son su ubicación, su tamaño y el principio de operación que emplean.

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

### 2.3.1 Clasificación de captadores según su ubicación

Su distancia relativa a la costa entrega una idea cualitativa del potencial que son capaces de captar, entre otras características como mantenimiento, instalación y transmisión.

Como se muestra en la FIGURA 2.7 en función de la distancia en la que se ubiquen los captadores respecto a la línea costera, estos pueden ser catalogados como dispositivos ubicados en la costa (*Onshore*), situados cerca de la costa (*Nearshore*) y ubicados en mar abierto alejados de la costa (*Offshore*).



*FIGURA 2.7 Clasificación de los captadores de olas según su ubicación (Raúl Cáceres Sáez, 2016)*

#### 2.3.1.1 Onshore: Dispositivos ubicados en la costa

Este tipo de captadores se encuentran ubicados en tierra (o a muy pocos metros de ella) y suelen estar fijos al fondo marino, en aguas poco profundas o integrados en rompeolas, diques, o acantilados.

Para el aprovechamiento de la energía en movimiento es necesario generar dispositivos que tengan diferencia relativa de movimientos, para ello partes de la estructura van fijas, ancladas al fondo del mar o en la costa, de manera que la estructura principal no se mueve con el mar. El aprovechamiento energético se da porque el resto del aparato puede moverse solidariamente con las olas, y convertir la energía del oleaje en energía mecánica, la cual es generalmente transformada en energía eléctrica. Estos dispositivos son más fáciles de instalar y mantener que los dispositivos flotantes por su fácil acceso, aunque, presentan dos principales inconvenientes: El reducido número

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

de lugares costeros donde se puedan instalar y la baja disponibilidad energética de las zonas costeras.

### 2.3.1.2 *Nearshore: Dispositivos cercanos a la costa*

Estos captadores se instalan a unos pocos cientos de metros de distancia de la costa, en profundidades intermedias entre 10 y 25 m. Por lo general, suelen tratarse de estructuras flotantes o dispositivos fijos al fondo del mar, para así evitar amarres. Su estructura debe ser capaz de soportar la tensión que generan las olas sobre la misma cuando estas pasan sobre ellos.

### 2.3.1.3 *Offshore: Dispositivos en aguas profundas*

Para llegar a sectores que alcanzan unos 40 m de profundidad, estos dispositivos se instalan en zonas muy alejadas de la costa. Suelen ser estructuras flotantes o semisumergidas amarradas al fondo marino. Debido a su ubicación pueden aprovechar los niveles energéticos más altos de las olas, lo que conlleva, a su vez, a problemas de supervivencia y fiabilidad a causa de las grandes cargas estructurales que deben soportar. Es más, el mantenimiento de estos dispositivos resulta complicado y costoso por la dificultad de acceso a los mismos, sin olvidar que necesitan grandes longitudes de los caros cables submarinos para llevar la energía capturada a tierra.

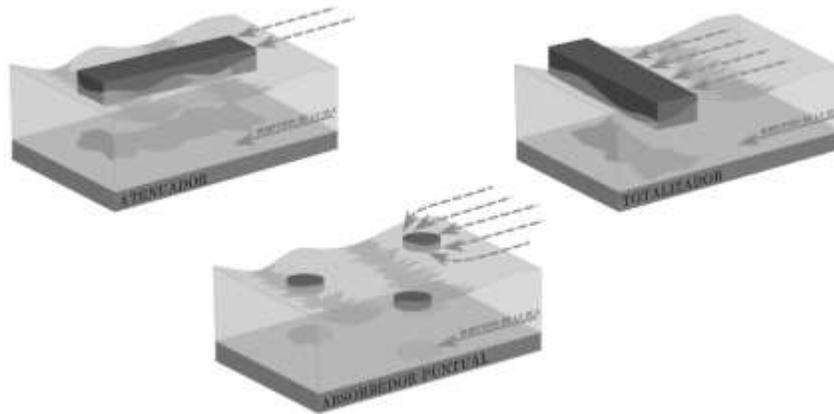
En resumen, se puede categorizar la ubicación de las tecnologías en función de las profundidades señaladas:

- *Onshore* (a nivel del mar)
- *Nearshore* (10-25 m)
- *Offshore* (>40 m)

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

### 2.3.2 Clasificación según su tamaño y orientación

En base al tamaño del dispositivo y su orientación respecto a la ola incidente se pueden distinguir de nuevo tres tipos de dispositivos: Atenuador, totalizador y absorbedor puntual.



*FIGURA 2.8 Clasificación de captadores en función de su tamaño y orientación (Raúl Cáceres Sáez, 2016)*

#### 2.3.2.1 Captador atenuador:

El captador Pelamis de 750 kW es el clásico ejemplo de captador atenuador. Estos dispositivos en esencia “atenúan” la amplitud de la ola. Se caracterizan por estar dispuestos en paralelo a la dirección de la ola incidente y por ser estructuras largas en comparación con la longitud de esta. Estos dispositivos suelen estar formados por una serie de secciones cilíndricas unidas entre sí por juntas y bisagras flexibles que permiten el giro de una respecto a la otra.



*FIGURA 2.9 Pelamis cada captador proporciona 750 kW, Portugal (Errazuriz y asociados, 2012)*

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

En la FIGURA 2.9 se muestra una granja del dispositivo Pelamis y se alcanza a apreciar el desplazamiento de las olas y como este se adapta al movimiento ondulatorio produciendo un movimiento relativo entre sus secciones.

### 2.3.2.2 *Captador totalizador:*

Son dispositivos similares a los atenuadores en cuanto a su tamaño, estructuras largas en comparación con la longitud de la ola incidente, pero en este caso están dispuestos perpendicularmente a la dirección de esta, de modo que en esencia “terminan” con la acción de la ola. El típico ejemplo de este grupo de dispositivos es el Wave Dragon.



FIGURA 2.10 Wave Dragon dispositivo de 7 MW, Dinamarca. (Errazuriz y asociados, 2012)

Este dispositivo se opone al desplazamiento de la ola con un par de reflectores que desvían la dirección de las ondas al centro del dispositivo, donde se encuentra el convertidor. En la FIGURA 2.10 se muestra un dispositivo con una capacidad instalada de 7 MW.

### 2.3.2.3 *Captador absorbedor puntual:*

Este grupo de dispositivos son de un diámetro significativamente más pequeño que la longitud de la ola incidente. Los absorbedores puntuales generan electricidad a partir de la acción de meneo o cabeceo que las olas producen. Un ejemplo de absorbedor puntual es el Archimedes Wave Swing (AWS) FIGURA 2.11, prototipo testado en Portugal el año 2004.

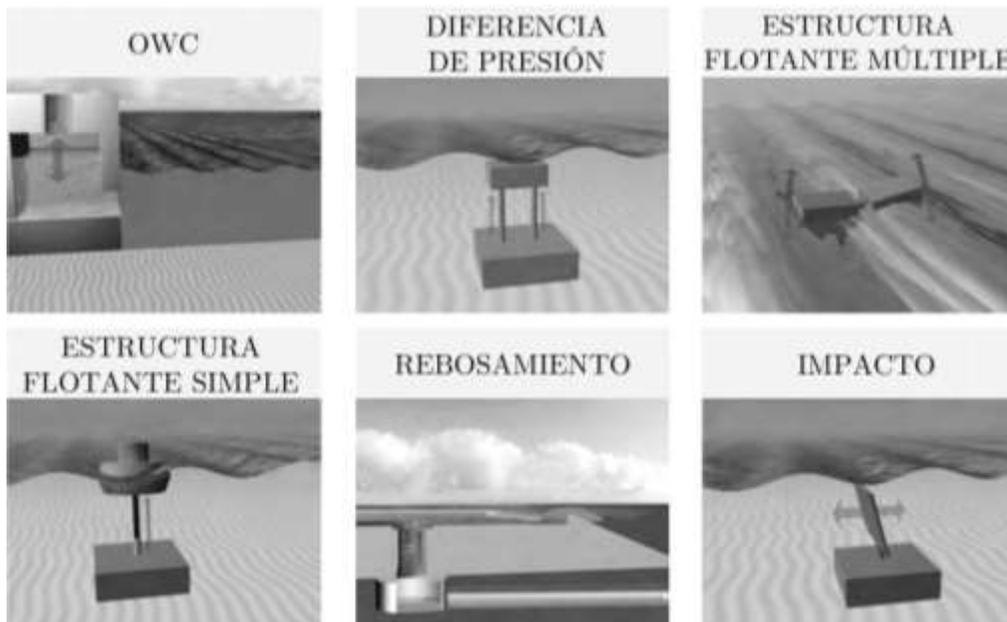
## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO



*FIGURA 2.11 Archimedes Wave Swing, Portugal 2.4 MW  
(J. Fernández, 2008)*

### 2.3.3 Clasificación según su principio de operación

Existen diversas formas en las que la presencia del oleaje se manifiesta y cada una de estas manifestaciones pueden ser aprovechables energéticamente, para esto se han desarrollado diversos dispositivos que pueden ser clasificables según su principio de operación o modo de funcionamiento. La energía del oleaje puede ser extraída mediante diferentes métodos, como se muestra en la FIGURA 2.12.



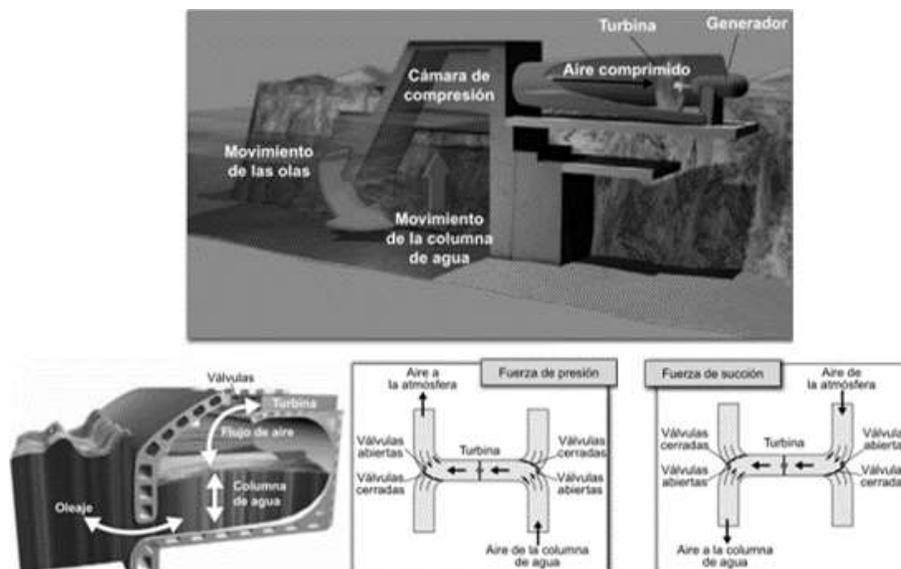
*FIGURA 2.12 Clasificación de captadores en función de su principio de operación (Blanco, 2015)*

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

A continuación, se detallan los principios de operación. Para el caso de las estructuras flotantes simples y múltiples se consideró una misma sección por su funcionamiento similar.

### 2.3.3.1 Columnas de agua oscilante (OWC)

Las OWC son los dispositivos más ampliamente ensayados en la costa o en áreas cercanas a ella. Consisten en una estructura hueca, parcialmente sumergida, que está abierta al mar por su parte inferior. Esta estructura encierra una columna de aire en la parte superior de una columna de agua. Así cuando las olas actúan sobre el aparato hacen que la columna de agua suba y baje, con lo cual la columna de aire se comprime y descomprime solidariamente con el agua. Este aire fluye hacia y desde la atmósfera a través de una turbina, comúnmente se utiliza una turbina Wells pues permite continuar el sentido del giro independiente la dirección de la corriente de aire.



*FIGURA 2.13 Esquema del sistema OWC con turbina Wells y sistema de válvulas (Blanco, 2015)(González et al., 2009)*

Además de los problemas ya mencionados por ser tecnologías fijas a la costa se presenta la baja eficiencia de la turbina Wells, entre el 40% y el 70% de una turbina convencional de eje horizontal.

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

Por ello el laboratorio Nacional de Ingeniería del Reino Unido (NEL), propone la utilización de un sistema de válvulas y una turbina convencional. Obligando al aire a pasar en una misma dirección a través de la turbina, como se muestra en la FIGURA 2.13, pero este sistema ha sido desplazado por turbinas unidireccionales.

Existen varios ejemplos de este tipo de conversores, uno de ellos es Sanze, un dispositivo del año 1983 con 40 kW de potencia instalada. Hoy los dispositivos de esta tecnología alcanzan 10 veces más potencia y su instalación ya no se restringe a la costa, un propulsor de esto último fue OSPREY, un sistema piloto construido en acero, desarrollado por Investigación y Tecnología Aplicada (ART), tiene una potencia nominal de 2 MW, se ha diseñado para ser instalado en modo *Nearshore*, sujeto al fondo del mar. En la FIGURA 2.14 se muestra el dispositivo instalado.



*FIGURA 2.14 OWC de OSPREY (P. Fernández, n.d.)*

### 2.3.3.2 Efecto Arquímedes: Diferencia de presión

Los dispositivos basados en el efecto Arquímedes son absorbedores puntuales sumergidos, habitualmente instalados a poca distancia de la costa, fijos al fondo marino. Estos emplean la diferencia de presión de la columna de agua generada por la diferencia entre la cresta y el valle de la ola. Cuando el valle de la ola pasa por encima del dispositivo, la presión ejercida por el agua es inferior a la del aire contenido en su interior y el dispositivo sube.

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

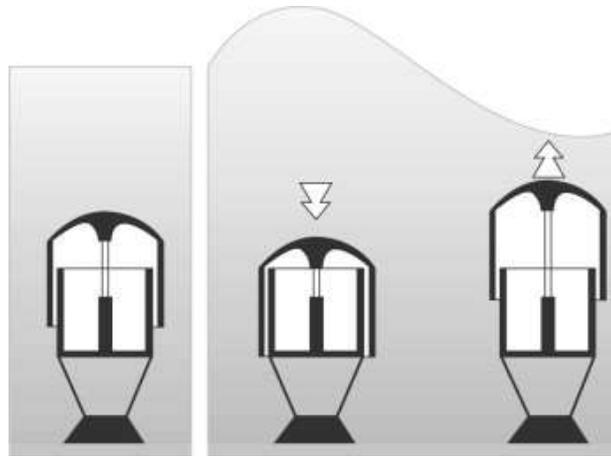


FIGURA 2.15 Esquema de funcionamiento AWS (J. Fernández, 2008)

Un ejemplo clásico es el captador AWS cuyo esquema de funcionamiento se muestra en la FIGURA 2.15.

### 2.3.3.3 Estructuras flotantes:

Este tipo de dispositivo se basa en un cuerpo flotante que es movido por las olas. Este movimiento puede ser con respecto a una estructura fija como el caso de las estructuras flotantes simples o se pueden encontrar tecnologías de varias estructuras unidas, conocidos como estructura flotante múltiple o captadores compuestos, donde el movimiento relativo de una parte de la estructura con respecto a la otra es lo que permite extraer la energía.

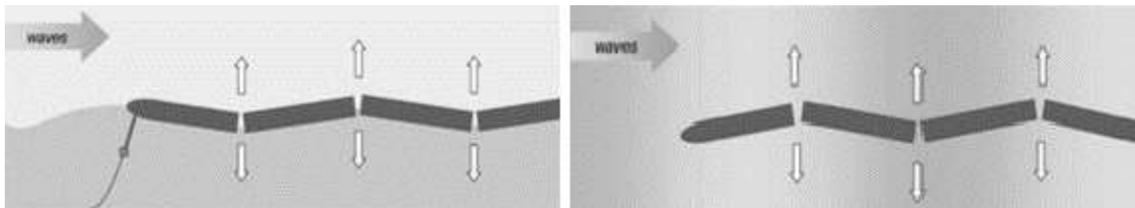


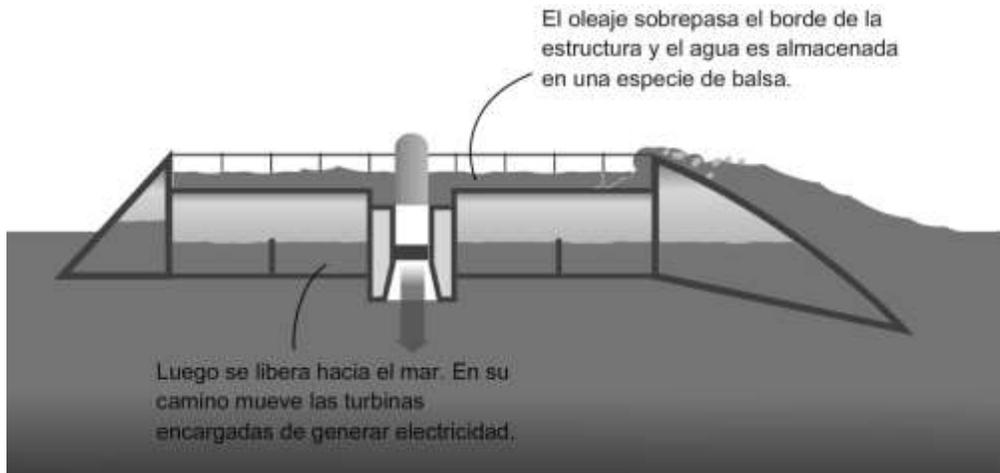
FIGURA 2.16 Movimiento relativo de Pelamis (Consumer, 2014)

### 2.3.3.4 Rebosamiento:

Aprovechando el aumento de la energía potencial de las olas, la energía cinética o ambas. Los sistemas de rebosamiento fuerzan el paso del agua hacia un depósito (por encima del nivel del mar)

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

para devolver el agua al mar a través de una serie de turbinas hidráulicas. Un captador que emplea esta tecnología es el Wave Dragon, su esquema de funcionamiento se muestra en la FIGURA 2.17.



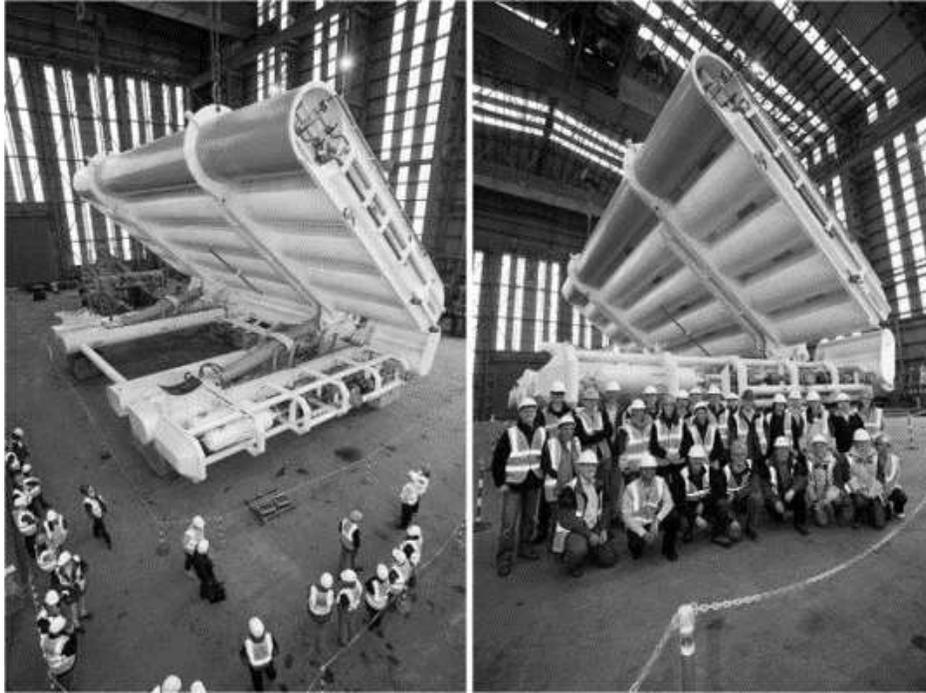
*FIGURA 2.17 Esquema de funcionamiento Wave Dragon corte transversal (Consumer, 2014)*

Aquí se explica cómo la ola supera la estructura flotante del Wave Dragon, al subir por la rampa se aprovecha la energía cinética que la ola posee, esta energía es almacenada como energía potencial en un reservorio sobre esta estructura para luego caer de vuelta al mar a través de unas turbinas dispuestas en su interior.

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

### 2.3.3.5 Impacto:

Estructuras articuladas o flexibles dispuestas perpendicularmente a la dirección de la ola. De esta forma, el deflector se mueve hacia atrás y hacia adelante debido al impacto de las olas. Un ejemplo puede ser el dispositivo Oyster 800 kW. En la FIGURA 2.18 se aprecia la dimensión de este dispositivo.



*FIGURA 2.18 Prototipo Oyster Wave Energy Converter (Blanco, 2015)*

Las diferentes categorías de tecnologías aplicadas para la captación de la energía undimotriz se superponen dependiendo del modo en que se clasifiquen, sin embargo, estas diferentes clasificaciones aportan diferentes aspectos discriminantes a la hora de seleccionar una tecnología a evaluar, dada la caracterización del lugar del proyecto. La TABLA 2.1 sintetiza esta superposición:

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

TABLA 2.1 Clasificación de captadores de olas en función de sus características (López Ropero et al., 2015)

UBICACIÓN	PRINCIPIO DE OPERACIÓN					
	OWC	Diferencia de Presión	Estructura Flotante		Rebosamiento	Impacto
			Múltiple	Simple		
<i>ONSHORE</i>	<b>Limpet</b> WaveGen (UK)		<b>ANEEL</b> (BRA)		<b>SSG</b> WAVEenergy (NO)	<b>Pendolor</b> (JAP)
	0.5MW		0.05MW		0.15MW	0.05MW
<i>NEARSHORE</i>	<b>Oceanlix</b> Energeth (AU)	<b>CETO 3</b> REH (UK)	<b>WaveStar</b> (DK)	<b>Bolt 5</b> Fred Olsen (UK)	<b>WavePlane</b> (DK)	<b>Oyster</b> Aquamarine (UK)
	1.5MW	0.078MW	0.6MW	0.05MW	0.02MW	0.8MW
<i>OFFSHORE</i>	<b>OE Buoy</b> Ocean Energy (IRL)	<b>AWS</b> Ocean (UK)	<b>Pelamis</b> PWP (UK)	<b>PowerBouy</b> OPT (USA)	<b>Wave</b> <b>Dragon</b> (DK)	<b>Langlee</b> LWP (NO)
	0.013MW	0.025MW	0.75MW	0.15MW	11MW	0.1MW
<b>Criterio de colores según orientación</b>			<b>Absorbedor Puntual</b>		<b>Totalizador</b>	<b>Atenuador</b>

En la parte superior de la TABLA 2.1 se ven las diferentes clasificaciones según su principio de funcionamiento, así SSG es un ejemplo de tecnología de Rebosamiento, es decir, el agua sobrepasa una barrera, se acumula y pasa por las turbinas. Wave Dragon también cumple con el mismo principio y ambos son del tipo Totalizador, entiéndase que se orienta transversalmente al desplazamiento de la onda, sin embargo, el primero es una tecnología *Onshore* y el segundo es una tecnología *Offshore*, que también se ha probado en condiciones *Nearshore*.

Cabe destacar que no existen todavía tecnologías que cumplan con el principio de diferencia de presión o estructura flotante simple, para ubicación *Onshore*.

También se observan datos adicionales en esta TABLA 2.1 como las iniciales de la nación de origen y la capacidad en MW de la unidad de cada dispositivo lo que será muy útil al momento de comparar los dispositivos seleccionados para este estudio.

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

### 2.4 ESTADO ACTUAL DE LA TECNOLOGÍA

En 2003 se establece el Centro Europeo de Energía Marina (EMEC) Ltda, un centro que ofrecía capacidades de prueba "en el mar" para dispositivos de energía mareomotriz y de olas en condiciones más y menos desafiantes. El EMEC vio nacer a dispositivos pioneros en la energía undimotriz como Pelamis o Archimedes. Durante la segunda mitad de la década del 2000 la inversión en energía de las olas aumentó, con el ingreso de empresas privadas, pero el deterioro del entorno financiero, la caída de los precios del petróleo y el incumplimiento de las expectativas iniciales sobre reducciones en el costo de la energía significaron que los inversores comenzaran a retroceder, lo que provocó que grandes empresas como Pelamis y Aquamarine cayeran por mala administración.

Actualmente Carnegie Wave Energy Limited se encuentran trabajando en un dispositivo de 1 MW (CETO 6) y numerosos proyectos de demostración se están llevando a cabo en todo el Reino Unido, Canadá, Dinamarca, Corea, España y los Estados Unidos, entre otros.

En total, 838 GW de proyectos de energía undimotriz se encuentran actualmente en diferentes etapas de desarrollo.

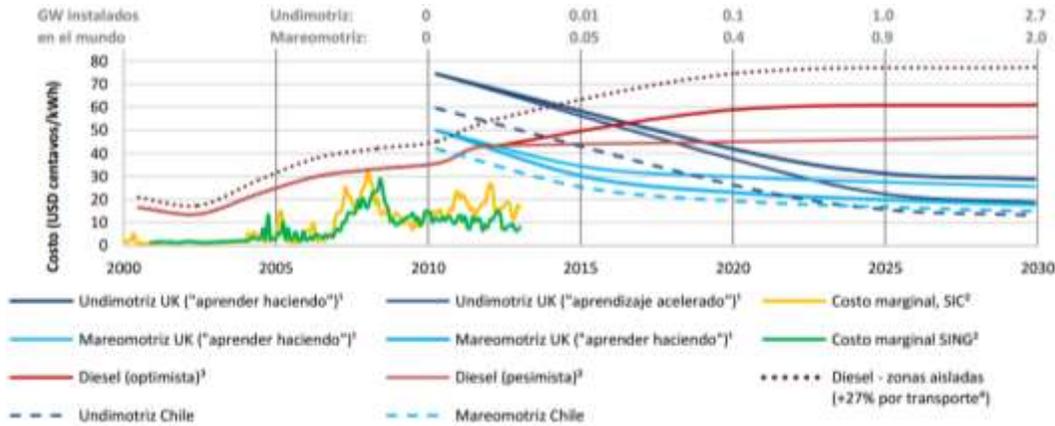
Mientras que el Reino Unido ha reducido sus actividades de despliegue, Seabased de Suecia ha comenzado la construcción de la granja undimotriz comercial más grande del mundo en Sotenas. Este proyecto incorporará 42 dispositivos y ofrecerá 100 MW de capacidad. (World Energy Council, 2016)

#### 2.4.1 Costos de la tecnología

El análisis del costo de la electricidad (LCOE) de Bloomberg New Energy Finance estima el costo promedio de la energía de las olas a aproximadamente US \$ 0.50 / kWh, bastante más desfavorable que otras tecnologías marinas como la energía de mareas (US \$ 0.44 / kWh) que tiene un mayor grado de convergencia tecnológica y mayor capacidad instalada. Y ni hablar de la energía eólica marina (US \$ 0.174 / kWh). (World Energy Council, 2016)

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

El 2014 Aqua Limited hace una proyección de lo que sería el LCOE para la energía undimotriz hasta el 2030, como se ve en la FIGURA 2.19



*FIGURA 2.19 Estimación de precios de mercado eléctrico en Chile comparados con los costos nivelados de mareomotriz, undimotriz y por diesel (Davies, 2014)*

En este gráfico se aprecian dos curvas de costos de energía undimotriz, bajo dos supuestos “aprender haciendo” y “aprendizaje acelerado”, obviamente el primero más conservador que el segundo, aunque si se contrasta con el análisis de costo de Bloomberg New Energy Finance, al 2015 estas dos estimaciones siguen siendo conservadoras. Considerando que falta mucho por mejorar optimizando las resonancias de los equipos, explorando en materiales compuestos ya sea para estructuras como para turbinas o amarres. Recientemente se han estudiado elastómeros dieléctricos para el revestimiento de turbinas alcanzando teóricamente mayores eficiencias de conversión, reduciendo los costos operacionales y capital de inversión, con turbinas menos sensibles a la corrosión y menos ruidosas (Teillant, Vicente, Pietro, Papini, & Moretti, 2015). También se plantean mejoras en el tamaño y escalamiento de los dispositivos, materiales y pesos, con el fin de simplificar labores de instalación, remoción y mantenimiento. Con todo esto por mejorar no resulta tan osado proyectar los costos de operación de la tecnología undimotriz siguiendo el gráfico de la FIGURA 2.19 hasta el año 2030 con la ecuación 2.5.

$$y = 0.0943x^2 - 383.85x + 390635 \quad (2.5)$$

Donde “x” es el año que se desea proyectar entre el 2010 y el 2030 e “y” es el costo de la tecnología a ese año. Dividiendo este valor por el costo actual de la tecnología se tiene un factor

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

de corrección aplicable al costo de inversión y mantenimiento de todas las tecnologías estudiadas. Aqua Limited también estima que la aplicación de una tecnología WEC en Chile tendría un costo 20% menor que los probados en Europa considerando que los sueldos son menores en Chile, entre otros aspectos. Esto se compensará con una evaluación económica de un 80% de precisión.

### 2.5 TRATAMIENTO DE DATOS

Como se mencionó en el CAPÍTULO I, los datos serán obtenidos a través del Explorador de Energía Marina, de la Universidad de Chile. Este explorador realiza una extrapolación a partir de datos experimentales obtenidos desde el año 1979 al 2010, sintetiza estos datos en un promedio por hora. Esto significa trabajar con 277.798 datos con una distribución continua, por cada punto a analizar. Por lo que es necesario convertirlos en una distribución discreta, que permita un buen tratamiento y análisis.

Para esto fue necesario realizar un algoritmo en Scilab cuyo diagrama de flujo se encuentra en el ANEXO 1. Dicho algoritmo discretiza los datos clasificándolos según la altura media de ola y el periodo medio de esta, creando conjuntos de 0.5 puntos de diferencia partiendo del cero y alcanzando un máximo de 16 segundos para el periodo y 8 metros para la altura. Cabe destacar que, al ser los datos de origen continuos, este algoritmo considera intervalos con el extremo inferior cerrado y el superior abierto, para evitar que queden datos intermedios sin clasificar y cada marca de clase corresponde al valor inferior de este intervalo, lo que se traduce en un cálculo conservador dado que un valor de periodo  $X$  representará a todos los valores del intervalo  $[X, X+0.5[$ .

Este algoritmo filtra los datos según su periodo y sobre el mismo dato realiza un filtro según su altura, por lo que cada dato de ola no pierde su vínculo con la potencia que esta posee. Cada ola que pase los dos filtros generará un aumento en un contador, obteniendo un número de olas determinado para un periodo  $X$  y una altura  $Y$ , ordenados en un arreglo en función de esa altura y periodo. Esto hace sencilla la visualización de la concentración de los datos. También permite distribuirlos porcentualmente como se muestra en la FIGURA 2.20 en un Arreglo de frecuencia porcentual versus periodo y altura:

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

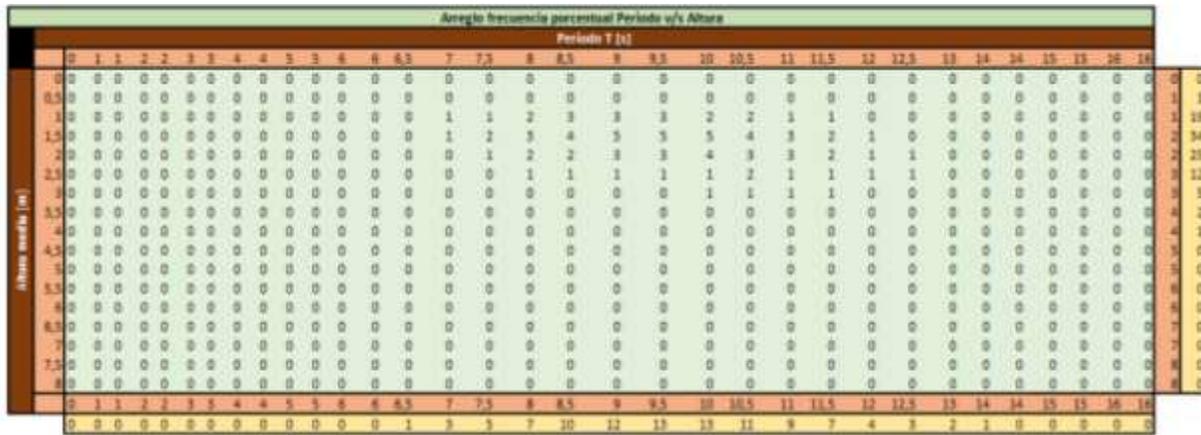


FIGURA 2.20 Arreglo de frecuencia porcentual (Elaboración propia)

La distribución de la FIGURA 2.20 es porcentual, es decir, de un total de cien olas se observan las ocurrencias según su altura y periodo, también se destacan en amarillo la respectiva frecuencia porcentual por separado tanto de altura (a la derecha) como de periodo (abajo). Esta distribución es crucial para este proceso pues permite una visualización más detallada a través de gráficos de periodo o altura versus frecuencia porcentual para determinar fácilmente los sesgos positivo o negativo (izquierda o derecha respectivamente) que posee la distribución ya sea en altura como en periodo.

Si este valor de frecuencia porcentual fuese multiplicado por los días de un año se podría determinar la cantidad de olas medias para cada valor ya sea de altura o periodo. El problema de esta distribución es que separa el valor de altura del valor de periodo de la ola, eliminando la posibilidad de calcular su potencia, es por lo que también se trabaja con un gráfico que integre los dos valores. Este tipo de gráfico integra las tres variables, además con un criterio de colores permite distinguir los valores más frecuentes de olas.

## 2.6 CÁLCULO DE POTENCIA

Para el cálculo de potencia es preciso hablar primero de la matriz de potencia, una matriz entregada por los desarrolladores de las tecnologías a utilizar, con el fin de poder calcular la potencia teórica generada por su dispositivo a partir de los valores medios de periodo y altura del lugar donde este se desplegará.

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

Todas las matrices de potencia de los dispositivos disponen sus valores en kW además ordenan los valores de periodo (T) y altura media (Hs) en la horizontal y la vertical respectivamente.

La disposición de los datos en este formato facilita el cálculo de potencia, pues basta con multiplicar cada casilla del Arreglo de frecuencia porcentual ( $W_{ij}$ ), por la casilla equivalente de la matriz de potencia ( $M_{ij}$ ) para obtener el valor proporcional de la generación para ese tipo de ola ( $ij$ ). Este proceso es equivalente a calcular la probabilidad de la intersección de sucesos independientes.

$$P(A \cap B) = P(A) * P(B) \quad (2.6)$$

Así la suma total del arreglo obtenido corresponde a la Potencia teórica generada, que es la potencia promedio que generaría esta tecnología si tuviese una disponibilidad del 100% del generador. Entonces finalmente este valor se castiga por la disponibilidad del equipo ( $\delta$ ) y un factor de disponibilidad de un 95% que considere las variaciones del recurso y otros imprevistos. La ecuación 2.7 resume este cálculo:

$$Potencia\ teórica = \sum_k^n (W_{ij} * M_{ij})_k * 0.95 * \delta \quad (2.7)$$

### 2.6.1 Factor de planta

El análisis anterior permite calcular el Factor de planta para cada dispositivo por medio de la ecuación 2.8, donde se relaciona porcentualmente la Potencia teórica generada con la Potencia nominal del dispositivo.

$$FP = \frac{Potencia\ teórica * 100}{Potencia\ nominal} \quad (2.8)$$

Este factor sólo sirve para comparar el mismo dispositivo en diferentes puntos, es decir, sometido a diferentes condiciones ambientales, esto da una referencia del aprovechamiento del dispositivo en el ambiente desplegado. Sin embargo, no puede ser un elemento discriminador dado que no considera los costos de inversión para cada tecnología.

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

Esta discriminación sólo se realizará con una evaluación económica, para la cual es necesario extrapolar el cálculo anterior para la Energía anual generada ( $q$ ), por lo que es necesario amplificar este valor por los 365 días del año y las 24 horas de cada uno:

$$q = \text{Potencia Real} * \frac{8760}{1000000} \quad (2.9)$$

Para evitar números tan grandes es que se divide por 1.000.000 de tal forma de obtener  $q$  en GWh/año.

### 2.6.2 Factor de planta mínimo rentable

Si se considera a  $q$  como la producción anual en GWh, se define un  $q^*$  que marque el punto en que los ingresos por inyección a la red superen los costos fijos y de operación. Como se muestra en la FIGURA 2.21.

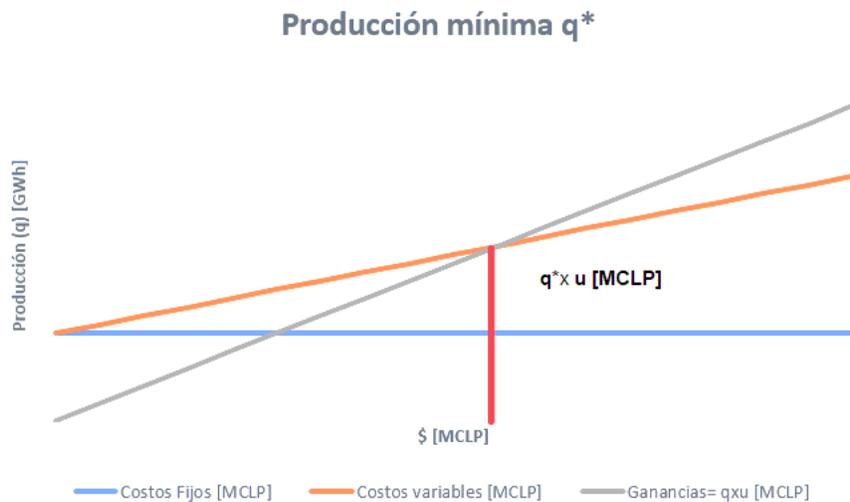


FIGURA 2.21 Producción mínima rentable en GWh (Elaboración propia)

Se considera a  $u$  como el precio de venta unitario de la energía en CLP/kWh, al estar  $q$  en GWh  $q \times u$  queda en millones de pesos MCLP. Para este caso  $q^*$  sería la producción mínima en GWh al año para que la planta sea rentable.

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

Para que esto tenga sentido se considera que:

$u$ : queda definido como el ingreso anual por kWh que comprende a la tarifa del sistema y el precio de la tonelada del bono de carbono equivalente a un kWh.

Costos Fijos: como la inversión inicial repartida en cuotas anuales.

Costos Variables: equivale a los costos de operación ( $CO$ ) en CLP/kWh multiplicado por  $q$ .

Despejando  $q$  del punto en que se interceptan las rectas de Ganancias y Costos variables, igualamos a  $q$  con  $q^*$ . Este se define como los costos fijos dividido por la diferencia entre los costos de operación y  $u$ .

$$q^* = \frac{cf}{u - CO} \quad (2.10)$$

Cabe destacar que en caso de que  $CO$  sea mayor que  $u$ ,  $q^*$  pierde sentido como producción pues la planta nunca sería rentable.

A partir de este valor se puede calcular un “Factor de planta mínimo rentable” ( $FP^*$ ), considerando las ecuaciones (2.8) y (2.9) el factor de planta se reescribe como:

$$FP^* = \frac{q^*}{Potencia\ Nominal} * \frac{100.000.000}{8.760} \quad (2.11)$$

Este factor de planta mínimo da una aproximación cuantitativa del punto en que un dispositivo se vuelve rentable (de hacerlo) considerando los costos de operación e inversión indicados por los proveedores para cada dispositivo. Este valor es independiente de  $q$ , por lo que no evalúa la rentabilidad de una planta instalada en un sector específico. A menos que este sea comparado con el factor de planta obtenido en dicho sector por el dispositivo evaluado, esto podría dar una idea de la distancia entre la eficiencia de la planta real y la necesaria para ser rentable.

Pero para una correcta evaluación de la rentabilidad de una planta es necesaria una evaluación económica que, una vez calculada la potencia que generaría cada tecnología, relacione los costos de inversión y operación, a través del tiempo con un valor actual neto, los ingresos generados por concepto de inyección de energía al sistema y venta de bonos de carbono.

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

### 2.7 EVALUACIÓN ECONÓMICA

En esta sección se detallan los supuestos y estimaciones de la evaluación económica realizada a nivel de prefactibilidad, sobre las alternativas seleccionadas en los diferentes lugares analizados. Esta evaluación económica cuenta con una precisión de un 80%.

El cálculo de energía descrito en la sección 2.6 se aplica mes a mes para tener una respuesta más detallada del dispositivo instalado. De estos resultados se calculan los ingresos por inyección a la red y por concepto de bono de carbono. Para esto es necesario estimar valores y considerar algunos que son fluctuantes, por lo que toma importancia la fecha en que se ha tomado el dato.

*TABLA 2.2 Estimaciones consideradas para la evaluación económica (Elaboración propia)*

Cuadro de estimaciones		
Precio del Euro	733,2	CLP/€
Precio del bono de carbón	8,23	USD/ton CO2
Razón de CO2 liberado por kWh generado	0,89	kg co2/kWh
Cargo por energía BT1 en Constitución	90,947	CLP/kWh

Para los valores de la TABLA 2.2 se consideró el valor del Euro (Bolsa de comercio de Santiago, 2018) y bono de carbono (Sistema europeo de negociación de CO2, 2018) al día 26 de enero del 2018. Por otro lado, los valores de la razón de CO2 liberados por kWh generado son 0.89 kg , (Systep, 2014) valor que será considerado para la venta de bonos de carbono. De datos extraídos del Instituto nacional de estadística (INE) se tiene el IPC para el año 2017 a un 2.1% lo que se extrapola para los 30 años del estudio. Se considera un IVA de un 20% el que actúa sobre la inversión inicial y sobre las ganancias.

#### 2.7.1 VALOR ACTUAL NETO (VAN) Y TASA INTERNA DE RETORNO (TIR)

El VAN consiste en traer los valores repartidos a lo largo de los años del proyecto a “Valor presente” (Año 0) y restar la “inversión inicial”, de ser positivo el proyecto genera ganancias, de

## CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

no serlo el proyecto no alcanza a cubrir la inversión por lo que no genera ganancias. Hay ocasiones en que se escoge un proyecto de VAN cero o inclusive negativo, cuando al ente que cubre el financiamiento (o que asume la pérdida en el caso de ser negativo) obtiene un beneficio adicional no cuantificable.

Por otro lado, la TIR representa la tasa de interés necesaria para obtener un VAN igual a cero, este indicador es importante porque se puede contrastar con la Tasa de Rendimiento Mínima Aceptable (TREMA) para determinar cuándo un proyecto pueda ser aceptable para un inversionista. Cada inversionista suele tener su propio valor de TREMA.

Se presentan los hitos más importantes de la evaluación económica. En primer lugar, se encuentran los años, desde el Año 0 (cuando se realiza la inversión). Este análisis llega hasta el Año 30 que marcaría el fin del proyecto por término de la vida útil del dispositivo.

Además, se trabajan los conceptos de depreciación y valor de mercado, el primero corresponde a la pérdida de valor en el tiempo de la instalación y el valor de mercado se utiliza como el valor de desecho de la instalación. Ingresos, que corresponden a las ventas por energía y bonos de carbono, impuesto al valor agregado (IVA), flujo neto antes de impuesto (FNAI), flujo neto después de impuesto (FNDI) y flujo equivalente después de impuestos (FEDI) este último son los ingresos líquidos de los 30 años llevados al Año 0.

## **CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN DEL POTENCIAL UNDIMOTRIZ EN LA ZONA DE CONSTITUCIÓN**

### CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN DEL POTENCIAL UNDIMOTRIZ EN LA ZONA DE CONSTITUCIÓN

En la Región del Maule no existen zonas marítimas protegidas, y específicamente en la costa de Constitución sólo se encuentra el “Santuario de la Naturaleza humedales costeros de Putú”, de todos modos, serán consideradas zonas turísticas o comerciales para discriminar lugares de aplicación. También se considerará la cercanía a empresas o poblados para los que pueda significar una inversión la energía marina.

Como se mencionó en el Capítulo 2 existen tres diferentes ubicaciones, con respecto a la costa en las que se pueden clasificar los diferentes conversores: *Onshore*, *Nearshore* y *Offshore*.

Constitución se encuentra a la altura del paralelo 35°20' Sur, en términos generales a esa altura la potencia media de las olas varía desde los 10 kW/m *Onshore*, a los 62 kW/m *Offshore*. Sin embargo, a nivel mundial, no se ven inversiones de plantas de energía *Offshore* por sobre los 50 km de distancia a la costa por lo que, ese será el límite de la siguiente caracterización.

Se tomaron 4 paralelos diferentes a estudiar, separados por 20 kilómetros aproximadamente a lo largo de la costa de la provincia de Talca, partiendo desde las cercanías al Faro Carranza hasta el sector de los humedales de Putú. Estos paralelos serán analizados según su profundidad para determinar los rangos de ubicación y las potencias media respectivas.

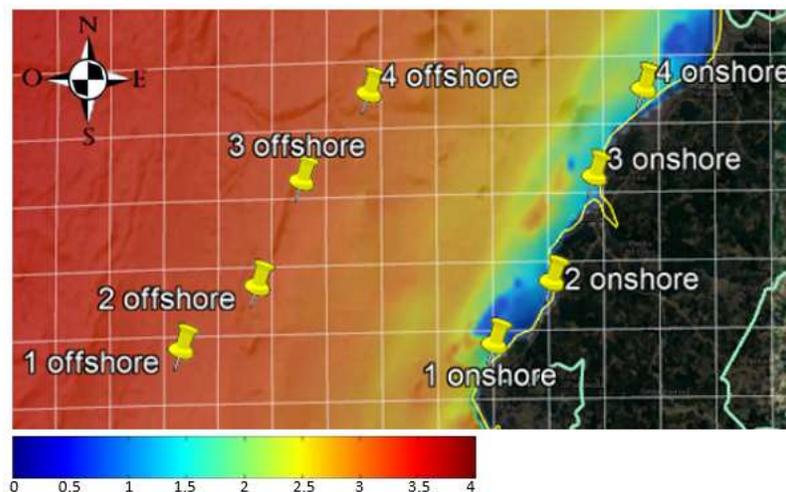


FIGURA 3.1 Coordenadas a analizar sobre el plano (Elaboración propia)

### CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN DEL POTENCIAL UNDIMOTRIZ EN LA ZONA DE CONSTITUCIÓN

En la FIGURA 3.1 se ven referenciado en el mapa las 4 latitudes a analizar. A partir de estos paralelos se realizó un estudio de la profundidad del mar en esas zonas. Determinando los rangos y distancias para tecnologías de todo tipo de ubicación.

*TABLA 3.1 Comparación de Puntos a Estudiar (Elaboración propia)*

	Coordenadas		Profundidad m	Distancia de la costa km	Potencia media kW/m
	Latitud	Longitud			
1.1	-35.593	-72.645	12	0.8	37.8
1.2	-35.593	-72.647	25	0.9	
1.3	-35.593	-72.648	36	1.1	
1.4	-35.593	-73.0261		50	56.3
2.1	-35.454	-72.499	12	1.1	6.6
2.2	-35.454	-72.501	27	1.3	
2.3	-35.454	-72.558	25	6.4	5.9
2.4	-35.454	-72.602	27	10.4	33.5
2.5	-35.454	-72.610	40	11.2	
2.6	-35.454	-73.00		50	59
3.1	-35.287	-72.380	10	1.4	17.1
3.2	-35.287	-72.412	25	2	
3.3	-35.287	-72.433	40	2.6	
3.4	-35.287	-72.7377		50	53.4
4.1	-35.183	-72.354	10	2.3	13.7
4.2	-35.183	-72.361	25	3.5	16.3
4.3	-35.183	-72.377	40	4.5	
4.4	-35.183	-72.7377		50	54

En la TABLA 3.1 a la izquierda se presentan las 18 coordenadas analizadas en este proceso, seguidas de sus características de profundidad, distancia de la costa y potencia media. El Explorador de Energías Marinas tiene una resolución de 1 km, por lo que puntos que resulten

## CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN DEL POTENCIAL UNDIMOTRIZ EN LA ZONA DE CONSTITUCIÓN

de menos de un kilómetro de distancia, debido al aumento abrupto de la profundidad en la costa maulina, serán tratados como un solo punto. Las coordenadas correspondientes al paralelo 1, donde el valor 1.1 corresponde al indicado como 1Onshore y 1.4 a 1Offshore de la misma figura. Los valores intermedios 1.2 y 1.3 corresponden los puntos de transición entre Onshore a Nearshore y de Nearshore a Offshore en dicho paralelo. Más abajo y respetando ese orden se encuentran las coordenadas para el paralelo 2, 3 y 4 respectivamente. Nótese que en el paralelo 2 existen dos valores adicionales, esto se debe a que la profundidad disminuye en el punto 2.3 y vuelve a aumentar para el punto 2.4 (ver ANEXO 2). A la derecha se presentan los valores finales a analizar, de arriba abajo los puntos más lejanos de la costa con un límite de 50 km.

De la caracterización resumida en la TABLA 3.1 se extrae que las potencias fluctúan de los 5.9 kW/m *Onshore* a los 59 kW/m *Offshore*, la ola pierde un 90% de su energía al acercarse a la costa (ver FIGURA 2.6).

Resulta interesante el aumento abrupto de la profundidad del mar cercano a la costa, porque permite exponer los dispositivos a altos niveles de energía sin la necesidad de adentrarse demasiado en el mar. Este aumento abrupto de la profundidad es relativamente constante en toda la costa de Constitución, pero se desplaza mar adentro a medida que se avanza hacia el norte.

Respetando las ubicaciones *Onshore*, *Nearshore* y *Offshore* se selecciona un punto para cada una, así para el caso de *Onshore* se ha seleccionado el punto 3.1 que presenta una potencia muy superior. Para *Nearshore* se seleccionó el punto 1.2 y finalmente para *Offshore* se destaca el punto 2.6. Todos estos puntos fueron resaltados en el cuadro anterior.

A continuación, se analizan de forma más detallada los datos de cada punto seleccionado.

### 3.1 UBICACIÓN *ONSHORE*

Para la ubicación *Onshore* fue seleccionado el punto 3.1 por su alto valor de potencia media en comparación a los otros puntos *Onshore*. En la FIGURA 3.2 se muestra una matriz de

### CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN DEL POTENCIAL UNDIMOTRIZ EN LA ZONA DE CONSTITUCIÓN

distribución de datos desde el año 1979 al 2010, en esta se aprecia una alta concentración en la parte superior derecha.

Agrupación resumida distribución de datos anual Período v/s Altura (1979-2010)																																									
Altura media [m]	Período T [s]																																								
	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	12.5	13	13.5	14	14.5	15	15.5	16	0							
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0					
0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0				
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0			
1.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
2.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
3.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
4.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
5.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

FIGURA 3.2 Distribución de datos punto 3.1 (Elaboración propia)

Esta concentración indica una altura baja de oleaje, pero periodos más largos. Es de esperarse por ser cercano a la costa, considerando que las olas pierden energía acercándose a esta. En las figuras 3.3 y 3.4 se aprecia de mejor forma esta concentración.

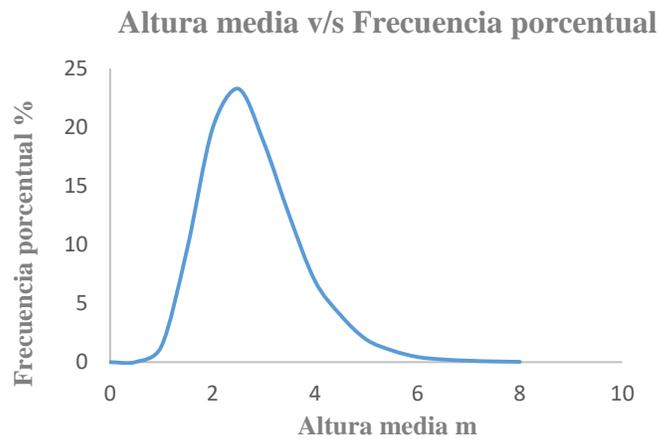


FIGURA 3.3 Altura media v/s Frecuencia porcentual del punto 3.1 (Elaboración propia)

En la FIGURA 3.3 se puede apreciar una importante concentración en la altura media de un metro con un 48% de las olas cercanas a esta altura. El sesgo positivo es notorio (a la izquierda) y no se ven olas por sobre los 3.5 metros de altura ni por debajo de los 0.5 metros.

### CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN DEL POTENCIAL UNDIMOTRIZ EN LA ZONA DE CONSTITUCIÓN

Los datos de la FIGURA 3.4 se ven más centrados que el caso de las alturas. Esta vez presenta un sesgo negativo. Esta distribución tiene tres modas en los periodos de 9.5, 10 y 10.5 segundos aquí se concentra el 36% de los datos. La totalidad de estos se encuentran entre los 6 y 14.5 segundos.

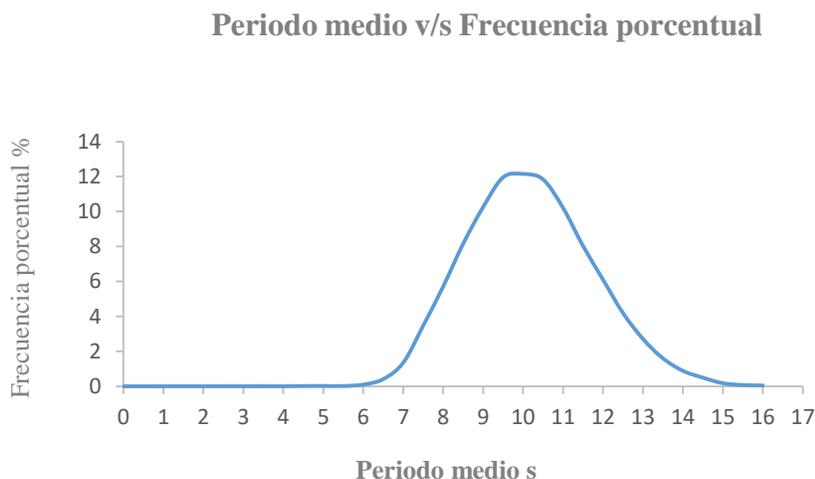


FIGURA 3.4 Periodo v/s Frecuencia porcentual (Elaboración propia)

Es posible resumir todo lo anterior en el diagrama de periodo y altura versus frecuencia porcentual presentado en la FIGURA 3.5.

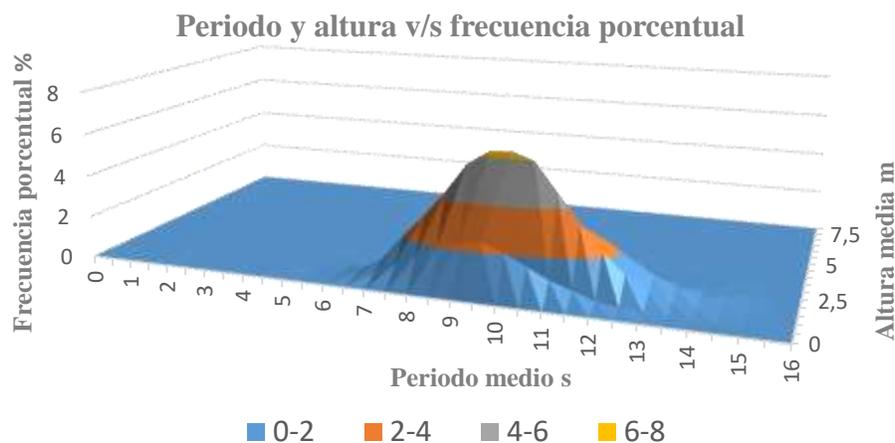


FIGURA 3.5 Diagrama de periodo y altura v/s frecuencia porcentual anual del punto 3.1 (Elaboración propia)

Más del 70% de las olas se encuentra entre los periodos 8 a 11.5 segundos y de los 0.5 a 1.5 metros de altura. Nótese que existen olas que alcanzan un 6%, eso indica cuan concentradas se

# CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN DEL POTENCIAL UNDIMOTRIZ EN LA ZONA DE CONSTITUCIÓN

encuentran. Este dato es importante para considerar el rango de operación del dispositivo a seleccionar.

## 3.2 UBICACIÓN *NEARSHORE*

Para la ubicación *Nearshore* se selecciona el punto 1.2 por ser el punto de mayor potencia entre las opciones para *Nearshore*, además de ser el más cercano a la costa. En primer lugar, se presenta el arreglo resumen de distribución anual en la FIGURA 3.6:

Arreglo resumen distribución de datos anual Período v/s Altura (1979-2016)																																					
Altura media [m]	Período T [s]																																				
	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9.5	10	10.5	11	11.5	12	12.5	13	13.5	14	14.5	15	15.5	16	16.5			
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

FIGURA 3.6 Distribución de datos punto 1.2 (Elaboración propia)

En este arreglo se alcanza a apreciar una concentración de datos cerca de la zona superior derecha de la FIGURA 3.6. Esto se observa de mejor manera en las figuras 3.7 y 3.8 donde se muestran la frecuencia porcentual del periodo y altura respectivamente para el punto 1.2.

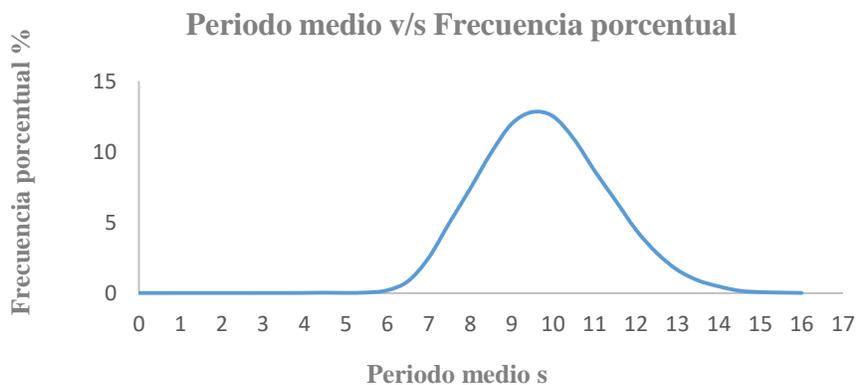
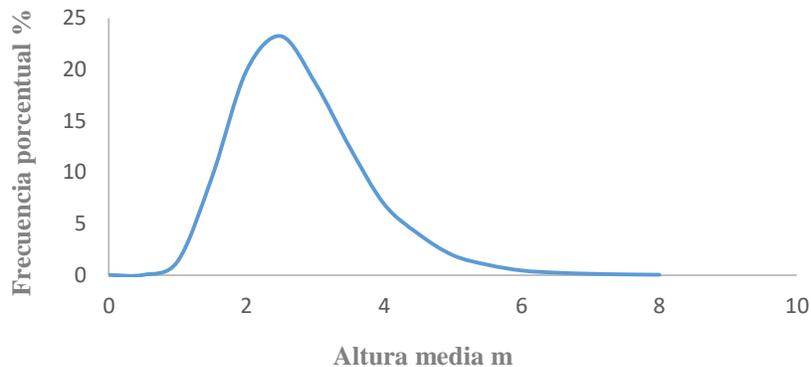


FIGURA 3.7 Periodo medio v/s Frecuencia porcentual para el punto 1.1 (Elaboración propia)

### CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN DEL POTENCIAL UNDIMOTRIZ EN LA ZONA DE CONSTITUCIÓN

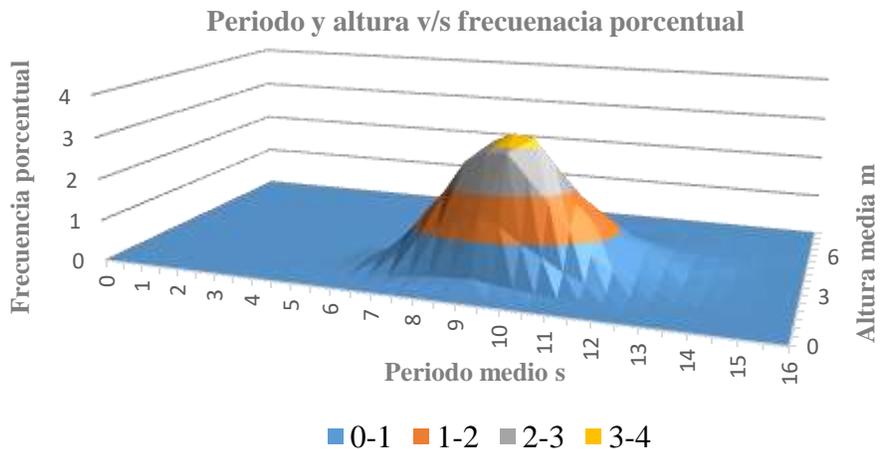
En la FIGURA 3.7 se ve que los valores de periodo se concentran entre los 6.5 y los 14 segundos, levemente desplazados a la derecha con una media de 9.7 segundos. Conveniente si se piensa que todos los dispositivos trabajan dentro de este rango. Sin embargo, al analizar la altura se observa que es baja para el aprovechamiento pleno de los dispositivos.

**Altura media v/s Frecuencia porcentual**



**FIGURA 3.8** *Altura media v/s Frecuencia porcentual para el punto 1.1 (Elaboración propia)*

La FIGURA 3.8 muestra la altura media desplazada a la izquierda, cerca de los 1.5 metros dentro del rango [0.5, 4] de estos el 90% se encuentra entre uno y tres metros. Si bien los dispositivos trabajan dentro de este rango, su trabajo pleno se alcanza con alturas a partir de los 5 metros.

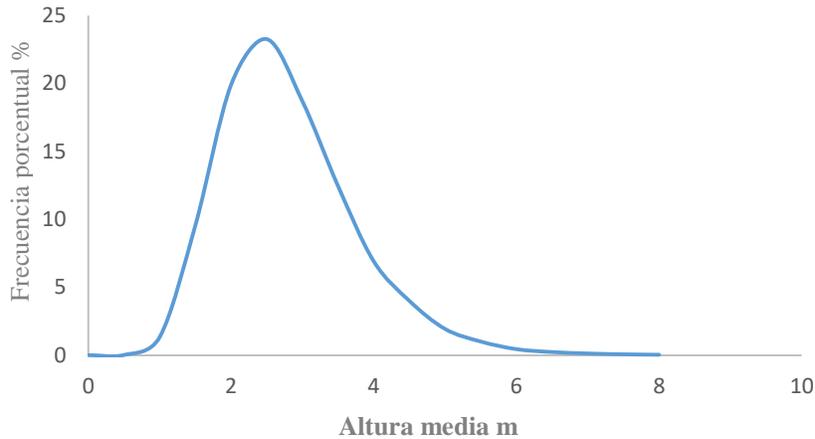


**FIGURA 3.9** *Diagrama de periodo y altura v/s frecuencia porcentual anual para el punto 1.1 (Elaboración propia)*



### CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN DEL POTENCIAL UNDIMOTRIZ EN LA ZONA DE CONSTITUCIÓN

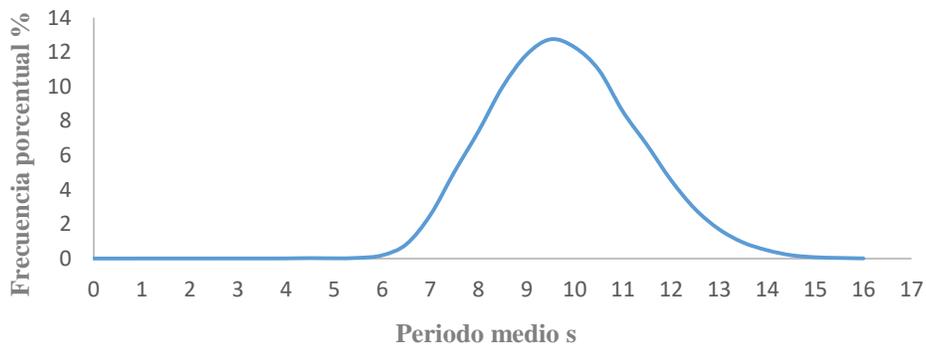
**Altura media v/s Frecuencia porcentual**



*FIGURA 3.31* Altura media v/s Frecuencia porcentual punto 2.6 (Elaboración propia)

De la FIGURA 3.11 se puede apreciar un sesgo positivo de la distribución, comenzando los valores a partir de un metro de altura hasta los cinco metros. pero el 79% de los datos se concentran entre los 2 y los 3.5 metros.

**Periodo medio v/s Frecuencia porcentual**

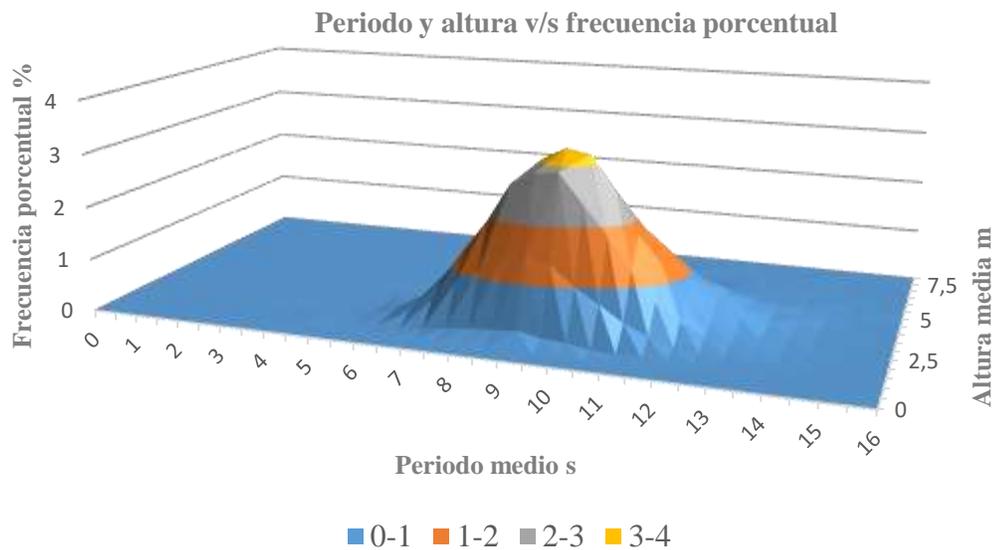


*FIGURA 3.42* Periodo v/s Frecuencia porcentual punto 2.6 (Elaboración propia)

Por otro lado, en la FIGURA 3.12 se ven los datos del periodo del punto 2.6 levemente desplazados a la derecha, esta distribución presenta tres modas de un 12% cada una para los valores de 9, 9.5 y 10 segundos. El 85% de esta distribución se encuentra entre los periodos de 8 y 12 segundos.

Para una mejor comprensión ver la FIGURA 3.13 donde se presenta el diagrama de periodo y altura versus frecuencia porcentual para el punto 2.6.

### CAPÍTULO 3: CARACTERIZACIÓN DEL POTENCIAL UNDIMOTRIZ EN LA ZONA DE CONSTITUCIÓN



*FIGURA 3.13 Diagrama de Periodo y altura v/s frecuencia porcentual anual para el punto 2.6 (Elaboración propia)*

El 98% de los datos se encuentra entre las alturas de 1 a 5 metros y los periodos 6.5 a 14.5 segundos, pero de estos el 69% se encuentra entre los 2 y los 3.5 metros de altura y periodos de 8 a 12 segundos.

También se puede ver que ningún dato alcanza el 3.5% de frecuencia porcentual, estos datos son aún más dispersos que los del punto *Nearshore*.

## **CAPÍTULO 4: SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS**

## CAPÍTULO 4: SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS

Como se ha mencionado anteriormente la tecnología undimotriz se encuentra todavía en una fase precomercial, salvo ciertos dispositivos la gran mayoría no ha superado la fase de idea. En la TABLA 4.1 se presenta el estado de avance de las tecnologías WEC más desarrolladas al 2014. Estas son las tecnologías que por lo menos han completado su fase de prueba a escala completa.

TABLA 4.1 Estado de desarrollo de las tecnologías WEC (Teillant et al., 2015)

Tipo	Dispositivo	Lugar de testeo	Potencia nominal MW	Sistema de conversión
<b>Columna de agua oscilante</b>	Limpet	Islay, Escocia	0.5	Turbina eólica - Generador
	Pico Plant	Azores, Portugal	0.4	
			0.7	
<b>Rebosamiento</b>	Wave Dragon	Portugal	1.5	Turbina hidráulica - Generador
		Nissum Bredning, Dinamarca	7	
			11	
<b>Atenuador</b>	Wavebob	Irlanda	0.5	Sistema hidráulico
	Pelamis	Orkney, Escocia	0.75	Generador lineal
	Lysekil project	Lysekil, Suecia	0.01	
	AWS	Portugal	2	
	Oregon L10	Oregon, USA	0.01	

La última versión de un OWC del que se estudió su capacidad de conversión fue OWC PICO Plant, por lo que será esta la tecnología analizada en *Onshore*.

El punto seleccionado para *Nearshore* tiene una potencia media de 37,8 kW/m muy por sobre la potencia media capaz de soportar AWS (15 kW/m) este prototipo ya se vio sobrepasado por la alta potencia a la que fue expuesto en Portugal, por lo que sería insuficiente para la potencia de Constitución. Para hacer la evaluación de este punto se acudirá a la tecnología de Wave Dragon, el dispositivo probado en altamar de 36 kW/m puede ajustar a las solicitudes de este punto. Finalmente, para el punto *Offshore* se analizará el dispositivo Pelamis, por lo tanto, las tecnologías elegidas son:

- OWC
- Wave Dragon
- Pelamis

Estas tecnologías serán analizadas en mayor profundidad y comparadas a continuación:

## CAPÍTULO 4: SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS

### 4.1 OWC PICO PLANT

El conversor undimotriz del tipo OWC ha evolucionado considerablemente desde su instalación en Islay. Mutriku, la última versión de este dispositivo fue construida en módulos de hormigón armado prefabricados, elaborados a un costado de la planta. Esto facilitó sustantivamente la obra de construcción en comparación con la experiencia de Islay donde la estrategia no fue la adecuada y la obra tuvo que ser detenida durante todo ese invierno. La construcción en Mutriku sólo se vio entorpecida por el retraso de los permisos pertinentes, pero la obra en sí no tuvo retrasos.

La estructura del dispositivo forma una cámara con dimensiones internas de 12 x 12 metros en el plano horizontal y una profundidad de 8 metros desde el nivel medio del agua, mientras que la altura por encima de este nivel es de 7.5 metros aproximadamente. Una entrada sumergida a la cámara permite el flujo de energía de las olas desde el océano que conecta a una abertura de 2.3 metros a la atmósfera, donde se instala una turbina Wells de 400 kW. En la FIGURA 2.13 se muestra un esquema del funcionamiento de un OWC.

#### 4.1.1 Inversión en OWC

La inversión total de la planta de Mutriku fue de € 24.5 millones, de los que € 4.4 millones fueron destinados a obras civiles y eléctricas de la planta. Mientras que los €20.1 restantes corresponden al rompeolas. Sin embargo, este dispositivo se puede adaptar a un rompeolas o alguna estructura existente reduciendo considerablemente los costos.

##### 4.1.1.1 Costos de operación OWC

Los costos de operación de un dispositivo OWC se estiman de € 0.175 por kWh generado.

## CAPÍTULO 4: SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS

### 4.1.2 Matriz de poder

Como otros dispositivos, los OWC presentan su matriz de poder en función a la altura media y el periodo medio de las olas, en la FIGURA 4.1 se muestra la matriz de poder del OWC PICO Plant.

		T <sub>m</sub> [s]																								
		4,00	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00	8,50	9,00	9,50	10,00	10,50	11,00	11,50	12,00	12,50	13,00	13,50	14,00	14,50	15,00	15,50	16,00
H <sub>med</sub> [m]	1,0	2,0	3,0	4,0	4,5	5,0	5,0	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,0	8,0	8,5	9,0	9,0	9,0	9,0	9,0	9,5	10,0	9,5	
	1,5	1,0	4,5	6,0	7,0	8,0	8,5	9,0	10,0	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0	14,0	15,0	15,5	16,0	16,5	17,0	18,0	19,0	19,0	19,0	19,0	
	2,0	4,0	8,5	9,0	10,0	11,0	12,0	13,0	14,5	16,0	18,5	21,0	22,5	24,0	26,0	28,0	29,0	30,0	30,5	31,0	33,0	35,0	35,5	32,0	34,5	
	2,5	6,0	9,0	12,0	13,5	15,0	17,0	19,0	22,0	25,0	29,0	33,0	37,5	42,0	45,0	48,0	50,5	53,0	55,5	58,0	56,5	55,0	50,5	58,0	58,5	
	3,0	8,0	7,5	15,0	18,0	21,0	25,5	30,0	35,0	40,0	45,0	50,0	55,0	60,0	66,0	72,0	74,0	76,0	83,0	90,0	90,5	91,0	93,5	96,0	95,5	
	3,5	0,0	10,0	20,0	24,5	29,0	35,5	42,0	49,0	56,0	67,0	78,0	84,0	90,0	91,5	93,0	100,5	108,0	115,5	123,0	126,0	129,0	125,0	121,0	124,5	
	4,0					40,0	48,5	57,0	66,5	76,0	88,0	100,0	109,0	118,0	123,0	128,0	133,0	138,0	148,0	158,0	160,5	161,0	159,5	156,0	165,5	
	4,5						50,0	61,0	72,0	84,5	97,0	113,0	125,0	138,5	152,0	162,5	173,0	182,0	191,0	195,0	199,0	200,0	201,0	198,5	196,0	203,5
	5,0							93,0	109,0	125,0	135,5	146,0	161,0	176,0	194,0	212,0	228,0	238,0	237,5	247,0	249,5	252,0	249,0	246,0	245,0	
	5,5								151,0	171,5	192,0	206,5	220,0	230,5	241,0	253,5	262,0	279,0	296,0	296,0	296,0	284,0	272,0	278,5		
	6,0									173,0	196,0	219,0	240,5	262,0	268,5	275,0	291,0	307,0	311,5	320,0	310,0	300,0	317,5	315,0	322,0	
	6,5											251,0	261,0	271,0	291,5	312,0	310,5	309,0	330,0	351,0	342,5	334,0	339,5	345,0	348,0	
	7,0												255,0	286,5	318,0	324,5	331,0	342,0	363,0	363,0	363,0	360,5	358,0	375,0	382,0	387,5
	7,5																									
	8,0																									

FIGURA 4.1 Matriz de poder OWC PICO Plant kW (Teillant et al., 2015)

Se aprecia en la FIGURA 4.1 que el dispositivo OWC tiene una mayor eficiencia cuando los valores de altura y periodo son altos.

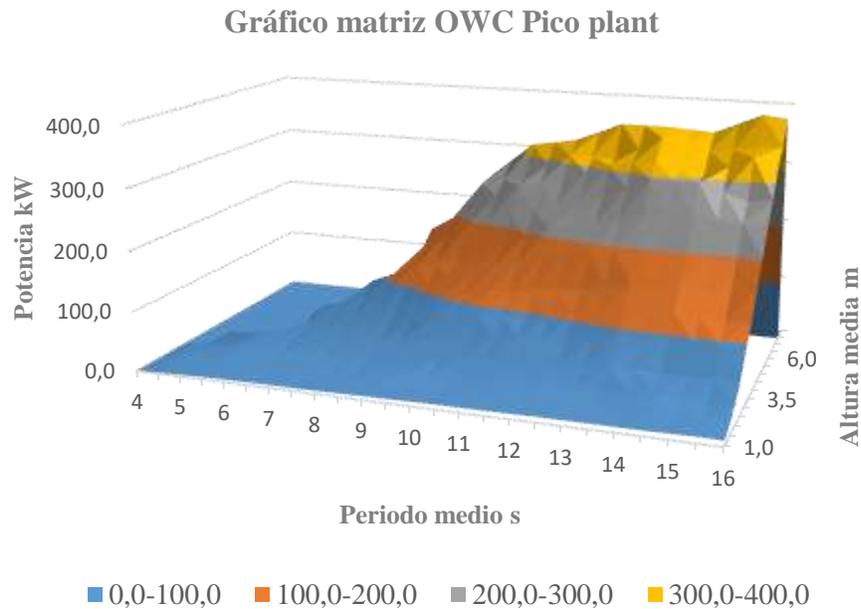


FIGURA 4.2 Gráfico de matriz OWC PICO Plant (Elaboración propia)

## CAPÍTULO 4: SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS

En la FIGURA 4.2 se ve de manera gráfica el comportamiento del dispositivo, sus valores máximos de conversión se alcanzan a partir de los 11 segundos del periodo medio y alturas mayores a cinco metros.

### 4.2 WAVE DRAGON

El Wave Dragon es un convertor de energía undimotriz *offshore* del tipo *overtopping*. Que consiste en una estructura de hormigón armado reforzado con lastre y acero, compuesta por un par de reflectores de ola con una plataforma al centro, en esta plataforma se encuentran una Rampla, que se ve sobrepasada por las olas. Estas olas van accediendo a un Reservorio, una especie de represa donde se acumula, para caer a través de unos ductos donde se encuentran unas Turbinas, las que serán el único elemento móvil de la estructura, como se muestra en la FIGURA 2.17.

En la TABLA 4.2 se muestran las dimensiones del dispositivo seleccionado de Wave Dragon.

TABLA 4.2 Características principales Wave Dragon 7 MW (Soerensen, 2009)

Características clave de Wave Dragon:	36 kW / m	
Peso, una combinación de concreto reforzado, lastre y acero	33.000	Ton
Ancho y largo totales	300 x 170	m
Longitud del reflector de onda	145	m
Altura	17.5	m
Depósito	8.000	m <sup>3</sup>
Cantidad de turbinas Kaplan de baja altura	16 - 20	
Generadores de imanes permanentes	16 - 20 x 350 - 440	kW
Potencia / unidad clasificada	7	MW
Producción anual de energía / unidad	20	GWh/año
Profundidad del agua	> 25	m

En conformidad con la caracterización del capítulo 4 se utilizará el dispositivo de 36 kW/m. Si bien no es el dispositivo a escala completa es del que más información se dispone para la estimación de potencia.

## CAPÍTULO 4: SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS

### 4.2.1 Costos de la tecnología

En la compañía de Wave Dragon tienen las siguientes proyecciones de costos de inversión (ver TABLA 4.3)

*TABLA 4.3 Costos de instalación por capacidad instalada kW (Soerensen, 2009)*

Potencia media del dispositivo kW / m	Primer dispositivo € / kW	Después de 100 dispositivos € / kW
24	4000	2300
36	3200	1875
48	2700	1.575

Los costos de inversión por capacidad instalada disminuyen considerablemente cuando se aumenta la capacidad del dispositivo.

Para estimar los costos de operación y mantenimiento el proveedor ofrece la TABLA 4.4 donde se estiman los costos de generación por kWh.

*TABLA 4.4 Costos de generación en kWh (Soerensen, 2009)*

Potencia media del dispositivo kW / m	Primer dispositivo € / kWh	Después de 100 dispositivos € / kWh
24	0.11	0.054
36	0,083	0.040
48	0,061	0.030

Ambas tablas están dadas para tres tipos de dispositivos Wave Dragon, diseñados para soportar climas de mayor o menor energía. Casi la mitad de los costos tanto de inversión como

## CAPÍTULO 4: SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS

de operación disminuyen con sólo duplicar la capacidad del dispositivo lo que también se debe apreciar con el aumento de la capacidad instalada de una planta de este dispositivo.

### 4.2.2 Matriz de poder

A continuación, en la FIGURA 4.3 se presenta la matriz de poder de este dispositivo.

		T <sub>e</sub> [s]																									
		4,00	4,50	5,00	5,50	6,00	6,50	7,00	7,50	8,00	8,50	9,00	9,50	10,00	10,50	11,00	11,50	12,00	12,50	13,00	13,50	14,00	14,50	15,00	15,50	16,00	
H <sub>o</sub> [m]	1,0	203	276	348	412	546	608	699	798	896	925	953	938	962	941	919	870	820	742	663	555	446					
	1,5	412	448	485	617	750	899	1049	1212	1375	1433	1491	1509	1527	1502	1477	1404	1332	1209	1086	912	737					
	2,0	621	621	621	802	981	1191	1356	1626	1853	1941	2029	2061	2092	2063	2034	1935	1844	1677	1509	1269	1028					
	2,5	1123	1123	1123	1213	1304	1609	1914	2258	2802	2752	2903	2972	3041	3017	2993	2868	2743	2504	2286	1910	1555					
	3,0	1624	1624	1624	1624	2027	2430	2890	3350	3563	3776	3883	3989	3970	3951	3796	3641	3332	3022	2552	2082						
	3,5	2581	2581	2581	2581	2581	2783	2984	3588	4191	4494	4796	4870	4945	4935	4826	4845	4765	4374	3983	3372	2761					
	4,0	3538	3538	3538	3538	3538	3538	3538	4285	5032	5424	5816	5858	5900	5900	5895	5889	5418	5418	4943	4191	3439					
	4,5	4719	4719	4719	4719	4719	4719	4719	5093	5466	5662	5858	5879	5900	5900	5897	5891	5658	5422	4822	4822	4222					
	5,0	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900					
	5,5	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5676	5452			
	6,0	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900
	6,5	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900
	7,0	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900
	7,5	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900
	8,0	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900

FIGURA 4.3 Matriz de poder de Wave Dragon kW (Soerensen, 2009)

En la matriz de poder se aprecia como Wave Dragon alcanza pronto su capacidad máxima, con un *peak* entre los 9 y los 12 segundos, para olas de 4 metros. Este aumento en la generación se aprecia de mejor forma en la FIGURA 4.4 que grafica la relación de potencia generada versus el periodo y la altura de las olas.

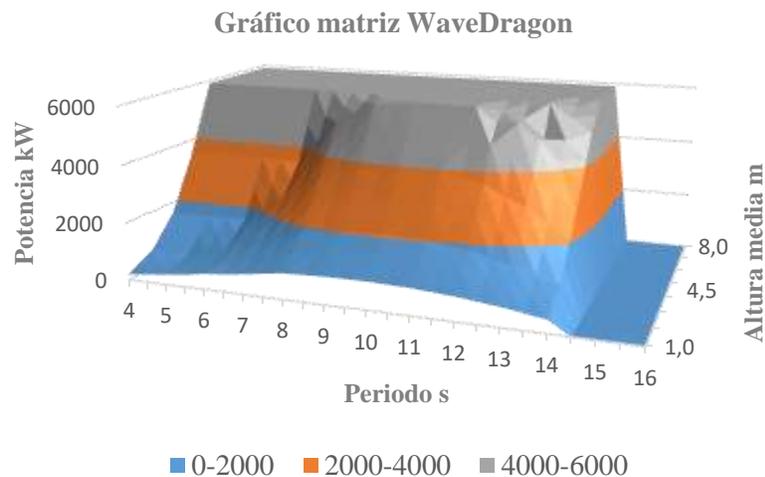


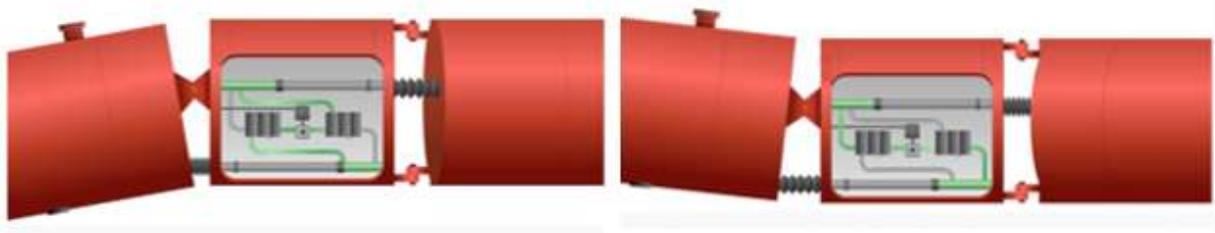
FIGURA 4.4 Gráfico de matriz de poder Wave Dragon (Elaboración propia)

## CAPÍTULO 4: SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS

En la FIGURA 4.4 se aprecia como los niveles más altos de energía se alcanzan en torno al periodo de 10 segundos y a partir de los 5 metros de altura se alcanza el valor máximo de generación de este dispositivo, independiente del periodo de las olas.

### 4.3 PELAMIS WAVE POWER

Como se vio en la FIGURA 2.13 Pelamis es un conversor undimotriz del tipo atenuador, una estructura metálica que opera semisumergida y consta de cuatro secciones tubulares, que dan un total de 140 metros de largo y 3.5 metros de diámetro. Estas secciones están conectadas por tres rótulas llamadas módulos de conversión como se muestra en la FIGURA 4.5 cuyo movimiento relativo, inducido por el oleaje a lo largo de su estructura, es resistido por motores oleohidráulicos a presión, ubicados dentro de los módulos de conversión, generando un máximo de 250 kW por módulo, sumando una potencia nominal por dispositivo de 750 kW. Esta energía es conducida mediante cables a un empalme al fondo marino el cual conduce la energía a la costa. (Rojas Larco, 2009)



*FIGURA 4.5 Módulo de Conversión (Consumer, 2014)*

#### 4.3.1 Inversión de Pelamis

Para la estimación de costos de Pelamis se tomará como referencia el parque instalado en Aguçadora, Portugal. En la TABLA 4.5 se muestra el presupuesto general de la planta portuguesa donde se calcula, del monto total invertido por la empresa, el costo aproximado por dispositivo.

## CAPÍTULO 4: SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS

*TABLA 4.5 Presupuesto central Pelamis (Andres & Muñoz, 2008)*

Tamaño Planta	<b>2.25</b>	<b>MW</b>
Potencia nominal por equipo	750	kW
Equipos instalados	3	
Costo Total	8.200.000	US\$
Costo unitario por equipo	<b>1.640.000</b>	<b>US\$</b>

Esto da una visión global de la inversión por equipo en Aguçadora considerando en forma general conexiones, fundaciones y el costo de instalación de la planta.

### 4.3.1.1 Costos de operación Pelamis

Los costos de operación y mantenimiento para el dispositivo Pelamis se estiman en € 0.011 por kWh generado.

### 4.3.2 Matriz de poder

En la FIGURA 4.6 se muestra la matriz de poder del dispositivo Pelamis, donde en la parte superior aparecen los datos de periodo en segundos y a la izquierda los valores de altura media en metros.

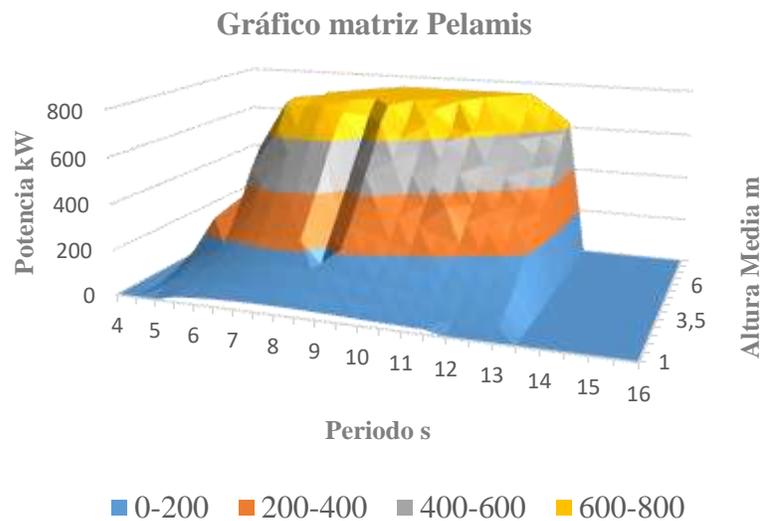


*FIGURA 4.6 Matriz de poder Pelamis kW (Andres & Muñoz, 2008)*

## CAPÍTULO 4: SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS

De la FIGURA 4.6 se puede inferir que existe un punto medio de altura y periodo donde la generación es máxima, con un límite de 750 kW por dispositivo. Existe un límite mínimo de generación alcanzado a la altura media de un metro, bajo este valor el dispositivo se encuentra ocioso.

En la FIGURA 4.7 se aprecian mejor los puntos altos de generación, representados en amarillo y cercano a los seis metros de altura media.



*FIGURA 4.7 Gráfico de la matriz de poder del generador Pelamis (Elaboración propia)*

Según la FIGURA 4.7 el dispositivo Pelamis aumenta su generación con la altura, pero no es así con el periodo, Pelamis aumenta su generación hasta llegar a los 9 segundos, pero comienza a disminuir su generación a medida que se supera este valor.

### 4.4 RESUMEN DE DISPOSITIVOS SELECCIONADOS

En la TABLA 4.6 se encuentra un resumen comparativo de los dispositivos seleccionados, con el principio de operación, orientación, capacidad instalada, los costos de operación e inversión estimados al 2018, en pesos chilenos y millones de pesos chilenos respectivamente. Comenzando por la ubicación para la que fueron seleccionados:

## CAPÍTULO 4: SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS

TABLA 4.6 Comparación de dispositivos seleccionados (Elaboración propia)

Ubicación (punto)	Dispositivo	Principio de operación	Orientación	Potencia nominal	Costos	
					Operación	Inversión
				MW	\$/kWh	M\$/kW
<b>Onshore</b> (3,1)	PICO Plant	OWC	Totalizador	0,4	72	3.14
<b>Nearshore</b> (1,2)	Wave Dragon	<i>Superposición</i>	Totalizador	7	17	0.77
<b>Offshore</b> (2,6)	Pelamis	Estructura flotante múltiple	Atenuador	0,75	4	0.77

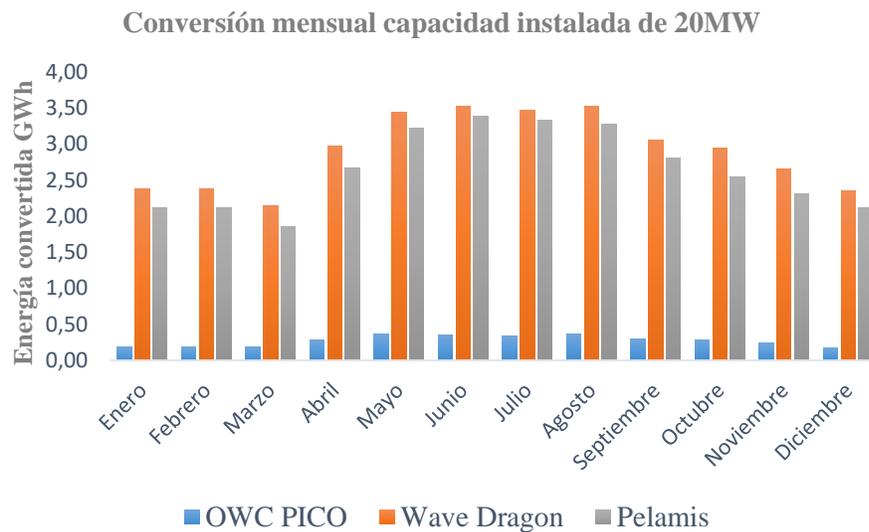
Los costos de inversión de Wave Dragon y Pelamis son más bajos que los de OWC y los costos operacionales de la tecnología *Onshore* son bastante más altos que las otras dos tecnologías. Esto se puede deber a los bajos niveles de energía que se alcanzan en la costa versus las tecnologías mar adentro. Lo que podría significar una gran ventaja para el dispositivo Pelamis por estar sometido a una potencia media muy mayor. Pero los costos operacionales de Wave Dragon son muy inferiores a los otros dispositivos.

## **CAPÍTULO 5: CÁLCULO DE POTENCIA Y EVALUACIÓN ECONÓMICA**

## 5.1 CÁLCULO DE POTENCIA

Para el cálculo de potencia se consideró una capacidad instalada de 20 MW tomando en cuenta la ley 20.257 que obliga a las empresas generadoras eléctricas con capacidad superior a 200 MW a comercializar un 10 % de ERNC, sean propios o contratados. Para esto se compuso cada planta por 50 dispositivos OWC, 3 dispositivos Wave Dragon y 27 dispositivos Pelamis, para *Onshore*, *Nearshore* y *Offshore* respectivamente.

Se realizó el cálculo de la energía de forma mensual para tener una mejor idea del desempeño de los dispositivos a lo largo del año, siguiendo la ecuación 2.7 donde el arreglo de probabilidad de ocurrencia (W) se obtiene del algoritmo descrito en el ANEXO 1, mientras que las matrices de potencia fueron presentadas en el CAPITULO 4, en las FIGURAS 4.1, 4.3 y 4.6 para OWC, Wave Dragon y Pelamis respectivamente. Los resultados de este cálculo se resumen en la FIGURA 5.1



*FIGURA 5.1 Conversión mensual comparada para una capacidad instalada de 20 MW (Elaboración propia)*

Se observa como el recurso undimotriz aumenta en los meses de invierno, esto podría servir para complementar recursos que son débiles en estos meses como la energía solar.

## CAPÍTULO 5: CÁLCULO DE POTENCIA Y EVALUACIÓN ECONÓMICA

La generación del OWC es diez veces menor que las otras dos tecnologías analizadas y Pelamis tienen un desempeño parejo con Wave Dragon, aunque logra una conversión menor.

En la TABLA 5.1 se presentan los factores de planta alcanzados por las tecnologías estudiadas y se hace una comparación con un factor de planta mínimo para que la instalación sea rentable en las condiciones actuales de costo de operación, inversión y venta. Los cálculos del factor de planta y el factor de planta mínimo rentable se realizaron a través de las ecuaciones 2.8 y 2.11, siguiendo el método descrito en las secciones 2.6.1 y 2.6.2 respectivamente.

*TABLA 5.1 Comparación de factores de planta y factores de planta mínimo rentable (Elaboración propia)*

	<b>OWC PICO</b>	<b>Wave Dragon</b>	<b>Pelamis</b>
<b>Factor de Planta %</b>	1,93	19,50	18,43
<b>Factor de planta mínimo rentable %</b>	21	26	27

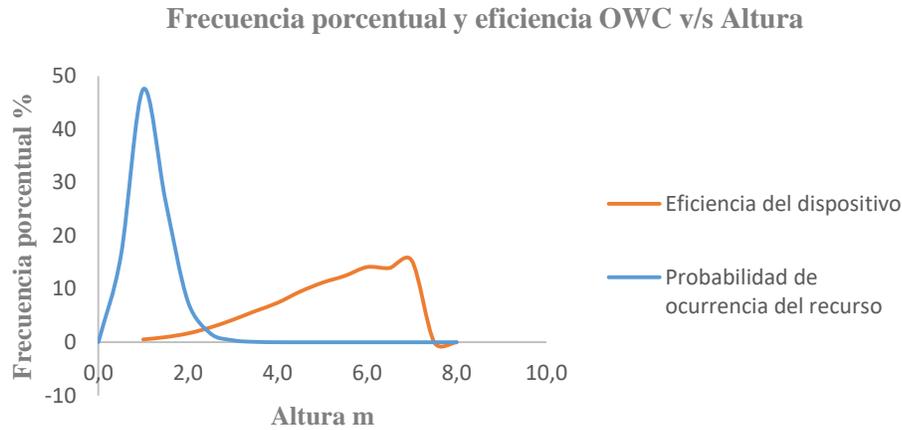
La tecnología OWC no alcanza un factor de planta del 2%, muy lejos del 21% que debería alcanzar para ser rentable, sin embargo, ninguna tecnología alcanza la rentabilidad pues Wave Dragon alcanza un 19.50% de 26% y Pelamis un 18.43% de 27%. Esto se puede deber a que la capacidad de conversión de los dispositivos sea baja debido a la inmadurez de las tecnologías o estos no ajustan bien al recurso undimotriz de Constitución.

Para evaluar esto se considera que la potencia teórica sigue la lógica de una intersección. Entonces la capacidad de generación de cada dispositivo se puede analizar de mejor forma comparando la intersección de las gráficas de probabilidad de ocurrencia de la ubicación de cada dispositivo versus la eficiencia global del dispositivo con respecto a su altura y periodo. Los dispositivos con un mayor intervalo de intersección entre estas dos curvas ajustan de mejor forma a la energía disponible del punto estudiado y debiesen obtener factores de planta mayor si las mayores concentraciones de olas coinciden con los puntos más altos de la curva de eficiencia.

Así en la FIGURA 5.2 se puede ver la gráfica de altura v/s frecuencia porcentual para el caso *Onshore*, en este caso el dispositivo OWC PICO Plant alcanza sus mayores valores de eficiencia

## CAPÍTULO 5: CÁLCULO DE POTENCIA Y EVALUACIÓN ECONÓMICA

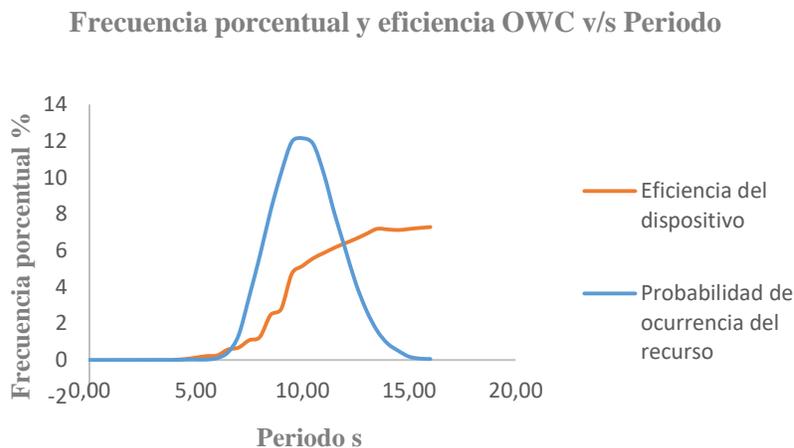
entre los 5 y 8 metros de altura, mientras que las alturas alcanzadas por las olas de esta ubicación por lo general no alcanzan los cuatro metros.



*FIGURA 5.2 Altura v/s Frecuencia porcentual ubicación Onshore dispositivo PICO Plant (Elaboración propia)*

El mismo análisis se puede realizar con el periodo, pero hay que considerar que separar la altura del periodo no tiene sentido para el cálculo de potencia.

Como se puede ver en la FIGURA 5.3 el intervalo de funcionamiento del dispositivo coincide con los datos del periodo del recurso en la ubicación.



*FIGURA 5.3 Periodo v/s Frecuencia porcentual ubicación Onshore dispositivo Pico Plant (Elaboración propia)*

## CAPÍTULO 5: CÁLCULO DE POTENCIA Y EVALUACIÓN ECONÓMICA

A pesar de que los periodos coinciden la máquina se mantiene ociosa gran parte del tiempo debido a que las alturas de las olas de esta ubicación casi no alcanzan la altura para ponerla en marcha.

Para el caso *Nearshore* parece suceder algo parecido, con la diferencia que más de la mitad de los valores de altura logran mover las turbinas del Wave Drago a pesar de no alcanzar su máxima eficiencia, como se puede ver en la FIGURA 5.4.

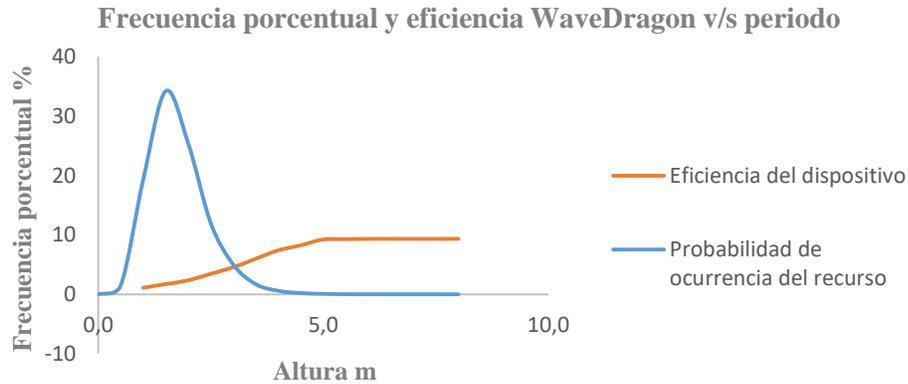


FIGURA 5.4 Altura v/s Frecuencia porcentual ubicación *Nearshore* dispositivo Wave Dragon (Elaboración propia)

Para este caso tiene sentido analizar la gráfica de periodo versus frecuencia porcentual de la FIGURA 5.5 para verificar que sus intervalos se intercepten.

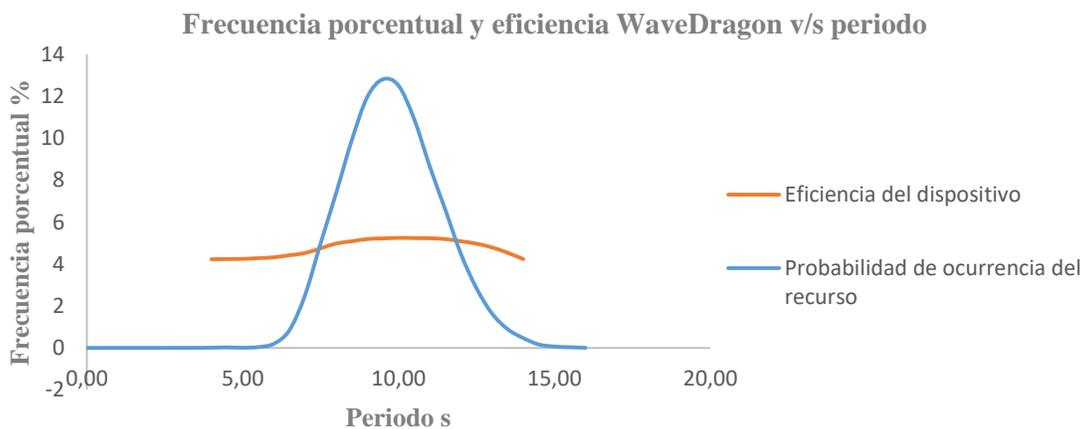
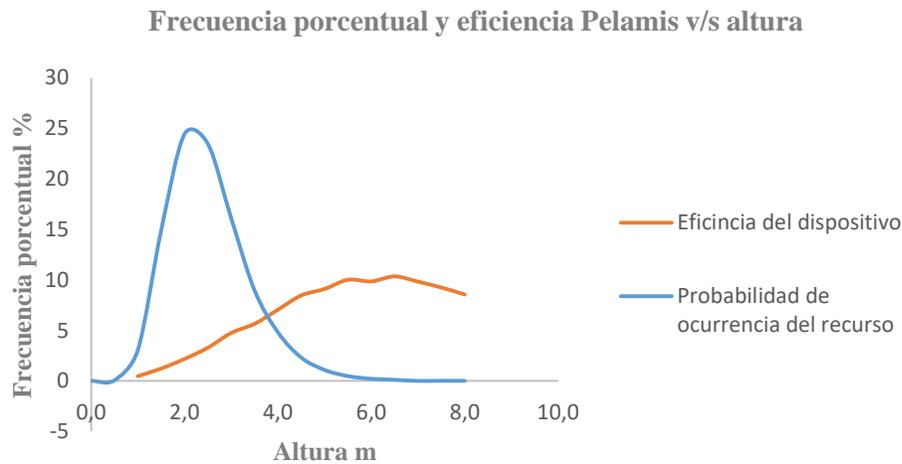


FIGURA 5.5 Periodo v/s Frecuencia porcentual ubicación *Nearshore* dispositivo Wave Dragon (Elaboración propia)

## CAPÍTULO 5: CÁLCULO DE POTENCIA Y EVALUACIÓN ECONÓMICA

Se puede ver que todo el intervalo de periodo del punto *Nearshore* coincide con la eficiencia del dispositivo. También cabe mencionar que resalta la relativa uniformidad de la eficiencia de Wave Dragon con respecto al periodo, esto resulta interesante porque se entiende que la funcionalidad del dispositivo depende principalmente de la altura de las olas y no tanto de su periodo. Esto explica que presente la mayor conversión de los tres dispositivos seleccionados, puesto que ajusta a la mayoría de las olas de la ubicación, aunque no funcione a su máxima capacidad.

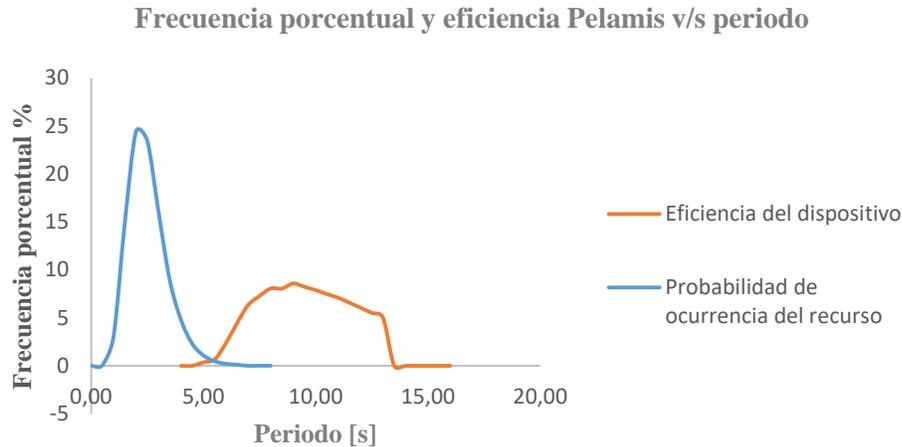
Finalmente, para el caso *Offshore* se presenta la FIGURA 5.6 de altura versus frecuencia porcentual para el dispositivo Pelamis.



*FIGURA 5.6 Altura v/s Frecuencia porcentual ubicación Offshore dispositivo Pelamis (Elaboración propia)*

En este gráfico se ve que el dispositivo reacciona bastante bien a la altura que ofrece la ubicación Offshore seleccionada, si bien, no ajusta en su máxima eficiencia, no se debería mantener ocioso para la gran mayoría de olas de la ubicación. Entonces el problema de su bajo rendimiento se encuentra en su periodo, como se puede ver en la FIGURA 5.7.

## CAPÍTULO 5: CÁLCULO DE POTENCIA Y EVALUACIÓN ECONÓMICA



*FIGURA 5.7 Periodo v/s Frecuencia porcentual ubicación Offshore dispositivo Pelamis (Elaboración propia)*

El periodo con el que es capaz de funcionar el dispositivo no coincide con el periodo de las olas de la ubicación (o coinciden muy poco). Se puede concluir entonces que el dispositivo Pelamis ha alcanzado un relativamente alto nivel de potencia convertida debido a que la ubicación seleccionada tiene un alto nivel de potencia media, pero no por su capacidad de adaptarse al recurso.

### 5.2 EVALUACIÓN ECONÓMICA

Para el análisis económico se siguieron las estimaciones y consideraciones especificadas en la sección 2.7. En la TABLA 5.1 se sintetizan los VAN alcanzados por cada dispositivo.

*TABLA 5.2 Comparación de VAN (Elaboración propia)*

	<b>OWC PICO</b>	<b>Wave Dragon</b>	<b>Pelamis</b>
<b>VAN MCLP</b>	\$ -74.867	\$ -21.444	\$ -90.746

A pesar de la baja producción de OWC PICO consigue un VAN mayor al de Pelamis. Esto sólo demuestra que el VAN por si solo puede ser engañoso. A continuación, se presenta un resumen de la evaluación económica de los tres dispositivos.

## CAPÍTULO 5: CÁLCULO DE POTENCIA Y EVALUACIÓN ECONÓMICA

### Flujo de caja OWC PICO

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 29	Año 30
Inversión	<b>-\$62.808</b>	\$0	\$0	\$0	\$0
Costo operación	0	-\$236	-\$241	-\$422	-\$431
Depreciación	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
Valor de mercado	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
Ingresos	\$0	\$302	\$309	\$541	\$552
FNAI	-\$62.808	\$66	\$68	\$119	\$121
IVA	-\$12.562	-\$13	-\$14	-\$24	-\$24
FNDI	-\$75.369	\$53	\$54	\$95	\$97
FEDI	\$503	\$53	\$54	\$95	\$97
<b>VAN</b>	<b>-\$74.867</b>				
<b>TIR</b>	<b>-15%</b>				

FIGURA 5.8 Resumen de evaluación económica de PICO Plant (Elaboración propia)

Para una planta de 20 MW con la tecnología de PICO Plant se necesita una inversión de 62.808 millones de pesos. Las ventas de los 30 años no alcanzan a financiar ni siquiera los impuestos asociados a la inversión. La TIR negativa no tiene sentido más que como indicador de lo poco rentable de la inversión. Esto es producto de la baja conversión, se pueden comparar los ingresos con los de la evaluación económica de Wave Dragon (FIGURA 5.9)

### Flujo de caja Wave Dragon

	Año 0	Año 1	Año 2	Año 29	Año 30
Inversión	<b>-\$27.062</b>	\$0	\$0	\$0	\$0
Costo operación	0	-\$1.160	-\$1.185	-\$2.076	-\$2.120
Depreciación	\$0	-\$721	-\$721	-\$721	-\$721
Valor de mercado	\$0	\$0	\$0	\$0	\$5.445
Ingresos	\$0	\$3.209	\$3.277	\$5.743	\$5.863
FNAI	-\$27.062	\$1.329	\$1.372	\$2.946	\$8.468
IVA	-\$5.412	-\$266	-\$274	-\$589	-\$1.694
FNDI	-\$32.474	\$1.063	\$1.097	\$2.357	\$6.775
FEDI	\$11.030	\$1.063	\$1.097	\$2.357	\$6.775
<b>VAN</b>	<b>-\$21.444</b>				
<b>TIR</b>	<b>3%</b>				

FIGURA 5.9 Resumen de evaluación económica de Wave Dragon (Elaboración propia)

## CAPÍTULO 5: CÁLCULO DE POTENCIA Y EVALUACIÓN ECONÓMICA

Para la misma capacidad instalada Wave Dragon tiene ingresos por 3.209 millones de pesos al primer año de funcionamiento. Además, la inversión es mucho menor, sin embargo, no alcanza a ser rentable. Habría sido necesaria una tasa de interés de un 3% anual para un VAN igual a cero.

También la inversión de Pelamis es mayor, de hecho, es la mayor de todas, como se puede ver en la FIGURA 5.10

**Flujo de caja Pelamis**

	<b>Año 0</b>	<b>Año 1</b>	<b>Año 2</b>	<b>Año 29</b>	<b>Año 30</b>
Inversión	<b>-\$82.345</b>	\$0	\$0	\$0	\$0
Costo operación	0	\$141	\$144	-\$252	-\$257
Depreciación	\$0	-\$2.398	-\$2.398	\$0	\$0
Valor de mercado	\$0	\$0	\$0	\$0	\$0
Ingresos	\$0	\$2.927	\$2.989	\$5.238	\$5.348
FNAI	-\$82.345	\$669	\$734	\$4.986	\$5.091
IVA	-\$16.469	-\$134	-\$147		
FNDI	-\$98.814	\$535	\$587	\$4.986	\$5.091
FEDI	\$8.068	\$535	\$587	\$4.986	\$5.091
<b>VAN</b>	<b>-\$90.746</b>				
<b>TIR</b>	<b>-3%</b>				

FIGURA 5.10 Resumen de evaluación económica de Pelamis (Elaboración propia)

El valor del VAN para Pelamis es menor incluso al de PICO Plant, pero comienza de una inversión mayor, también juega en contra la depreciación escogida que a su vez depende del valor residual considerado. Sólo para ver la influencia de la depreciación se realizó el cálculo de esta misma evaluación, pero considerando la depreciación como cero. Así se obtuvo un VAN de -75.568 millones de pesos y una TIR del 0% lo que demuestra que independiente de la depreciación una planta de 20 MW de Pelamis está muy lejos de ser rentable.

De la comparación antes expuesta se puede concluir que sólo la tecnología del Wave Dragon podría alcanzar la rentabilidad bajo ciertas condiciones.

CAPÍTULO 5: CÁLCULO DE POTENCIA Y EVALUACIÓN ECONÓMICA

Existen 4 variables que influyen fuertemente en el resultado de esta evaluación, que son el precio del dólar considerando que los dispositivos se importarían (o parte de estos), el precio de venta de la electricidad, el tamaño de la planta ya que muchos costos tanto de inversión como de operación se reparten en plantas de mayor tamaño, y finalmente el año en que se realiza la inversión (Año 0) teniendo en cuenta el acelerado avance que en general se espera alcancen las energías oceánicas en los próximos años, no es lo mismo realizar la inversión inicial en 2018 que en 2030, esto también influirá en los costos de operación. Es por lo que para una mayor comprensión de esta estimación y su evolución en el tiempo se analizó el VAN y la TIR para tres tamaños de plantas de Wave Dragon: 20, 200 y 700 MW. Estos fueron proyectados con Año 0 entre 2018 y 2030, con intervalos de 2 años. Finalmente se agregaron cuatro escenarios distintos, con Dólar y BT1 favorable y desfavorable (con una variación de un 20% cada uno), además de las condiciones actuales que replica las estimaciones de la evaluación económica anterior. Esta comparación se presenta en las FIGURAS 5.11, 5.12 y 5.13:

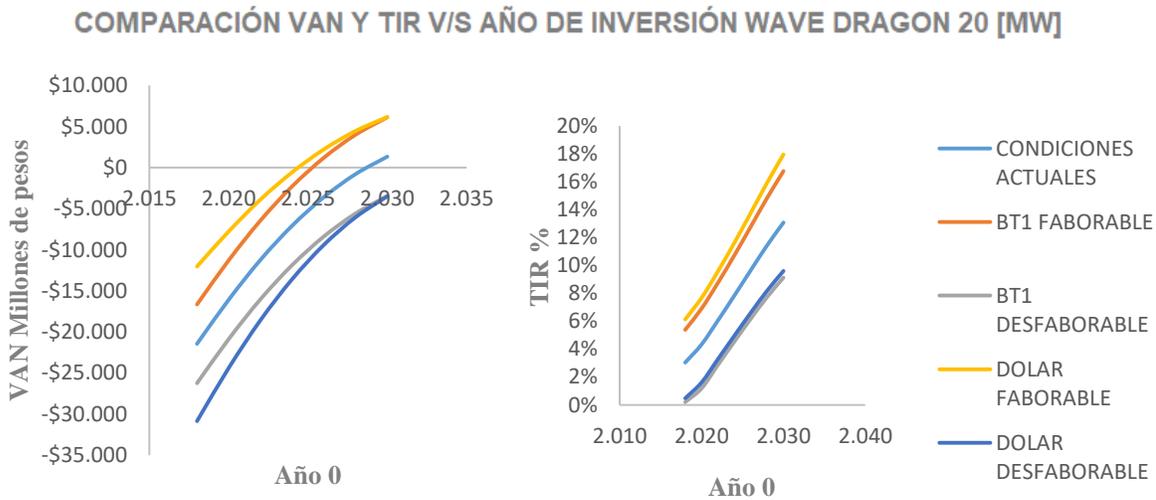


FIGURA 5.11 Planta Wave Dragon 20 MW proyectada entre 2018 y 2030  
(Elaboración propia)

En la FIGURA 5.11 se exponen los valores de VAN (a la izquierda) y TIR (a la derecha) para una planta de Wave Dragon de 20 MW.

Se aprecia como en condiciones actuales el VAN alcanza un valor positivo al 2029, se observa como la curva de condiciones favorables, es decir, Dólar un 20% más bajo o BT1 un

## CAPÍTULO 5: CÁLCULO DE POTENCIA Y EVALUACIÓN ECONÓMICA

20% más alto, tiene un desfase a la izquierda de aproximadamente dos años con respecto a la curva de condiciones actuales. Por otro lado, las curvas de condiciones desfavorables presentan un desfase a la derecha con respecto a la misma. Esto quiere decir que en condiciones favorables los indicadores de VAN y TIR se alcanzan dos años antes o dos años después en condiciones desfavorables que en condiciones actuales.

Si la inversión se hiciera el 2030 en el peor de los casos considerados alcanzaría una TIR cercana al 10%. Se puede observar que, en el caso del VAN, al año 2030 las curvas de Dólar y BT1 se juntan, el precio del BT1 va tomando cada vez más importancia. Esto se aprecia mejor para plantas mayores.

En la FIGURA 5.12 se muestra un aumento de la capacidad instalada a 200 MW:

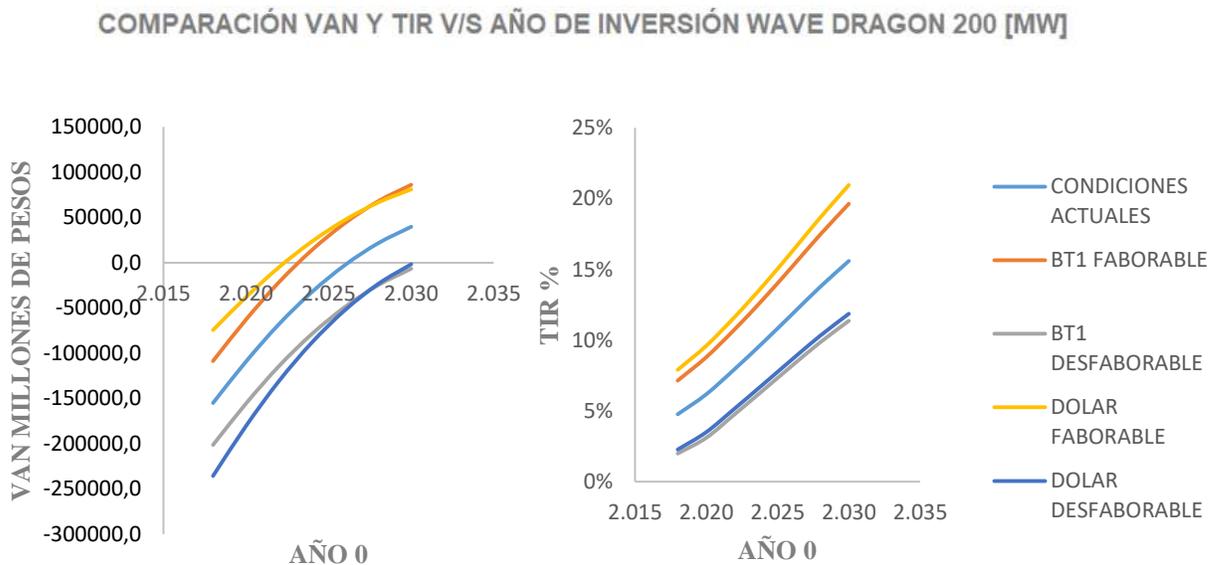


FIGURA 5.12 Planta Wave Dragon 200 MW proyectada entre 2018 y 2030

(Elaboración propia)

Un aumento en la potencia obviamente aumentaría la inversión inicial de la planta, pero junto con la inversión aumentan los retornos. En la FIGURA 5.12 se ve que los resultados de VAN han crecido considerablemente, son de un orden de magnitud diez veces mayor, pero la rentabilidad también ha aumentado. Un proyecto de 200 MW en condiciones actuales se vuelve rentable el año 2026, la rentabilidad de todas las situaciones analizadas aumenta en comparación

## CAPÍTULO 5: CÁLCULO DE POTENCIA Y EVALUACIÓN ECONÓMICA

a la planta de 20 MW, aunque el comportamiento del VAN no varía tanto en relación al caso anterior, los dos casos favorables y desfavorables analizados también tienen un punto en que se cortan, antes que en la FIGURA 5.11 siendo más influyente el valor del BT1 en el tiempo. Por su parte los valores de la TIR han aumentado para el año 2018 en un 2.5%, sin embargo, no aumentan considerablemente al 2030, es decir, que para una planta de este tamaño el año en que se hace la inversión inicial no influye tan fuertemente como en el caso anterior (las pendientes de las gráficas son menores), aunque no deja de hacerlo pues en condiciones actuales la TIR parte en un 5%. Al 2026 ya alcanza el 12%, tres años antes que una planta de 20 MW.

En la FIGURA 5.13 se muestra este mismo análisis, pero para una planta de 700 MW, este valor fue escogido porque las proyecciones de costos del proveedor se realizan de uno a 100 dispositivos, siendo este último considerablemente más conveniente que el primero, como se muestra en las TABLAS 4.3 y 4.4.

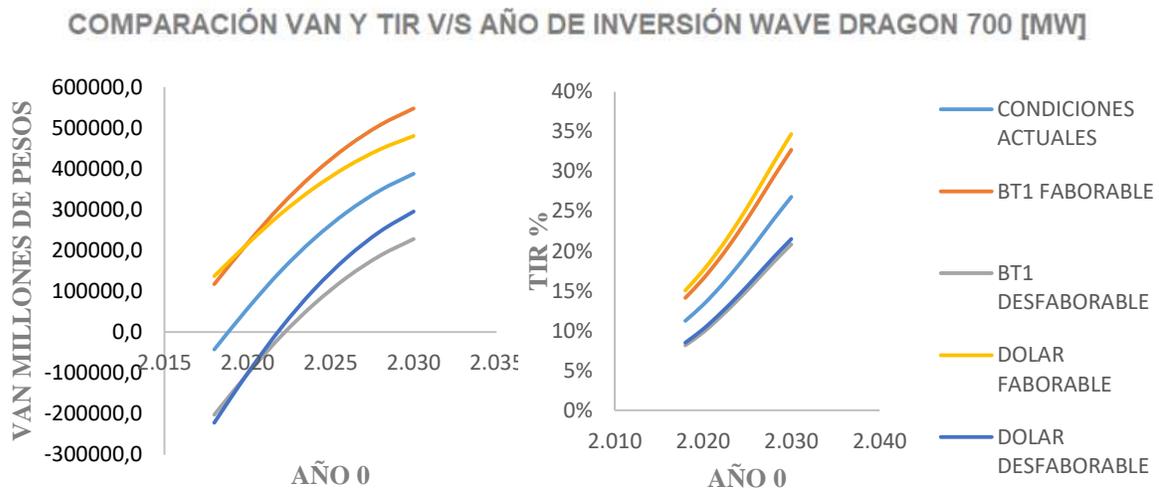


FIGURA 5.13 Planta Wave Dragon 700 MW proyectada entre 2018 y 2030

(Elaboración propia)

Es por esta diferencia de costos que se separan completamente las gráficas favorables y desfavorables de BT1 y Dólar, pues los costos de operación afectados por el precio del último son mucho menores que los casos anteriores. Comparativamente los retornos por el precio de BT1 son más influyentes en el resultado de la evaluación y esto se acentúa a medida que aumenta el año 0.

## CAPÍTULO 5: CÁLCULO DE POTENCIA Y EVALUACIÓN ECONÓMICA

En condiciones actuales, para una inversión de 533.000 millones de pesos se obtiene un VAN de -42.352 millones de pesos y una TIR del 11% para el año 2018. Las TIR resultan mucho mayores si la inversión se hiciera en 2030, en condiciones actuales la TIR superaría el 25% y en condiciones desfavorables alcanzaría un 21%.

Analizando los tres gráficos se puede apreciar que, a diferencia del VAN, la TIR tiene un comportamiento relativamente regular, claramente aumenta a medida que aumenta el tamaño de la planta y el año 0, alcanzando en el mejor de los casos (Dólar favorable) un 35% para una planta de 700 MW. Este análisis resulta relevante debido a que la TIR no es afectada por la tasa de interés que se escoja (TREMA) la que variaría dependiendo de quién haga el estudio. Con este análisis sólo bastaría determinar el punto en que la TIR es mayor o igual a la TREMA para que este sea aceptable.

Finalmente, no se intenta decir que mientras más tarde se realice la inversión, mayores serán las ganancias, pues se estima que el costo marginal de estas tecnologías se estabilice cerca de los 30 centavos de dólar por kWh al 2030, eso explica que las curvas de VAN no sean una recta.

### 5.3 ANÁLISIS AMBIENTAL

Aunque deberían, no todos los aspectos de un proyecto como este pueden ser cuantificables económicamente, pero todo proyecto de ingeniería debería considerar el impacto social y ambiental que tendría su implementación. El impacto ambiental que puede tener un dispositivo undimotriz queda resumido en el ANEXO 3 junto a la clasificación del impacto según su significancia. Según la Bióloga Marina Caroll García, en Chile un dispositivo undimotriz tendría un impacto ambiental medianamente significativo debido al ruido que generaría, esto se agudiza en dispositivos OWC, pero para el caso de Wave Dragon esto es considerablemente menor ya que se considera un dispositivo “silencioso”, sin embargo, no está libre de derrames por hidrocarburos en su operación, ya que su sistema móvil (la turbina) está en contacto directo con el agua. Pero también es considerado muy significativo el impacto positivo que genera la presencia de estos dispositivos en la producción de nuevos sustratos (creación de arrecife artificial) para el crecimiento y asentamiento de especies.(BUSTOS, 2014)

## CAPÍTULO 5: CÁLCULO DE POTENCIA Y EVALUACIÓN ECONÓMICA

Entorpece poco significativamente las rutas migratorias de aves, lo que es un beneficio ambiental considerablemente alto versus los dispositivos eólicos que no alcanzan a ser evadidos por estas provocando un impacto muy significativo en algunas especies.(Castillo, 2014)

En términos sociales el dispositivo Wave Dragon utiliza un volumen mucho menor que una turbina eólica, por lo que en cuanto a impacto visual es menor que el generado por una planta eólica Offshore, incluso puede resultar positivo a largo plazo ya que los mayores impactos positivos se dan durante la operación y los mayores impactos negativos se dan durante la instalación.

Un parque undimotriz de 3 dispositivos Wave Dragon en la ubicación seleccionada evita la emisión de diez mil setecientas toneladas de CO<sub>2</sub> a la atmósfera, sin considerar las emisiones de material particulado y otros gases producto de la quema de combustibles fósiles ni el costo que al país le significa la importación de estos.

## **CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES**

## CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

Al comienzo de este proyecto se plantea evaluar la factibilidad técnica y económica de la implementación de un sistema de generación eléctrica basado en la energía undimotriz para el sector de Constitución. Para alcanzar esto fue necesario definir ciertos objetivos específicos los que se fueron cumpliendo sucesivamente.

Primero se realizó una caracterización del potencial undimotriz en la zona de Constitución, para ello fue necesario acudir a softwares descritos anteriormente, como son Google Earth y Explorador Marino. El primero sirvió para la subdivisión del sector según la cercanía a la costa (Ubicación: Onshore, Nearshore y Offshore) para esto se definieron criterios de profundidad, las que también fueron extraídas de este software. Estos datos permitieron observar la influencia de los perfiles de elevación en la potencia media de las olas. Se analizaron 4 latitudes de Sur a Norte, con 18 puntos en total. Del segundo se extrajo los datos de altura y periodo característico desde 1979 al 2010, 277.798 datos con una distribución continua por cada punto a analizar. Para tratar tal cantidad de datos fue necesario elaborar un programa en Scilab para discretizarlos. Ayuda de sobremanera la elaboración de gráficos para comparar los puntos seleccionados para cada ubicación. Se concluye esta fase con un análisis detallado de altura y periodo característicos por frecuencia porcentual de los tres puntos seleccionados.

En segundo lugar, se discriminó los tipos de captador undimotriz apropiados para la caracterización realizada. Para esto se utilizó como primer criterio de discriminación el estado de desarrollo de la tecnología, es decir, que el dispositivo se haya probado en el mar para utilizar datos verídicos de conversión, para esto cada dispositivo debe haber sido probado con sensores que midan la altura y periodo de las olas. Este filtro bastó para discriminar muchas tecnologías, pero fue necesario discriminar además por potencia media para la que fue diseñado el dispositivo, pues no sería lógico arriesgar la inversión sometiéndolo a potencias medias que no pueda soportar. Como resultado se obtuvo una tecnología ajustable a cada ubicación seleccionada en el objetivo anterior.

Luego se realizó un análisis y comparación de las tres tecnologías seleccionadas. Para esto se recabó información haciendo hincapié en los costos asociados a la tecnología y la matriz de poder. Finalmente se resume en un cuadro que compara su principio de operación, orientación, capacidad instalada, costos de operación y de inversión.

## CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

Para calcular el potencial eléctrico teórico de cada tecnología seleccionada se realizó una macro en función de la capacidad instalada. Se seleccionó una capacidad instalada de 20 MW tomando como guía la legislación chilena. Obteniendo un gráfico de barras que compara la conversión mensual entre los diferentes dispositivos. Al observar los bajos factores de planta alcanzados por todos los dispositivos se optó por comparar su eficiencia gráficamente versus la frecuencia porcentual del recurso, concluyendo que su capacidad de adaptarse al recurso es escasa. Por lo que para hacer un análisis más detallado de algún dispositivo es necesario dimensionarlo para las condiciones del sector.

Con los datos anteriores se estimó desde el punto de vista económico la implementación de los captadores permitiendo seleccionar el más conveniente a través de los criterios VAN y TIR. Considerando que las variables más influyentes de esta evaluación son el precio del dólar, el precio de venta de la electricidad BT1, el Año 0 de la inversión y el tamaño de la planta, se finalizó esta evaluación con gráficas que comparan el VAN y la TIR de tres tamaños de planta diferente (20, 200 y 700 MW), proyectando el Año 0 desde el 2018 al 2030, variando en un 20% los valores del Dólar y BT1.

Para finalizar se mencionan las consideraciones ambientales que puede tener un dispositivo undimotriz.

Se debe tener en cuenta que este trabajo no incluye el dimensionamiento y armado de ninguna estructura, dada la inversión y el tiempo que esto significa. Por las mismas razones está en los alcances del proyecto la estimación económica a nivel de anteproyecto.

Es importante destacar que este proyecto, aparte del análisis de una instalación WEC concreta, ha desarrollado una metodología para la selección de la ubicación como un algoritmo para el tratamiento de datos, evaluación del rendimiento y estimación económica de una planta undimotriz que, eventualmente, facilitará dicha comparación en análisis futuros de tecnologías similares.

Considerando futuros estudios sería importante realizar el análisis gráfico, que contrasta la eficiencia del convertidor con la frecuencia porcentual del recurso, en la etapa de discriminación del dispositivo, para asegurarse que estos ajusten con las características del recurso. Incluso y

## CAPÍTULO 6: CONCLUSIONES

de ser posible en esta etapa sería ideal contar con las capacidades técnicas para redimensionar los dispositivos y así forzarlos a calzar con el recurso, de esta forma una comparación de tecnologías podría ser más justa y los niveles de conversión como las evaluaciones económicas resultarían más positivas.

Al momento se puede decir que la tecnología undimotriz no es rentable para una planta de 20 MW para el sector de Constitución antes del 2029. Sólo por este motivo, una empresa difícilmente se inclinaría por una planta undimotriz de estas características, lo que obviamente no contribuiría al desarrollo de estas ni la diversificación de la matriz eléctrica del país. Plantas de mayor tamaño alcanzan la rentabilidad en tiempos prudentes, pero sin experiencias comparables en el mundo, por el momento, invertir en energía undimotriz es demasiado riesgoso. Sin embargo, considerando los beneficios sociales y ambientales que una planta como esta podría significar y el camino que todavía queda por recorrer para mejorar estas tecnologías sería esperable que se comiencen a realizar inversiones de i+d en undimotriz, para minimizar este riesgo.

## BIBLIOGRAFÍA

### **BIBLIOGRAFÍA**

- Andres, J., & Muñoz, V. (2008). Generación eléctrica mediante el aprovechamiento del oleaje marítimo costero.
- Blanco, M. (2015). Desarrollo de un Procedimiento Basado en Algoritmos de Optimización para el Dimensionado de Absorbedores Puntuales Aplicados a la Conversión de Energía Undimotriz. Retrieved from <http://oa.upm.es/39648/>
- Bolsa de comercio de Santiago. (2018). Bolsa de comercio de Santiago. Retrieved from <http://www.bolsadesantiago.com/Paginas/home.aspx>
- BUSTOS, C. G. (2014). *Energía Undimotriz: Evaluación de su potencial factibilidad ambiental en Chile*. Universidad Austral de Chile.
- CASTILLO, P. D. (2014). ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE UN SISTEMA EÓLICO ON-GRID MENOR A 5 [ KW ] EN LA CIUDAD.
- Consumer, E. (2014). Energía Undimotriz explicada animada. Retrieved from [http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/mtria\\_ensenanza/ene\\_ren/swf/energia\\_mareomotriz2.swf](http://www.virtual.unal.edu.co/cursos/ciencias/mtria_ensenanza/ene_ren/swf/energia_mareomotriz2.swf)
- Davies, G. (2014). Recomendaciones para la Estrategia de Energía Marina de Chile : un plan de acción para su desarrollo. *Environmental Services and Products*.
- Errazuriz y asociados. (2012). *Energía Marina En Chile, avanzando en el desarrollo del recurso chileno*.
- Facultad de ciencias físicas y matemáticas de la Universidad de Chile. (2013). *Documentación del Explorador de Energía Marina*.
- Fernández, J. (2008). Una aproximación al aprovechamiento de la energía de las olas para la generación de electricidad. *Universidad Politécnica de Madrid*, 147. Retrieved from

## BIBLIOGRAFÍA

file:///C:/Users/luis/Desktop/Termo/PFC\_JULIA\_FERNANDEZ\_CHOZAS.pdf

Fernández, P. (n.d.). *Energía de las Olas*. Retrieved from pfernandezdiez.es

González, J. A. C., Pérez, R. C., Santos, A. C., & Gil, M. A. C. (2009). *Centrales de energías renovables*.

Karmenu Vella (comisario de Medio Ambiente, A. M. y P. (2016). Un año de despegue para la energía oceánica. *ASUNTOS MARÍTIMOS Y PESCA*. Retrieved from [https://ec.europa.eu/dgs/maritimeaffairs\\_fisheries/magazine/es/política/take-year-ocean-energy](https://ec.europa.eu/dgs/maritimeaffairs_fisheries/magazine/es/política/take-year-ocean-energy)

López Ropero, I., Andreu, J., & Ceballos, S. (2015). *Técnicas de modulación para convertidores de fijación por diodos de tres niveles multifase y control eficiente de dispositivos captadores de energía de las olas*.

Raúl Cáceres Sáez. (2016). Energías Renovables No Convencionales - Factibilidad de la energía oceánica en Chile, (57), 111321. Retrieved from <https://www.minminas.gov.co/energias-renovables-no-convencionales>

Rojas Larco, J. A. (2009). Evaluación Técnico Económica De Una Central Undimotriz Con Tecnología Pelamis. Retrieved from [http://www.tesis.uchile.cl/bitstream/handle/2250/103588/rojas\\_jl.pdf?sequence=3](http://www.tesis.uchile.cl/bitstream/handle/2250/103588/rojas_jl.pdf?sequence=3)

Sawin, J., Seyboth, K., & Sverrisson, F. (2016). Energías Renovables 2016. *Reporte de La Situación Mundial*, 31. Retrieved from [www.ren21.net/gsr](http://www.ren21.net/gsr)

Sistema europeo de negociación de CO<sub>2</sub>. (2018). Sendeco2. Retrieved from <http://www.sendeco2.com/es/>

Soerensen, H. C. (2009). *Development and validation of technical and economic feasibility of a multi MW Wave Dragon offshore wave energy converter*.

Systep. (2014). Reporte Mensual del Sector Eléctrico SIC y SING - Junio 2014, 10, 11. Retrieved from

## BIBLIOGRAFÍA

[http://systep.cl/documents/reportes/042014\\_Systep\\_Reporte\\_Sector\\_Electrico.pdf](http://systep.cl/documents/reportes/042014_Systep_Reporte_Sector_Electrico.pdf)

Teillant, B., Vicente, M., Pietro, G., Papini, R., & Moretti, G. (2015). Techno-economic comparison between air turbines and dielectric elastomer generators as power take off for oscillating water column wave energy converters, (September).

Unión Europea. (2014). COM(2014) 8 final - La energía azul, 1–12.

World Energy Council. (2016). World Energy Resources: Marine Energy 2016, 79.  
[https://doi.org/http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/Complete\\_WER\\_2013\\_Survey.pdf](https://doi.org/http://www.worldenergy.org/wp-content/uploads/2013/09/Complete_WER_2013_Survey.pdf)

ANEXOS

**ANEXOS**

## ANEXOS

### A. DIAGRAMA DE FLUJO DEL ALGORITMO DE DISCRETIZACIÓN

Como se mencionó en el CAPÍTULO I, los datos serán obtenidos a través del Explorador de Energía Marina, de la Universidad de Chile. Este explorador realiza una extrapolación a partir de datos experimentales obtenidos desde el año 1979 al 2010, sintetiza estos datos en un promedio por hora. Esto significa trabajar con 277.798 datos con una distribución continua, por cada punto a analizar. Por lo que es necesario convertirlos en una distribución discreta, que permita un buen análisis.

En la FIGURA A.1 se presenta el diagrama de flujo del algoritmo realizado para la discretización de los datos entregados por el Explorador Marino.

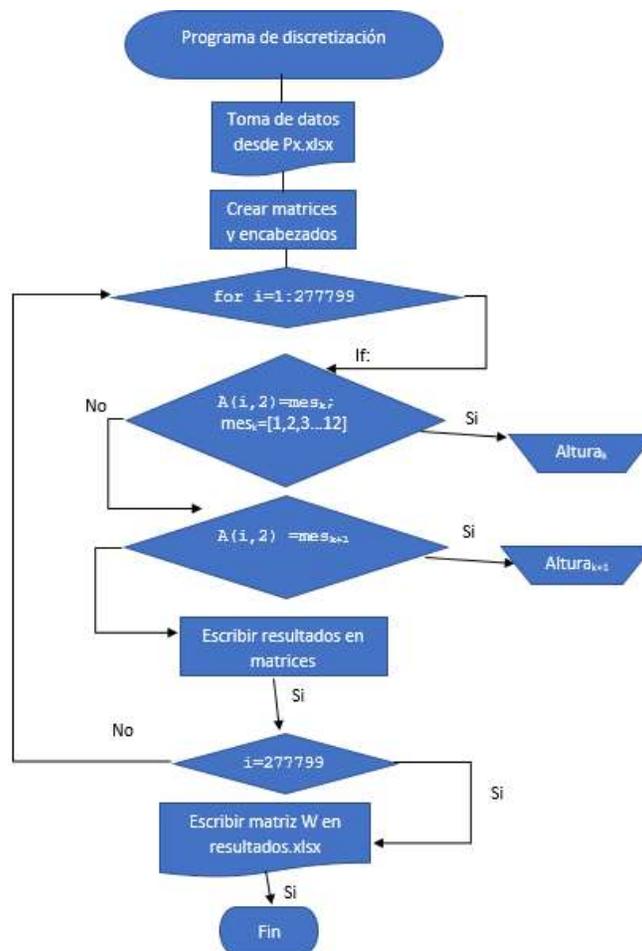


FIGURA A.1 Diagrama de flujo algoritmo de discretización (Elaboración propia)

## ANEXOS

Los datos vienen en formato CSV, ordenado por fecha y hora de la medición, los datos relevantes de este archivo son los de periodo y altura media. Estos datos son exportados a una planilla Excel (Px.xlsx) para poder trabajar con ellos. En la FIGURA A.1 se toman los datos de este archivo y se crean las matrices de resultados. Luego los datos ingresan a una función for según su posición  $i$ , desde 1 hasta 277.798. La segunda fila es la correspondiente al mes, se seleccionan según este criterio, el valor de  $k$  representa al mes y puede ir del 1 al 12, una vez categorizado este dato en función del mes se evalúa en función de la Altura y el periodo, sin perder la relación entre estos para que el valor de potencia no pierda sentido.

## B. PROFUNDIDADES

A continuación, se presentan los perfiles de elevación del fondo marino de los cuatro paralelos estudiados. Ordenados de Sur a Norte, distribuidos de costa a mar.

### B.1 Paralelo 1: 35.593

Para el primer paralelo estudiado se consideran tres coordenadas para *Onshore* en los meridianos: 72.645 - 72.647 - 72.648 estas se encuentran a menos de 1 km de distancia y como la resolución del explorador marino no distingue distancias menores que esta, dichas coordenadas se consideran la misma. En la FIGURA B.1 se muestra el perfil de elevación de los puntos *Onshore* del primer paralelo.



FIGURA B.1 Perfil de elevación Onshore Paralelo 1 (Google Earth)

A la derecha se muestran los dos puntos más profundos, pero la pendiente de la primera caída es tan alta que no se distinguen el primero del segundo. Enmarcado en un cuadro rojo se

## ANEXOS

representa este mismo perfil de elevación en la FIGURA B.2 para poder dimensionar la distancia al punto *Offshore*.



FIGURA B.2 Perfil de elevación Offshore Paralelo 1 (Google Earth)

En la FIGURA B.2 a la derecha se marca el punto *Offshore* que se encuentra a 51.2 km de distancia de la costa, con una profundidad de 960 m.

### B.2 Paralelo 2: 35.454

El punto *Onshore*: 72.499 del paralelo 2 se representa en la FIGURA B.3.



FIGURA B.3 Perfil de elevación Onshore paralelo 2 (Google Earth)

Este punto tiene una profundidad de 9 m y se encuentra a una distancia de 1.1 km de la costa. en la FIGURA B.4 se marcan los puntos *Nearshore*: 72.501 - 72.558 - 72.602 del paralelo 2.



FIGURA B.4 Perfil de elevación puntos Nearshore paralelo 2 (Google Earth)

## ANEXOS

En el centro de la FIGURA B.4 se aprecia un gran montículo de más de 5 km de largo y más de 50 metros de altura, parece interesante ver como la potencia de las olas reacciona a este accidente geográfico. Es por lo que se analiza el punto antes y después de este montículo. En la FIGURA B.5 se representa el perfil de elevación del punto Offshore: 72.610 del paralelo 2.



*FIGURA B.5 Perfil de elevación del punto Offshore del paralelo 2 (Google Earth)*

A la derecha de la FIGURA B.5 se enmarca en un cuadro rojo el espacio que corresponde al perfil de elevación representado en los puntos *Onshore* y *Nearshore* anteriormente, para dimensionar la distancia al punto *Offshore*. Este último se encuentra a 48.1 km de distancia de la costa y a una profundidad de 536 metros.

### **B.3 Paralelo 3: 35.287**

El punto Onshore: 72.680 del paralelo 3 se presenta en la FIGURA B.6, este tiene una profundidad de 6 metros.



*FIGURA B.6 Perfil de elevación del punto Onshore del Paralelo 3 (Google Earth)*

Esta no es una representación cercana del punto Onshore como se presentaron los puntos anteriores, debido a que alejado de la costa existe un punto cuya profundidad llega a ser menor a los 40 metros, como se muestra en la FIGURA B.7.

## ANEXOS



*FIGURA B.7 Perfil de elevación del punto Nearshore del Paralelo 3 (Google Earth)*

Sin embargo, este punto no se considera como *Nearshore* por encontrarse demasiado lejos de la costa, por lo que se consideran sólo los puntos 72.412 y 72.433.

El punto *Offshore*: 72.433 considerado para el paralelo 3 es representado en la FIGURA B.8.



*FIGURA B.8 Perfil de elevación del punto Offshore del Paralelo 3 (Google Earth)*

Se observa este punto en la esquina inferior izquierda de la imagen con una profundidad de 616 metros.

### **B.4 Paralelo 4: 35.183**

El último paralelo estudiado es el 4, su punto *Onshore*: 72.354, se representa en la FIGURA B.9, tiene una profundidad de 10 metros.



*FIGURA B.9 Perfil de elevación del punto Onshore del paralelo 4 (Google Earth)*

## ANEXOS

Los puntos Nearshore: 72.361 y 72.377, del paralelo 4 se representan en la FIGURA B.10.



*FIGURA B.10 Perfil de elevación del punto Nearshore del Paralelo 4 (Google Earth)*

Estos se encuentran a un kilómetro de distancia, demasiado cerca para la resolución de la imagen por esto se marca sólo uno. Este se encuentra a 3.5 km de distancia a la costa y tiene una profundidad de 39 metros.

Finalmente se presenta el punto Offshore: 72.7377 en la FIGURA B.11.



*FIGURA B.11 Perfil de elevación del punto Offshore del Paralelo 4 (Google Earth)*

Este punto se encuentra a 50 km de distancia de la costa y tiene una profundidad de 773 metros, como se puede ver en la parte inferior izquierda de la imagen.

## C. IMPACTO AMBIENTAL DE UN DISPOSITIVO UNDIMOTRIZ

En 2014 la Bióloga Marina Caroll García realizó una evaluación de impacto ambiental de la instalación y operación de una planta undimotriz en Chile, como se menciona en la sección 5.6. en la FIGURA C.1 se resume esta evaluación.

## ANEXOS

Impacto	Necton		Plancton		Bentos		Aves	
	Instalación	Operación	Instalación	Operación	Instalación	Operación	Instalación	Operación
1 Electromagnetismo		■		-3,55		-2,95		■
2 Ruido	-4,45	-4,75	■	■	-5,15	■	■	-2,95
3 Contaminación por derrame de hidrocarburos		-5,05		■		-4,45		-4,35
4 Remoción de sedimento	-4,45		-3,05		■			
5 Cambio en el oleaje						-3,6		
6 Limitación al desplazamiento y migración de los organismos marinos		-4,15						■
7 Calor provocado por el cable de transmisión		■		■		-3,95		
8 Producción de nuevos sustratos (creación de arrecife artificial) para el crecimiento y asentamiento de especies		■		■		■		■

■ Indica que es el impacto con mayor grado de significancia de cada grupo.

■ Indica que es el impacto con menor grado de significancia de cada grupo. ■ Impacto positivo de cada grupo.

FIGURA C.1 Resumen evaluación ambiental de un dispositivo Undimotriz (BUSTOS, 2014)

Se consideran criterios como el electromagnetismo, ruido, contaminación por derrame de hidrocarburos, remoción de sedimentos, cambio en el oleaje, limitación al desplazamiento y migración de los organismos marinos, calor provocado por el cable de transmisión y producción de nuevos sustratos para el crecimiento y asentamiento de especies. Este último criterio genera un impacto positivo a los organismos marinos.

Los tipos de organismos analizados son el necton, plancton, bentos y aves. El primero son el conjunto de organismos acuáticos que son capaces de desplazarse en forma autónoma, a diferencia del plancton que no tiene esta capacidad, los bentos por su parte son la comunidad de organismos que habitan el fondo marino.

En la parte inferior del cuadro se expresan con un criterio de colores los mayores y menores impactos de cada grupo y los impactos positivos.

Finalmente, en la FIGURA C.2 se representan los rangos de significancia según la clasificación de impactos.

## ANEXOS

<b>Significancia (valor absoluto)</b>	<b>Clasificación de impactos</b>
entre 1 y 2,04	No significativo
entre 2,05 y 4,04	Poco significativo
entre 4,05 y 6,04	Medianamente significativo
entre 6,05 y 8,04	Significativo
entre 8,05 y 10	Muy significativo

*FIGURA C.2 Clasificación del impacto según su significancia (BUSTOS, 2014)*

Las calificaciones se presentan en valor absoluto, en rangos de dos en dos, con impactos que van desde lo no significativo a lo muy significativo.

Se puede ver que un dispositivo undimotriz genera un impacto negativo principalmente durante la operación, sin embargo, también es cuando se genera un impacto positivo.