



**UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO DE TECNOLOGÍAS  
UNDIMOTRICES PARA LA GENERACIÓN ELÉCTRICA EN LA  
COSTA DE LA REGION DE VALPARAÍSO**

**MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA**

**JOSÉ ADRIÁN RODRÍGUEZ CASTILLO**

**PROFESOR GUÍA:  
PATRICIO MENDOZA ARAYA**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
ANDRÉS CABA RUTTE  
GUILLERMO JIMÉNEZ ESTÉVEZ**

**SANTIAGO DE CHILE  
2018**

RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL ELECTRICISTA  
POR: JOSÉ RODRÍGUEZ CASTILLO  
FECHA: JULIO 2018  
PROF. GUÍA: Sr. PATRICIO MENDOZA A.

## **ESTUDIO TÉCNICO-ECONÓMICO DE TECNOLOGÍAS UNDIMOTRICES PARA LA GENERACIÓN ELÉCTRICA EN LA COSTA DE LA REGION DE VALPARAÍSO**

El presente Trabajo de Título tiene como objetivo estimar el potencial energético de las olas disponible en las costas chilenas, para ello se desarrolla un estudio acerca del comportamiento teórico del oleaje tanto a través de la teoría de ondas lineal, como no lineal que es cómo se comporta el oleaje real, junto con esto se presentan las ecuaciones que permiten estimar la energía y potencia de las olas en función de sus parámetros físicos.

Se recopila información acerca de las principales tecnologías desarrolladas basadas en distintos principios de generación undimotriz, analizando las características constructivas, ventajas y desventajas de cada dispositivo, condiciones de operación y cual ofrecería un mejor comportamiento considerando las condiciones geográficas y de oleaje presentes en Chile.

A partir del estudio desarrollado por la empresa Baird & Associates S.A, se logra precisar los niveles de energía del oleaje existente en distintos puntos del país, además de la variabilidad tanto diaria como estacional de esta energía dependiendo de los parámetros del oleaje, concluyendo que el lugar que presenta las mejores condiciones para la operación de un dispositivo de extracción de energía de las olas es la región de Valparaíso, además con información proporcionada por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), se identificaron aquellos puntos que presentan la mayor profundidad y que se encuentran junto a la costa, ya que la disminución de la profundidad influye en la disipación de la energía de las olas lo que afecta directamente en el rendimiento de los dispositivos.

Una vez determinado la cantidad de energía posible de extraer, se requiere convertirla a energía eléctrica, para esto se analiza la capacidad de generación de cada dispositivo y las características de la red de distribución de manera que no existan limitantes técnicas para la inyección de energía a la red.

La evaluación económica de los distintos proyectos analizados arrojó que sólo en un caso es posible obtener un precio competitivo de energía que haga rentable el proyecto a 30 años, se trata del generador basado en el principio de Arquímedes compuesto por un generador lineal.

Finalmente, e independiente del principio de generación los dispositivos estudiados fueron diseñados para otras condiciones de oleaje principalmente las que predominan en Europa, por lo que para mejorar la producción de energía y con ello la rentabilidad de los proyectos se debe estudiar en detalle el diseño de cada prototipo de manera de optimizarlo a las condiciones de oleaje presentes en la costa chilena.

## DEDICATORIA

*A mi padre y mi madre*

## AGRADECIMIENTOS

*Quiero brindar mis más profundos agradecimientos a los profesores que me acompañaron en este proceso a Patricio Mendoza, Guillermo Jiménez y Andrés Caba, que con sus orientación, consejos y apoyo permitieron cerrar este período académico.*

*Agradecer a todos quienes me acompañaron en mi paso por la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile, un lugar donde no sólo recibí una sólida formación académica, sino que además me permitió compartir experiencias rodeado en un entorno pluralista y de respeto por las diversas ideas y pensamientos que consiguen además complementar mi formación no sólo profesional, sino que como persona.*

*Reconocer especialmente a mis amigos en mi paso por la Universidad a César, Diego, Ricardo, Rodrigo, Alejandro, Daniel, Francys, Eli, Natalia, Mili, Keka, Yoyi, Leo, Javier y a los que se fueron sumando en el camino Alexis, Edgardo, gracias por el apoyo y amistad.*

*Mi mayor reconocimiento a mi familia, a mis padres José y Adriana, mis hermanos Pamela y Jorge. A mis abuelas Guillermina y Anita (la Mami) y todo el resto de la familia siéntanse incluidos en estas palabras. Simplemente agradecerles el incondicional cariño y apoyo.*

*Y finalmente gracias a Dios.*

# Tabla de Contenido

---

Tabla de Contenido .....	iv
Índice de Figuras .....	vi
Índice de Tablas .....	viii
Índice de Gráficos .....	ix
1 Introducción.....	1
1.1 Panorama chileno de las Energías Renovables no Convencionales .....	1
1.2 Objetivos .....	2
1.3 Estructura y metodología.....	3
2 Energía Undimotriz .....	5
2.1 Definición .....	5
2.2 Origen .....	6
2.3 Clasificación de las olas .....	7
2.4 Ambientes de oleaje.....	8
2.5 Modelación del oleaje.....	9
2.6 Energía y Potencia de las Olas .....	12
2.7 Caracterización del Oleaje en la Costa Chilena.....	13
2.8 Resumen del capítulo.....	22
3 Centrales de Energía Undimotriz .....	23
3.1 Técnicas de extracción de energía undimotriz.....	23
3.2 Análisis de prototipos desarrollados .....	25
3.3 Resumen del capítulo.....	56

4	Marco regulatorio y comercialización de energía .....	57
4.1	Incentivo a las ERNC .....	57
4.2	Procedimiento de conexión de un PMGD .....	58
4.3	Ingresos por venta de energía y potencia instalada.....	58
5	Evaluación de tecnologías en la costa chilena.....	61
5.1	Ubicación de la central de energía de las olas.....	61
5.2	Características de la red de distribución.....	63
5.3	Producción de energía y potencia del parque undimotriz .....	65
5.4	Costos.....	71
5.5	Ingresos .....	73
5.6	Impacto de la conexión del PMGD en la red de distribución.....	74
6	Conclusiones y trabajo futuro.....	82
6.1	Comentarios.....	82
6.2	Conclusiones.....	82
6.3	Trabajo futuro.....	86
7	Bibliografía .....	87
8	Anexos .....	90
A.	Gráficos de potencia mensual del oleaje incidente .....	91
B.	Potencia mensual generada por parque undimotriz.....	103
C.	Flujo de caja de cada parque undimotriz .....	109

# Índice de Figuras

---

Figura 2.1.1: Potencial undimotriz a nivel mundial [kW/m]. [1], [2] .....	5
Figura 2.2.1: Niveles energéticos de los distintos tipos de olas. (Munk - Kinsman). [5].....	7
Figura 2.4.1: Distribución de tipos de oleaje en el mundo. [4] .....	9
Figura 2.5.1: Movimiento de las moléculas de agua en las olas. [8] .....	10
Figura 2.5.2: Estructura del oleaje real, Pierson et al (1958). [7].....	11
Figura 2.7.1: Incidencia del oleaje en la Bahía de Quintero. [Fuente: Google Earth].....	13
Figura 2.7.2: Batimetría junto al borde costero. Sector Playa Ancha, Valparaíso. [10].....	15
Figura 3.1.1: Clasificación de dispositivos ubicación relativa al borde costero. [2] .....	23
Figura 3.1.2: Clasificación de dispositivos según orientación al borde costero. [2].....	24
Figura 3.2.1: Principales principios de generación de energía undimotriz. [2] .....	25
Figura 3.2.2: Interior cámara sistema OWC. [14].....	26
Figura 3.2.3: Modelo Limpet a escala analizado. [15] .....	27
Figura 3.2.4: Pendiente fondo marino del tanque de pruebas. [15].....	28
Figura 3.2.5: Ubicación del colector respecto a la línea de borde costero. [15] .....	31
Figura 3.2.6: Turbina Wells. [19], [20] .....	33
Figura 3.2.7: Eficiencia turbina Wells. [19].....	34
Figura 3.2.8: Esquema de conexión generador OWC a red eléctrica. [21] .....	35
Figura 3.2.9: Principio de operación generador efecto Arquímedes. [2], [12], [13].....	37
Figura 3.2.10: Central Undimotriz Archimides. [1], [2] .....	37
Figura 3.2.11: Esquema de conexión generador AWS a red eléctrica. [23] .....	40
Figura 3.2.12: a) Conversión con generador lineal. b) Conversión con turbina y generador rotatorio.[24].....	43
Figura 3.2.13: Unidades conectadas y transmisión en corriente continua al borde costero. [24] .....	44
Figura 3.2.14: Unidades conectadas y el conjunto conectado al inversor sumergido en el mar. [24].....	45
Figura 3.2.15: Unidades conectadas y el conjunto conectado al inversor y transformador elevador de tensión sumergidos en el mar. [24].....	45

Figura 3.2.16: Unidades conectadas y el conjunto conectado al inversor, transformador elevador de tensión y rectificador sumergidos en el mar. [24] .....	45
Figura 3.2.17: Diagrama de componentes de la subestación marítima. [25] .....	46
Figura 3.2.18: Sistema de articulación Pelamis. [28] .....	48
Figura 3.2.19: Sistema de conversión Pelamis. [26].....	48
Figura 3.2.20: Diferencias en la oscilación de Pelamis según parámetros de oleaje.....	50
Figura 3.2.21: Parque undimotriz Pelamis conectado a la red de distribución. [12].....	51
Figura 3.2.22: Modelo 3D de la central Wave Dragon. [30].....	52
Figura 3.2.23: Corte transversal de la central Wave Dragon. [30].....	53
Figura 3.2.24: Niveles de trabajo en el receptor de la central Wave Dragon. [29] .....	53
Figura 3.2.25: Corte transversal de la turbina en la central Wave Dragon. [29].....	54
Figura 5.1.1: Batimetría del borde costero de interés. [31].....	62
Figura 5.2.1: Red de distribución en MT, sector Laguna Verde. [32] .....	64
Figura 5.6.1: Modelo Digsilent red de distribución en MT, sector Laguna Verde. [Elab. Propia] .....	75
Figura 5.6.2: Modelo Digsilent del punto de conexión del PMGD. [Elab. Propia].....	76
Figura 5.6.3: Dirección del flujo de potencia antes de la conexión del PMGD. [Elab. Propia] .....	77
Figura 5.6.4: Dirección del flujo de potencia después de la <i>conexión</i> del PMGD. [Elab. Propia] .....	77
Figura 5.6.5: Nivel de corto circuito en la barra antes de la conexión del PMGD. [Elab. Propia].....	78
Figura 5.6.6: Nivel de corto circuito en la barra después de la conexión del PMGD. [Elab. Propia] .....	79
Figura 5.6.7: Protecciones existentes en la red de Media Tensión en estudio. [32] .....	81

# Índice de Tablas

---

Tabla 2.7.1: Coeficientes de Transferencia de Potencia [9] .....	14
Tabla 2.7.2: Altura y período de las olas en Chile [11] .....	16
Tabla 2.7.3: Altura y período de las olas en Valparaíso. [11] .....	16
Tabla 2.7.4: Valores calculados para la potencia incidente por frente de ola. [Elab. Propia] .....	20
Tabla 3.2.1: Características de oleajes simulados [15] .....	28
Tabla 3.2.2: Matriz de potencia AWS. [22].....	38
Tabla 3.2.3: Matriz de potencia Power Buoy. ....	42
Tabla 3.2.4: Matriz de Potencia Pelamis. [12].....	49
Tabla 3.2.5: Matriz de potencia Wave Dragon.....	55
Tabla 5.2.1: Características conductor eléctrico en el punto de conexión. [32] .....	63
Tabla 5.2.2: Características eléctricas y mecánicas conductor eléctrico. [33] .....	63
Tabla 5.3.1: Energía producida en [kWh]. [Elab. Propia] .....	66
Tabla 5.3.2: Energía producida en [kWh]. [Elab. Propia] .....	66
Tabla 5.3.3: Energía producida en [kWh]. [Elab. Propia] .....	67
Tabla 5.3.4: Energía producida en [kWh]. [Elab. Propia] .....	67
Tabla 5.3.5: Energía producida en [kWh]. [Elab. Propia] .....	68
Tabla 5.3.6: Factor de planta de las unidades undimotrices analizadas. [Elab. Propia] .....	68
Tabla 5.3.7: Número de unidades y potencia instalada de cada parque undimotriz. [Elab. Propia.] .....	69
Tabla 5.4.1: Costos generadores undimotrices. [Elab. Propia].....	72
Tabla 5.4.2: Costos asociados a cada parque undimotriz. [Elab. Propia] .....	72
Tabla 5.5.1: Precio de la energía generada [Elab. Propia] .....	73
Tabla 5.6.1: Parámetros y variables de operación. [Elab. Propia].....	76
Tabla 5.6.2: Parámetros y variables de operación. [Elab. Propia].....	79

# Índice de Gráficos

---

Gráfico 2.7.1: Potencia por frente de Ola a 10, 25, 50 [m] y en aguas profundas (DW). [11] .....	17
Gráfico 2.7.2: Variabilidad mensual de la potencia en el norte, centro y sur del país [9] .....	17
Gráfico 2.7.3: Potencia mensual por frente de ola, Valparaíso. [Elab. Propia].....	18
Gráfico 2.7.4: Variabilidad de la potencia promedio de las olas durante un día. [Elab. Propia] .....	19
Gráfico 2.7.5: Distribución del oleaje según potencia incidente ( $P_i$ ) y periodo ( $T_e$ ). [Elab. Propia] .....	21
Gráfico 3.2.1: Resultados experimentales modelo Limpet. [15] .....	29
Gráfico 3.2.2: Resultados experimentales modelo Limpet, profundidad 5 m. [15] .....	29
Gráfico 3.2.3: Resultados experimentales modelo Limpet, profundidad 10 m [15] .....	30
Gráfico 3.2.4: Influencia de la profundidad en la captura del colector. [15].....	30
Gráfico 3.2.5: Rendimiento del colector en función de la ubicación respecto al borde costero. [15] .....	31
Gráfico 3.2.6: Factor de captura de la Central Limpet para distintos tipos de oleaje. [16] .....	32
Gráfico 3.2.7: Potencia de salida en función de la altura de ola sobre el AWS. [Elab. Propia].....	39
Gráfico 3.2.8: Curvas de operación Power Buoy. [Elab. Propia] .....	43
Gráfico 3.2.9: Variación de la potencia de salida según período del oleaje. [Elab. Propia] .....	49
Gráfico 3.2.10: Comparación de potencia de salida para oleajes de 2,5 y 5 metros. [Elab. Propia].....	55
Gráfico 4.3.1: Variación precio de la energía en el SIC, período 1987-2017 .....	59
Gráfico 5.3.1: Energía promedio diaria. [Elab. Propia] .....	70
Gráfico 5.3.2: Energía mensual por dispositivo. [Elab. Propia].....	70
Gráfico 5.3.3: Energía anual generada por los distintos parques undimotrices. [Elab. Propia] .....	71

# 1 Introducción

---

## 1.1 Panorama chileno de las Energías Renovables no Convencionales

La necesidad de satisfacer la creciente demanda energética ha guiado la investigación hacia nuevas formas de obtención de energía. Ante este escenario el desarrollo de fuentes de energía renovables no convencionales se presenta como alternativa a las fuentes energéticas tradicionales, muchas de estas altamente contaminantes y condicionadas a la oferta de combustibles fósiles que permitan su operación y en el caso de generación hidroeléctrica dependiente de factores climáticos que garanticen satisfacer la demanda. Por otro lado, la utilización de nuevas fuentes de energía permite diversificar la matriz energética.

De esta manera, la generación de energía a través de parques eólicos, celdas solares o la generación a través de los océanos, mediante centrales mareomotrices, oleaje, gradiente térmico, gradiente salino o a través de corrientes marinas van ganando terreno en el campo de la investigación. Aunque muchas de estas tecnologías llevan años de estudio e implementación las condiciones adversas a las que operan hacen que los costos de construcción y mantenimiento sean muy elevados, lo que dificulta su masificación. No obstante, existen diversos proyectos ejecutados o en fase de estudio que hacen de estas energías una alternativa real, limpia y confiable.

En Chile, actualmente existen incentivos y garantías por parte del Estado que apuntan a incentivar el desarrollo de generación de energía eléctrica a partir de fuentes renovables no convencionales, estos incentivos orientados fortalecer la seguridad energética diversificando la matriz energética a partir del desarrollo de proyectos de pequeña escala, los cuales se eximen del pago de peajes por concepto de transmisión para proyectos de hasta 9 [MW] y liberación parcial hasta los 20 [MW], de esta manera se logra dar viabilidad a este tipo de proyectos.

Considerando la extensión marítima de la costa en Chile y los problemas energéticos ocasionados por escasez de agua en los embalses de generación hidroeléctrica, la limitación de la importación de gas natural desde Argentina el año 2007 o la variabilidad del precio internacional

del petróleo, resulta atractivo e interesante investigar y trabajar un sistema de generación eléctrica a partir de una fuente energética inagotable, de escaso impacto ambiental como es la energía de las olas o energía undimotriz.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 General

Analizar técnicamente el desempeño de cinco tecnologías de generación undimotriz de acuerdo al clima de oleaje existente en la costa de la Región de Valparaíso y estudiar la viabilidad económica de cada uno de los proyectos.

### 1.2.2 Específicos

- Analizar el comportamiento del oleaje, su clasificación y el potencial energético presente.
- Cuantificar el recurso undimotriz presente en la costa chilena, específicamente en la costa de la Región de Valparaíso.
- Identificar alternativas de generación de energía eléctrica a partir de las olas o energía undimotriz.
- Estudiar el comportamiento de distintos prototipos basados en distintos principios de generación a partir de la energía de las olas.
- Definir las características de las zonas geográficas que maximicen el recurso capaz de extraer.
- Analizar la factibilidad económica de incorporar estas tecnologías a la matriz energética nacional.
- Evaluar la factibilidad de interconexión de la central generadora a la red eléctrica de distribución local.

## 1.3 Estructura y metodología

El presente trabajo contempla cinco capítulos principales orientados al desarrollo del trabajo, además de la revisión bibliográfica y anexos a modo de complementar la información y el estudio desarrollado.

En el Capítulo 2: “Energía Undimotriz” se recopila información referente al comportamiento del oleaje, fenómenos que afectan su comportamiento y los climas de oleaje existente de acuerdo con sus características. Se caracteriza además el oleaje presente en la costa de Chile en función de sus parámetros a partir de la información proporcionada por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) y de estudios realizados por la empresa Baird & Associates S.A., todo esto con el objeto de cuantificar el recurso undimotriz presente y determinar las características de la locación más óptima de una central de energía de las olas (CEO).

En el Capítulo 3: “Centrales de Energía Undimotriz”, se expone el desarrollo de centrales undimotrices, analizando distintos principios de generación a partir de las olas a través de experiencias desarrolladas. Posteriormente el capítulo se centra en el análisis de distintas tecnologías según el clima de oleaje sobre el cual están diseñados. Considerando además las etapas de conversión a través de sistemas rotatorios y de desplazamiento lineal para la producción de energía eléctrica.

En el Capítulo 4: “Marco Regulatorio y Comercialización de Energía” se hace mención a la normativa vigente en cuanto al incentivo y promoción de medios de generación no convencionales, además de los requisitos técnicos que se deben cumplir para asegurar la calidad del suministro eléctrico una vez conectada la central. Respecto a la comercialización de energía se define el precio de referencia para el cual el proyecto resulta rentable.

En el Capítulo 5: “Evaluación de Tecnologías en la Costa Chilena” se determina la ubicación del generador de energía undimotriz y, recogiendo las consideraciones y análisis del Capítulo 3 se determinan los niveles de potencia capaz de extraer de cada dispositivo. Se realiza una evaluación económica para determinar el precio de venta de energía que hace rentable cada proyecto. Se analiza además la operación como pequeño medio de generación distribuida y su impacto en la red de distribución local.

Finalmente, en el Capítulo 6: “Conclusiones”, se discuten los resultados obtenidos de acuerdo con los objetivos planteados y se compara la respuesta de los distintos generadores expuestos a las mismas condiciones de operación determinadas por el clima de oleaje incidente en la zona. Se fijan además una serie de interrogantes a ser analizadas en futuros trabajos.



La generación de energía eléctrica a través de la energía de las olas, está aún en pleno estudio y desarrollo. A la fecha ya son varias las centrales, denominadas GEO (Generador de Energía del Oleaje) que operan a modo de prototipo o en fase pre-comercial y otros tantos los proyectos en estudio o ejecución, si bien es una tecnología que aún no alcanza su plena madurez, cada vez los diseños logran un mayor grado de eficiencia, lo que permite la masificación de este medio de generación y disminuir los costos por potencia instalada.

## 2.2 Origen

La formación de oleaje y con ello la generación de energía undimotriz, se debe primeramente a la acción del sol sobre la superficie terrestre que, al provocar un desigual calentamiento, crea zonas de altas y bajas presiones en la atmósfera provocando el movimiento de grandes masas de aire que soplan sobre la superficie marina. Este movimiento es ondulatorio, con oscilaciones periódicas de la superficie del mar, formando en su superficie crestas y depresiones que se desplazan horizontalmente [3], [4].

El origen de las olas se debe a distintas causas, que se ilustran en la Figura 2.2.1, entre ellas, la acción gravitatoria generando olas de período largo que va de 5 minutos hasta 24 horas; la acción del viento que forma las olas de gravedad cuyo período fluctúa entre 1 y 30 segundos, estas olas son por lo demás las que concentran la mayor cantidad de energía. Por la acción del viento se generan también las olas de capilaridad cuyo período es inferior a 0,1 segundo, pero permite que la superficie de contacto entre el viento y el mar se incremente logrando así un crecimiento de la ola y facilitando además que el viento pueda ejercer mayor presión sobre ella con el consiguiente incremento en su altura [5], [6].

Para el estudio de las olas, éstas se clasifican en: olas de agua profunda, que no están influenciadas por el fondo marino, se mueven independientemente de él; y olas costeras en que, por disminución de la profundidad del agua, su forma y movimiento están afectados por el fondo [5]. El desarrollo de las olas se atribuye a tres factores principales [3]:

- La velocidad media del viento.
- La duración del tiempo en que actúa.
- La distancia sobre la que ha soplado (fetch).

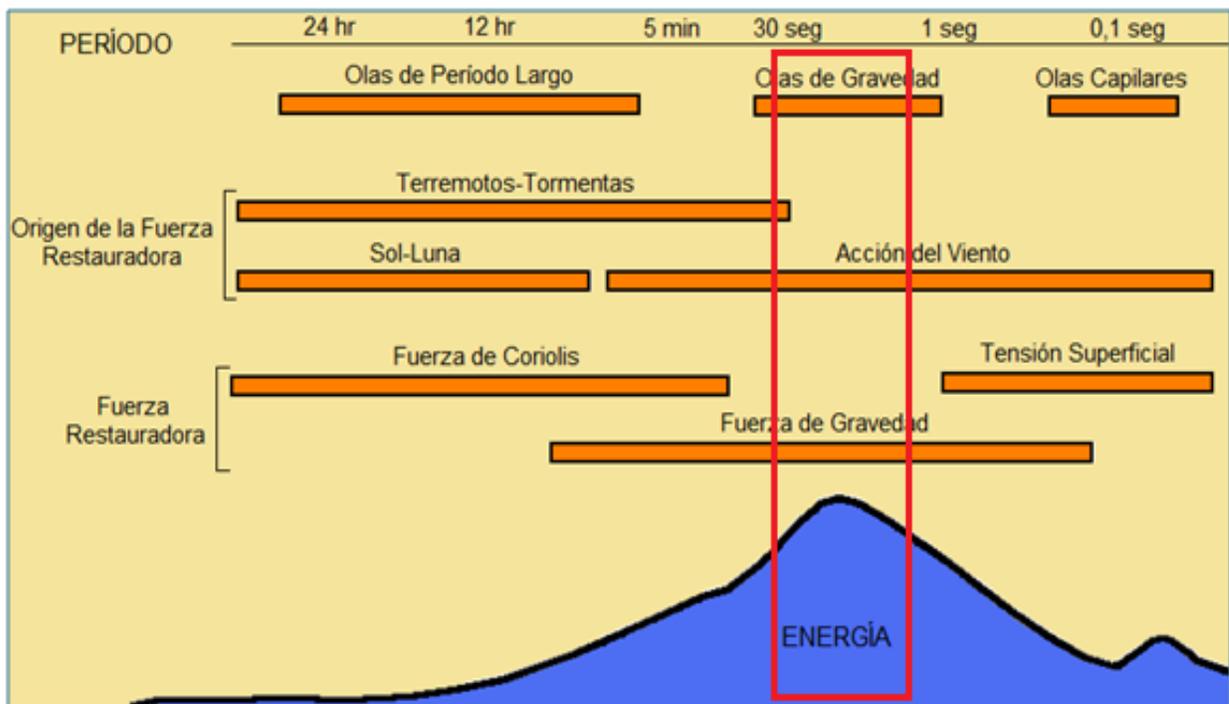


Figura 2.2.1: Niveles energéticos de los distintos tipos de olas. (Munk - Kinsman). [5]

## 2.3 Clasificación de las olas

Desde el punto de vista del lugar de generación el oleaje se puede clasificar en:

### 2.3.1 Oleaje Swell

Se genera a cientos de kilómetros de la costa, manteniéndose debido a la gravedad, la que actúa como fuerza restauradora, caracterizándose por tener una dirección predominante y es posible distinguir sus crestas y valles alineados [7].

### 2.3.2 Oleaje Sea

También llamado oleaje local ya que se genera en la misma zona costera, a diferencia del anterior, este se caracteriza por su forma caótica y por tanto no cuenta con período ni altura definidos [7].

## 2.4 Ambientes de oleaje

La generación del oleaje depende de las características climatológicas de cada zona, distinguiendo de esta manera características particulares asociadas a cada una de ellas. Las principales zonas de generación son aquellas donde soplan vientos desde el Oeste en las zonas templadas de los dos hemisferios, las tormentas permiten la generación de oleaje a partir de los 40° de latitud, estas olas se desplazan desde el Noroeste y Suroeste [4]. De acuerdo con el clima es posible distinguir distintos ambientes de oleaje y que se visualizan en la Figura 2.4.1.

### 2.4.1 Ambiente de ola de tormenta

Está presente en altas latitudes, se generan olas altas y de gran pendiente producto de los fuertes vientos que azotan esa zona, la dirección de este oleaje es predominantemente Oeste. [4]

### 2.4.2 Ambiente de costa Oeste

Generan olas largas y bajas provenientes de los cinturones de tormenta, que pierden energía al alejarse de la zona de formación, pero es más homogéneo salvo condiciones locales de tormenta, por ejemplo. Este oleaje se da a lo largo de la costa oeste desde California a Chile y en la costa oeste de África. [4]

### 2.4.3 Ambiente de costa Este

Presenta bajos niveles de energía debido a que la dirección predominante en las zonas de generación es oeste, en costas tropicales es posible que presenten una mayor energía producto de ciclones [4].

### 2.4.4 Ambientes protegidos

Son los que se encuentran fuera de los cinturones de tormenta o donde el oleaje proveniente del océano no penetra [4].

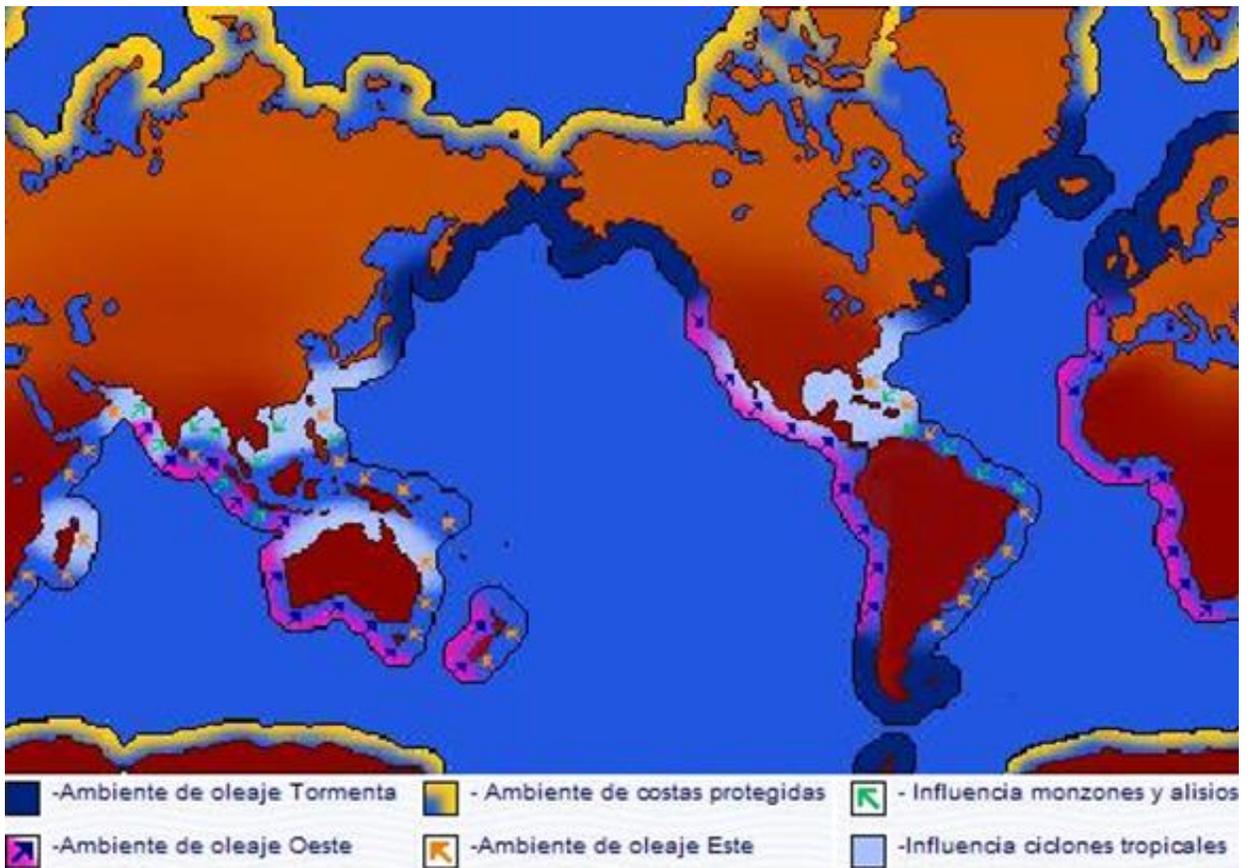


Figura 2.4.1: Distribución de tipos de oleaje en el mundo. [4]

La Figura 2.4.1, muestra la distribución de los ambientes de oleaje, se distingue el carácter bimodal del oleaje en la costa chilena, proveniente tanto desde noroeste como del suroeste en mayor grado, lo que garantiza un alto contenido energético tanto en invierno como en verano. Además, la transferencia de oleaje no es obstaculizada por barreras físicas desde los puntos de generación hasta la costa.

## 2.5 Modelación del oleaje

De acuerdo con las características que presenten las olas, es posible modelarlas a través de ecuaciones que describen su comportamiento y pueden cuantificar la energía y potencia presentes. Para ello se debe precisar la naturaleza de las olas y si estas se propagan en aguas profundas o someras.

## 2.5.1 Ola teórica

Corresponde a aquellas olas que, por desarrollarse en aguas profundas, presentan un movimiento más o menos regular sobre la superficie del océano, caracterizado por olas de baja altura en comparación con el largo de la onda, Corresponde a oleaje tipo Swell ya que se propaga por lo general muy lejos de donde se origina. La Figura 2.5.1 muestra la formación del oleaje en aguas profundas donde la regularidad de las olas está dada porque no están influenciadas por el fondo marino. La ola en agua profunda corresponde a una onda de superficie. Al llegar a la costa se transforma en ola costera, ola de masa [4].

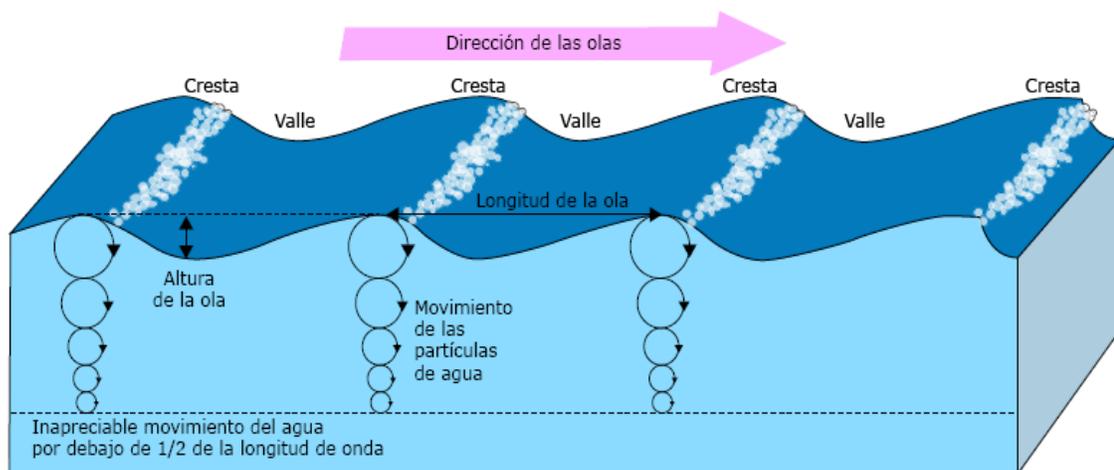


Figura 2.5.1: Movimiento de las moléculas de agua en las olas. [8]

Esto supone que [3], [6]:

- Las partículas de la superficie del mar describen círculos cuyo radio depende de la profundidad.
- El diámetro de las trayectorias disminuye con la profundidad y es prácticamente nulo en profundidad.
- El perfil del oleaje corresponde a un trocoide, que es la curva descrita por un punto de un disco que rueda sobre una recta.

Además de la teoría lineal, es posible determinar el comportamiento del oleaje a través de la teoría no lineal, pero para efectos de este estudio es posible modelar el oleaje real a través de la teoría lineal.

## 2.5.2 Ola real

Las olas reales son la superposición de varios trenes de ondas que se interfieren provocando la anulación o el reforzamiento de la onda, estos trenes de onda pueden ser considerados como ondas sinusoidales puras [4], [6].

La Figura 2.5.2 muestra la formación del oleaje real a partir de la suma de distintos perfiles o trenes de olas.

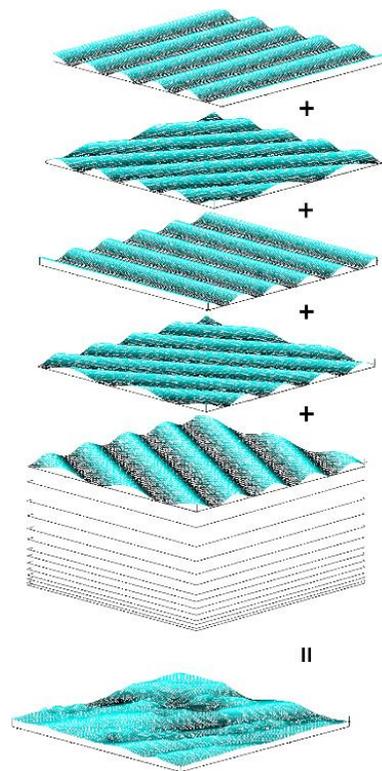


Figura 2.5.2: Estructura del oleaje real, Pierson et al (1958). [7]

A través de un análisis espectral puede ser reconstruida la superficie del océano como la suma de ondas de amplitud variable. Las áreas de generación poseen espectros de olas muy variadas, de diferente longitud de onda. Como la velocidad aumenta con la longitud de onda, las olas que salen de esta zona de generación no progresan a la misma velocidad. A medida que el oleaje sale de esta área se va clasificando, simplificando, tomando el aspecto de ondulaciones paralelas y disminuyendo la pendiente. Conocer el espectro de energía del oleaje es muy importante en el diseño y construcción de estructuras marítimas como rompeolas, plataformas petroleras, dispositivos de extracción de energía ya que permite dimensionar la obra en función de la energía que traerá la ola. [4], [5]

## 2.6 Energía y Potencia de las Olas

### 2.6.1 Ola teórica

Para una ola teórica, la energía presente en la onda está dada por [5]:

$$E = \frac{\rho g^2 T^2 b H^2}{32\pi} = 979,2 b T^2 H^2 [W \cdot s]$$

Donde:

$H$ : Altura de la ola [ $m$ ], distancia entre el valle y la cresta de la ola.

$\rho$ : Densidad del agua de mar, 1027 [ $kg/m^3$ ]

$g$ : Aceleración de gravedad, 9,8 [ $m/s^2$ ]

$T$ : Período de la ola, [ $s$ ]

Y la potencia por unidad de longitud es:

$$N_L = 0,955 H^2 T [kW / m]$$

### 2.6.2 Ola real

Para el oleaje real la potencia por frente de ola está dada por [5]:

$$N_L = 0,423 \cdot H_S^2 T_P \left[ \frac{kW}{m} \right]$$

Donde:

$H_S$ : Altura significativa de la ola [ $m$ ], equivalente a la altura promedio del tercio de olas más altas de un conjunto de olas.

$T_P$ : Período de la ola, [ $s$ ], corresponde al promedio aritmético de los períodos del oleaje.

La expresión para determinar la potencia del oleaje real, es la utilizada en este trabajo ya que se conocen los valores de altura significativa y período medio del oleaje para una locación en particular y por un período de tiempo de cinco años.

## 2.7 Caracterización del Oleaje en la Costa Chilena

### 2.7.1 Características del borde costero

La extensa costa chilena, aproximadamente 4.300 km, presenta variadas condiciones geográficas, zonas de playa donde la profundidad decrece gradualmente desde el océano hasta el continente, donde el oleaje evoluciona disipando su energía a medida que se aproxima a la costa y zonas de acantilados, caracterizadas por una considerable profundidad del mar junto al borde costero y donde es común observar las olas romper contra las rocas disipando gran energía, la Figura 2.7.1 muestra una locación típica del litoral central donde es posible visualizar la orientación costera, es decir, el ángulo que forma la línea costera con la dirección del oleaje, importante ya que la máxima transferencia de energía se produce cuando la ola incide de frente contra el obstáculo. Por otro lado, fenómenos de difracción se encuentran con frecuencia a lo largo de la geografía costera, que implica una disminución de la altura de la ola y consecuentemente una disminución de su energía. Esta imagen satelital obtenida a través de Google Earth correspondiente a la localidad de Quintero (Región de Valparaíso).



Figura 2.7.1: Incidencia del oleaje en la Bahía de Quintero. [Fuente: Google Earth]

De acuerdo a las Cartas Náuticas proporcionadas por el SHOA, es posible encontrar locaciones junto a la costa con profundidades por sobre los 10 metros, además de acuerdo a los Coeficientes de Transferencia de Potencia (CTP) determinados por Hugo Acuña [9], que entregan la relación entre la potencia entre aguas profundas y aguas someras, permite definir los sitios donde se producirá una menor reducción de la potencia conforme la ola se aproxima a la costa, la Tabla 2.7.1 muestra estos coeficientes para distintos sitios de la costa chilena.

De la Tabla 2.7.1 destaca la zona de Valparaíso, donde la potencia decae apenas un 1% respecto al valor que obtenido en aguas profundas, esto se debe a características particulares de batimetría del lugar que no afectan los parámetros de las olas, la zona donde se encuentra la boya de medición no está afectada a fenómenos como el de difracción del oleaje.

Tabla 2.7.1: Coeficientes de Transferencia de Potencia [9]

Sitio	Profundidad			
	Aguas Prof.	50 m	25 m	10 m
Arica	1,0	0,76	0,63	0,53
Iquique	1,0	0,82	0,63	0,55
Antofagasta	1,0	0,91	0,91	0,67
Huasco	1,0	0,72	0,66	0,58
Coquimbo	1,0	0,92	0,97	0,86
<b>Valparaíso</b>	<b>1,0</b>	<b>0,92</b>	<b>0,97</b>	<b>0,99</b>
Constitución	1,0	0,68	0,71	0,44
Puerto Saavedra	1,0	0,90	0,86	0,77
Ancud	1,0	0,90	0,93	0,83
Punta Arenas	1,0	0,89	0,91	0,82
<b>Promedio</b>	<b>1,0</b>	<b>0,84</b>	<b>0,82</b>	<b>0,70</b>
<b>Desv. Estándar</b>	<b>1,0</b>	<b>0,09</b>	<b>0,14</b>	<b>0,18</b>

En Chile, las profundidades marítimas cercanas al borde costero varían dependiendo de las características geográficas, así en zonas de playas se observa profundidades de 2 a 6 metros en que la pendiente hacia el mar crece lentamente hasta llegar a aguas profundas, por otro lado, se encuentran zonas junto al borde con profundidades de entre 15 y sobre 30 metros [10].

En la Figura 2.7.2 que muestra el sector de Playa Ancha en el litoral de Valparaíso, cuya batimetría junto al borde costero presenta profundidades por sobre los 30 metros, propicias para el desarrollo de sistemas de generación eléctrica basados en la energía de las olas.

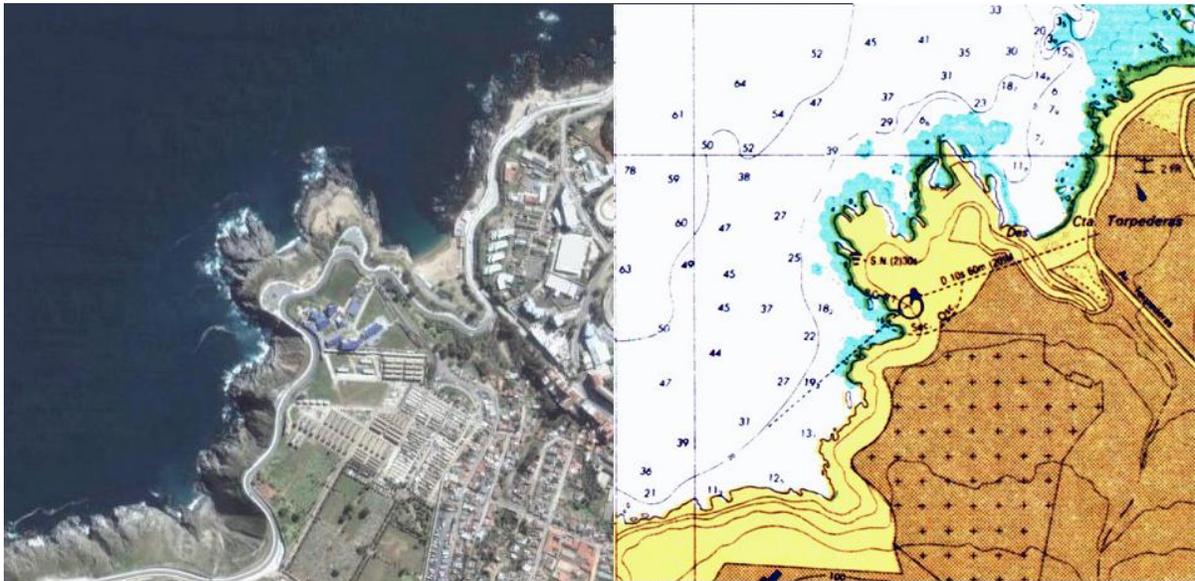


Figura 2.7.2: Batimetría junto al borde costero. Sector Playa Ancha, Valparaíso. [10]

## 2.7.2 Características de las olas

Por su extensión geográfica, Chile presenta características excepcionales para la extracción de la energía proveniente de las olas, entre ellas se cuenta el ambiente de formación que corresponde a olas de costa oeste, que en el caso chileno, no está afecto a ciclones tropicales por lo que se observa un oleaje más o menos homogéneo, cuya variabilidad se da por las diferencias climáticas presentes en las zonas Norte, Centro y Sur del país, distinguiendo en estas tres zonas con características particulares, por lo que a priori no se debe generalizar respecto a la eficiencia de una tecnología aplicada en el norte, centro o sur del país.

Para determinar el comportamiento de las olas es necesario basarse en información histórica y estudios que muestren parámetros característicos de oleaje en costas chilenas, esta información fue extraída del estudio Olas Chile [11], y que contempla estadísticas y mediciones de oleaje correspondientes a 20 años, lo que entrega información confiable y certera sobre los parámetros presentes en el oleaje, además permite predecir los niveles de energía presentes y su variabilidad diaria, estacional y anual.

La Tabla 2.7.2 muestra la altura significativa de la ola y su período promedio a una profundidad de 25 [m], al realizar una comparación de ambos parámetros en las estaciones de invierno y verano que donde se esperarían las mayores fluctuaciones, se observa que se mantienen prácticamente invariantes tanto en el norte, centro y sur del país.

Tabla 2.7.2: Altura y período de las olas en Chile [11]

Zona	H <sub>s</sub> [m]		T <sub>p</sub> [s]	
	Verano	Invierno	Verano	Invierno
Norte	1,30	1,50	12,6	13,2
Centro	2,33	2,42	13,2	12,9
Sur	3,64	3,80	11,5	12,1

Para la localidad de Valparaíso en particular el sector de Laguna Verde, a una profundidad de 10 [m], se determinó a partir de información histórica de 5 años proporcionada por la empresa Bair & Associates S.A, los parámetros característicos de oleaje. La variabilidad entre la altura significativa y el período de la ola se muestra en la Tabla 2.7.3.

Tabla 2.7.3: Altura y período de las olas en Valparaíso. [11]

Zona	H <sub>s</sub> [m]		T <sub>p</sub> [s]	
	Verano	Invierno	Verano	Invierno
Valparaíso	2,70	2,82	13,1	13,4

La Tabla 2.7.3 muestra valores promedio de los parámetros de oleaje, para un análisis más acucioso se debe considerar la variabilidad diaria y mensual de estos parámetros que se traducen en las variaciones que experimentan finalmente los niveles de energía.

### 2.7.3 Potencia de las Olas

Como se ha mencionado, la potencia de la ola tiende a reducirse conforme se aproxima a la costa debido al efecto de asomeramiento del oleaje, esto se observa claramente en el Gráfico 2.7.1 que muestra la variación de la potencia por frente de ola a tres profundidades distintas y mar adentro, además muestra la variación a medida que aumenta la latitud desde el norte hasta el sur del país.

Se observa una variación parabólica a lo largo de la costa, aumentando la energía a medida que se avanza hacia el Sur del país, esto debido a que la energía depende del cuadrado de la altura de la ola y que el período del oleaje se mantiene prácticamente invariante [11]. Por otro lado, hacia el sur las olas están más cercanas a su zona de generación por lo que contienen un mayor potencial energético.

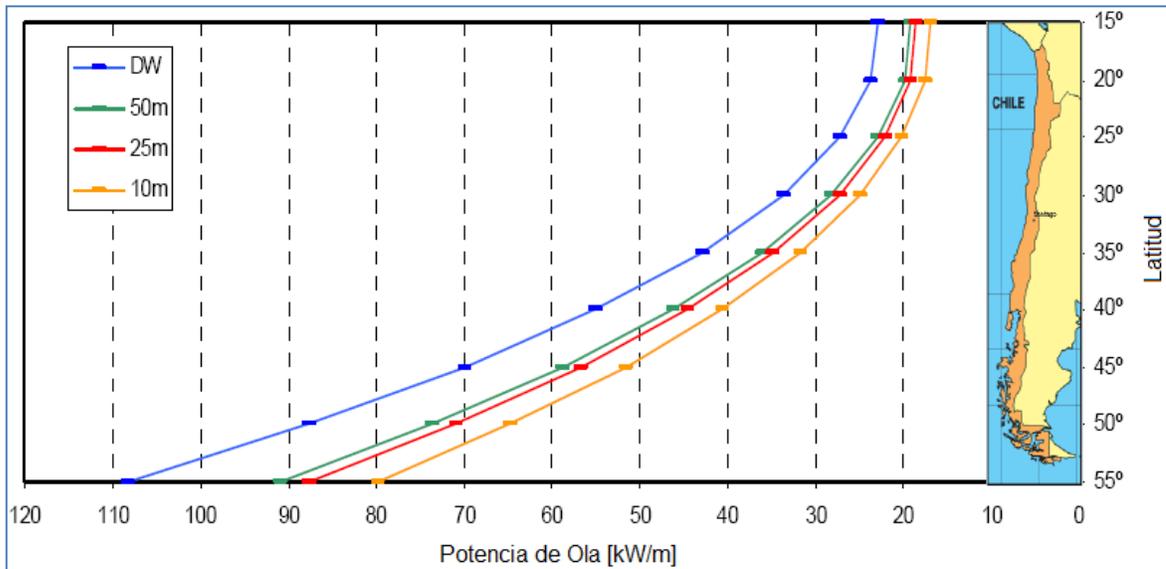


Gráfico 2.7.1: Potencia por frente de Ola a 10, 25, 50 [m] y en aguas profundas (DW). [11]

También es posible notar que la potencia por frente de ola disminuye conforme esta se acerca a la costa debido a la variación en la profundidad marina, reducción que no es tan significativa entre los 50 y 25 metros, pero que se incrementa entre los 25 y 10 metros de profundidad [9]. Sin embargo, se debe encontrar el óptimo entre los costos de generación alejados de la costa (alcanzando mayores profundidades) versus la generación en la costa, donde la disminución de la potencia extraíble se compensa con los menores costos de transmisión de la energía.

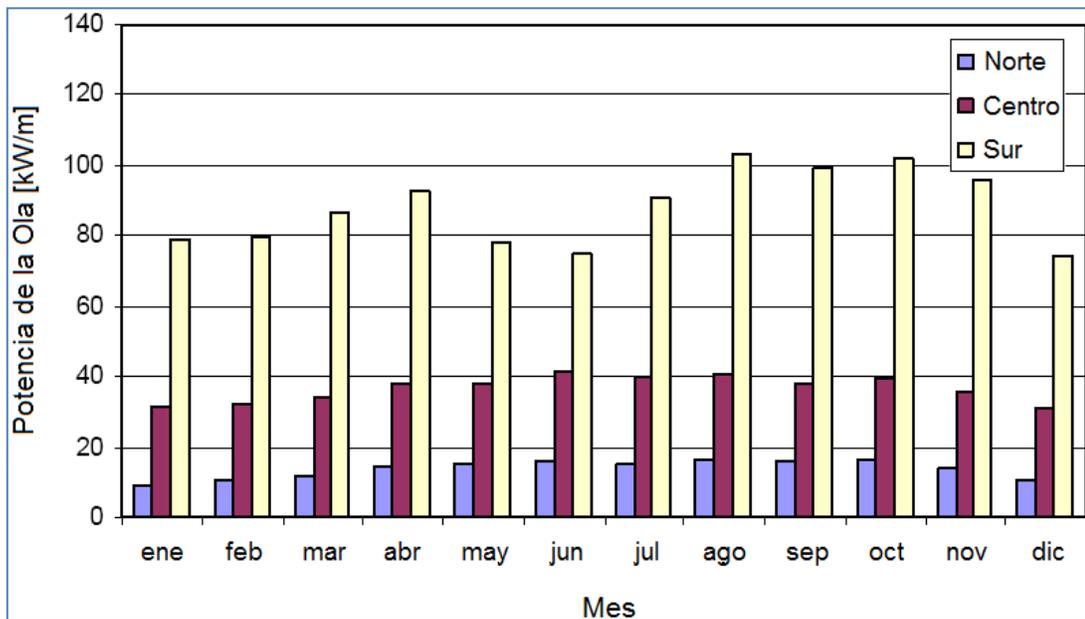


Gráfico 2.7.2: Variabilidad mensual de la potencia en el norte, centro y sur del país [9]

En el Gráfico 2.7.2 se muestra la energía promedio para las distintas zonas del país, existen claras diferencias entre meses sucesivos sobre todo en la zona sur, atribuible al clima presente en esa zona influenciado por oleaje de tormenta, en el norte y centro en tanto se presenta un oleaje típico de costa oeste reduciendo la variabilidad mensual de la energía presente.

La menor variabilidad se presenta en el norte, con una variación de 7 [kW/m] (entre el mes con mayor potencial y el de menor potencial energético), pero con una potencia presente notoriamente menor que en las otras zonas, en el sur en tanto esta variación asciende a los 33 [kW/m], en el Centro en tanto se observan diferencias de 10 [kW/m], obteniendo por lo demás en esta zona, potencias que no descienden de los 30 [kW] por frente de ola. Estos niveles de potencia se encuentran a 25 metros de profundidad, pero muestran una tendencia respecto a las fluctuaciones a 10 y 50 metros y en aguas más profundas [9].

#### 2.7.4 Potencia del Oleaje en la Costa de Valparaíso

Para efectos de este trabajo se centrará el estudio en las costas de la provincia de Valparaíso ya que de acuerdo a lo indicado en la Tabla 2.7.3 y Gráfico 2.7.3, muestra niveles de potencia elevados y con poca variabilidad temporal, que permiten predecir un adecuado rendimiento de una Central de Energía Undimotriz.

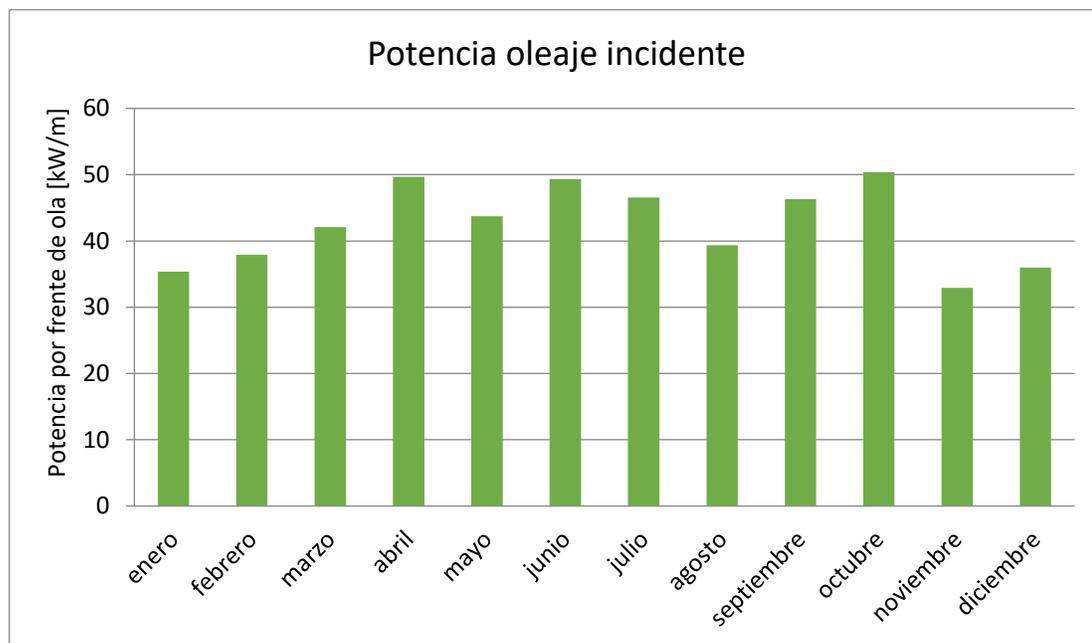


Gráfico 2.7.3: Potencia mensual por frente de ola, Valparaíso. [Elab. Propia]

Si se considera además lo indicado en la Tabla 2.7.1, para el sector de Laguna Verde es posible encontrar un comportamiento del oleaje similar al que presentan en aguas profundas a escasos metros de la costa lo que permite reducir los costos de infraestructura y mantenimiento de la central.

Respecto a la variación horaria de potencia, el Gráfico 2.7.4, muestra los niveles de potencia a intervalos de 3 horas en Valparaíso a una profundidad de 10 metros.

Sin embargo, para determinar la locación óptima de una central de energía de las olas se requiere conocer el comportamiento lo más preciso posible de las olas y datos proporcionados en los gráficos antes mostrados que entregan valores promedio de potencia es sólo un primer criterio para definir el lugar de interés.

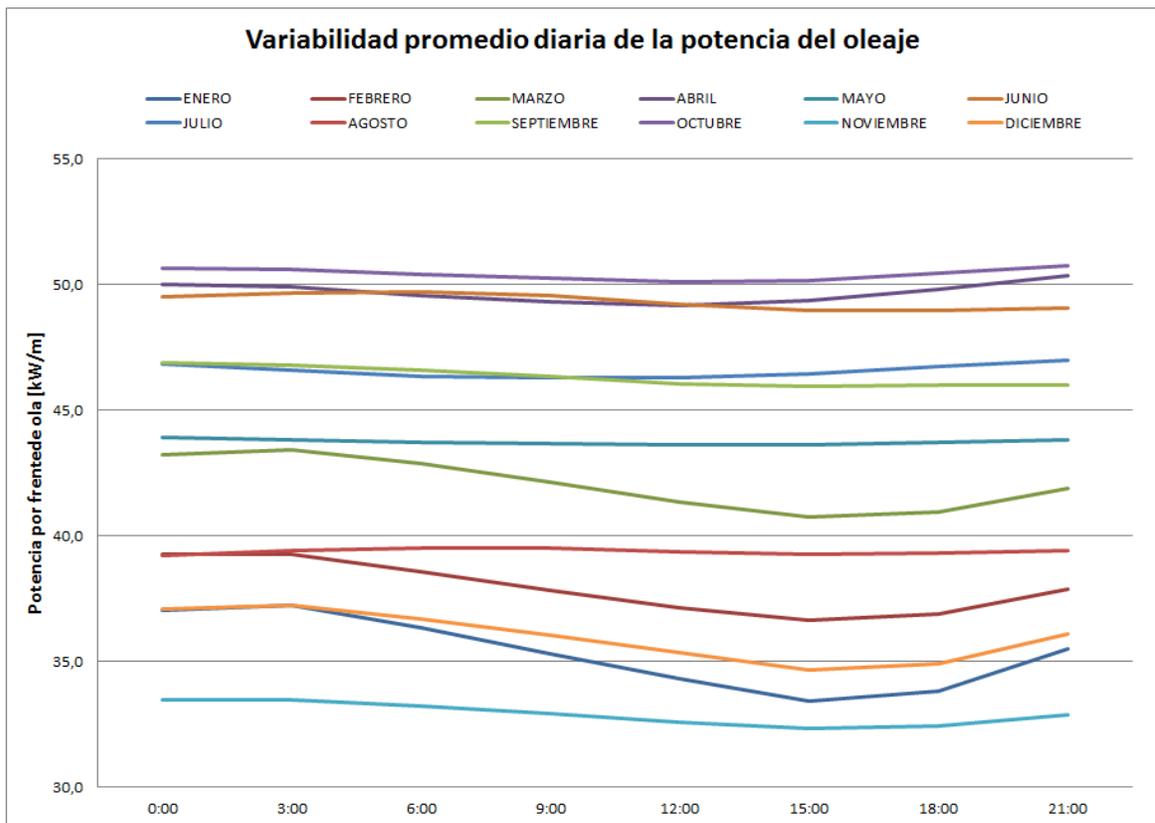


Gráfico 2.7.4: Variabilidad de la potencia promedio de las olas durante un día. [Elab. Propia]

El recurso energético disponible en la zona estudiada de acuerdo a cálculos realizados por la empresa Baird y que fueron corroborados en este trabajo de acuerdo a la expresión expuesta en el punto 2.6.2 del presente Capítulo se muestran en la Tabla 2.7.4.

Para la elaboración de la Tabla 2.7.4 se consideró un registro histórico de cinco años (2000-04), obteniéndose una muestra confiable para cada día del año. El promedio de estos cinco años permite además obtener en detalle la potencia diaria a intervalos de tres horas cuyos mínimos y máximos diarios, y el promedio mensual de potencia incidente.

Tabla 2.7.4: Valores calculados para la potencia incidente por frente de ola. [Elab. Propia]

POTENCIA POR FRENTE DE OLA [kW/m]									
	HORA	0:00	3:00	6:00	9:00	12:00	15:00	18:00	21:00
ENERO	mínimo	21,6	21,3	20,0	19,7	19,2	18,9	19,4	20,5
	máximo	50,1	52,4	51,5	49,7	47,4	45,2	45,2	47,1
	promedio	37,0	37,2	36,3	35,3	34,3	33,4	33,8	35,5
FEBRERO	mínimo	23,3	22,66	22,16	21,92	21,9	22,2	23,2	23,9
	máximo	63,3	62,4	59,8	56,8	55,0	57,3	59,8	61,9
	promedio	39,3	39,3	38,6	37,8	37,1	36,7	36,9	37,9
MARZO	mínimo	21,9	21,2	20,4	19,8	19,5	20,3	22,1	22,1
	máximo	64,5	64,0	61,6	59,7	59,0	58,8	59,1	61,6
	promedio	43,2	43,4	42,9	42,1	41,3	40,7	41,0	41,9
ABRIL	mínimo	28,4	28,6	28,1	27,3	26,4	25,9	26,4	27,5
	máximo	85,2	80,6	82,5	87,0	91,9	95,0	94,5	90,7
	promedio	50,0	49,9	49,6	49,3	49,2	49,4	49,8	50,4
MAYO	mínimo	24,8	23,8	22,8	22,2	22,2	22,9	23,9	25,4
	máximo	66,7	64,6	63,6	63,3	68,1	69,8	69,1	67,8
	promedio	43,9	43,8	43,7	43,7	43,6	43,6	43,7	43,8
JUNIO	mínimo	26,6	26,1	25,1	24,0	22,9	22,6	23,3	24,8
	máximo	70,6	75,7	76,5	74,2	73,7	73,2	71,9	70,1
	promedio	49,5	49,7	49,7	49,5	49,2	49,0	49,0	49,1
JULIO	mínimo	22,1	21,2	21,0	21,3	21,8	23,0	24,6	23,7
	máximo	80,1	77,9	75,7	74,4	73,7	73,0	78,1	80,8
	promedio	46,8	46,6	46,4	46,3	46,3	46,4	46,7	47,0
AGOSTO	mínimo	16,9	15,5	14,6	14,2	14,6	15,7	17,3	18,6
	máximo	61,8	63,3	63,2	61,9	60,9	61,5	61,3	60,2
	promedio	39,2	39,4	39,5	39,5	39,4	39,3	39,3	39,4
SEPTIEMBRE	mínimo	25,6	24,7	24,0	23,9	24,2	24,9	25,6	26,2
	máximo	82,6	82,4	84,4	83,9	81,6	78,4	75,4	79,6
	promedio	46,9	46,8	46,6	46,3	46,1	45,9	46,0	46,0
OCTUBRE	mínimo	31,0	30,9	31,0	31,3	31,7	31,9	32,0	32,2
	máximo	75,8	82,0	85,4	85,5	82,8	78,7	77,9	76,4
	promedio	50,6	50,6	50,4	50,2	50,1	50,1	50,4	50,8
NOVIEMBRE	mínimo	24,0	24,0	23,8	23,8	23,2	22,9	23,2	23,4
	máximo	48,8	50,0	49,8	48,8	47,2	45,4	45,0	46,2
	promedio	33,5	33,5	33,2	32,9	32,6	32,3	32,5	32,9
DICIEMBRE	mínimo	23,6	23,4	22,7	21,8	21,1	20,7	21,5	22,6
	máximo	56,5	55,0	53,4	55,0	56,2	56,1	55,7	56,3
	promedio	37,1	37,2	36,7	36,1	35,3	34,7	34,9	36,1

Analizando cada uno de los valores calculados, se tiene que los valores mínimos de potencia incidente se observan en agosto alcanzando 15 [kW/m], el resto de los meses los valores mínimos de potencia por frente de ola están por sobre los 20 [kW/m], valor que permite la operación de distintas tecnologías de conversión de energía undimotriz.

Los valores máximos observados se elevan por sobre los 75 [kW/m] en los meses de abril, julio, septiembre, octubre, situación que condiciona el uso de ciertas tecnologías de manera de obtener un máximo aprovechamiento del recurso incidente, tal como se analiza en el Capítulo 3, referente al rango de utilización de las distintas tecnologías desarrolladas para el aprovechamiento de la energía de las olas.

Respecto a los valores promedio observados, estos permiten definir parámetros nominales de la tecnología a instalar, permite además hacer estimaciones del recurso disponible tanto a nivel diario, estacional o anual.

En el Gráfico 2.7.5, se muestra el porcentaje de incidencia del oleaje en el que se agrega además como variable el período de la ola obtenido de la misma base de datos con la que se calculó la potencia, el objetivo de esta clasificación es definir los parámetros característicos de oleaje con mayor incidencia y así establecer los criterios de diseño o selección del colector que ofrezca un mayor rendimiento.

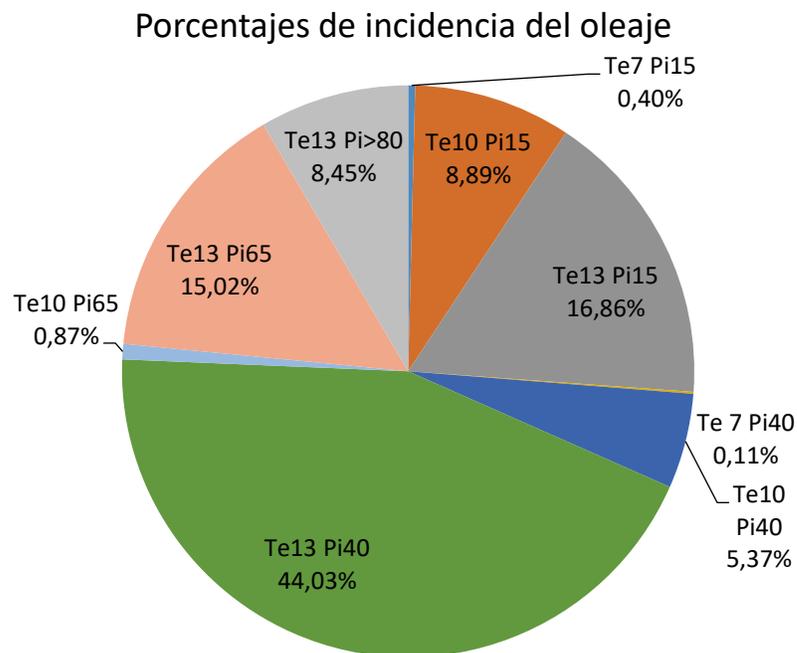


Gráfico 2.7.5: Distribución del oleaje según potencia incidente (Pi) y periodo (Te). [Elab. Propia]

El período predominante del oleaje es de 13 segundos que corresponde a un 84,4% y para un período de 10 segundos a un 15,1%. De esta manera, se deberá analizar el comportamiento de dispositivos que optimicen su rendimiento ante estos parámetros de oleaje.

## 2.8 Resumen del capítulo

En este capítulo se definen los conceptos referentes a energía undimotriz, origen, clasificación de las olas y ambientes de oleaje, lo anterior permite entender la formación, evolución y climas en los cuales se desarrollan las olas. Esto permite modelar las olas a través de ecuaciones de las cuales es posible estimar la energía presente en ellas.

Las características del borde costero es otro factor importante que se debe tener en cuenta al estudiar la energía de las olas, ya que según las características de este dependerá la evolución del oleaje y con ello la energía presente a distintas profundidades y distancia de la costa. Particularmente en la costa de Valparaíso, sector de Laguna Verde, el borde costero presenta elevadas profundidades, similares a la encontrada mar adentro, esto es profundidades por sobre los 30 metros, esto permite el desarrollo de proyectos que son viables en alta mar, pero instalados cercanos a la costa.

Respecto al potencial energético, este se determinó a partir los parámetros característicos del oleaje en el sector de Laguna Verde, que destacan por la poca variabilidad tanto diaria como estacional, factor importante ya que impacta directamente en el desempeño de la central y su producción de energía.

# 3 Centrales de Energía Undimotriz

---

## 3.1 Técnicas de extracción de energía undimotriz

Dada la naturaleza sinusoidal del oleaje es posible captar la energía contenida en las olas a partir de diversas técnicas, las que se pueden clasificar según las características particulares de cada dispositivo, sin embargo, se debe distinguir previamente la localización del generador de energía undimotriz respecto al borde costero, esto entrega una primera clasificación que se describe a continuación.

### 3.1.1 Según ubicación respecto al borde costero

En esta clasificación se distinguen dispositivos a instalarse en aguas profundas, aguas semi profundas o junto al borde costero. [1], [12], [13]

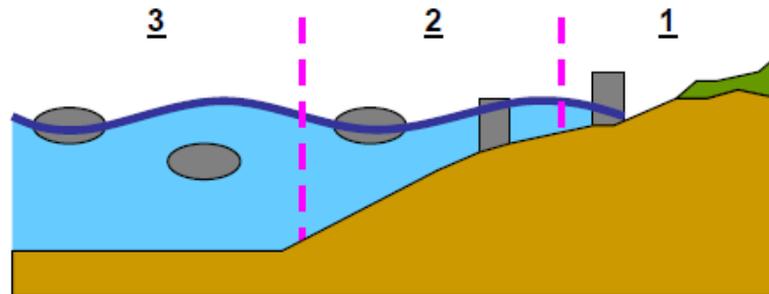


Figura 3.1.1: Clasificación de dispositivos ubicación relativa al borde costero. [2]

La Figura 3.1.1 muestra:

1. **Dispositivos junto al borde costero:** capaces de generar a profundidades incluso menores a 10 metros.
2. **Dispositivos cercanos a la costa:** caracterizados por situarse en aguas semi profundas, entre 10 y 40 metros de profundidad.
3. **Dispositivos instalados mar adentro:** en profundidades mayores a 50 metros.

### 3.1.2 Según orientación respecto al oleaje

Según esta clasificación se distinguen [1], [12], [13], [2]:

1. **Absorbedores puntuales:** Corresponden a dispositivos pequeños generalmente instalados en grupos. Concentran el oleaje en un punto.
2. **Atenuadores:** Se instalan paralelos a la dirección del oleaje, Captan la energía según el avance de la ola.
3. **Totalizadores o terminadores:** Se instalan perpendiculares a la dirección del oleaje

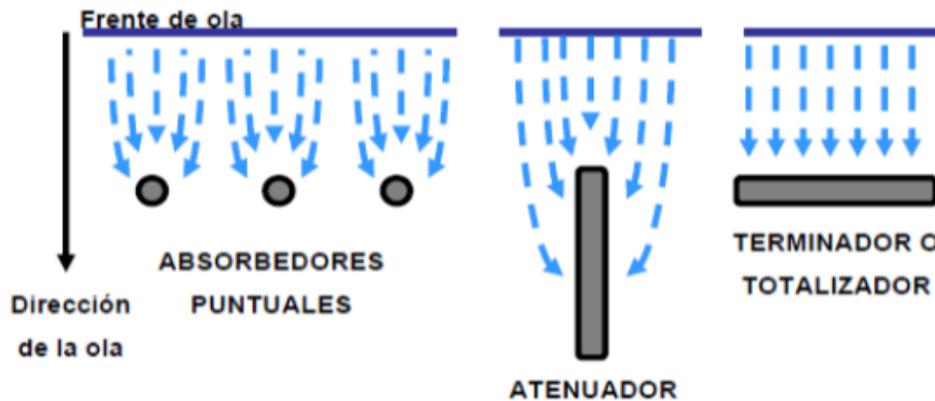


Figura 3.1.2: Clasificación de dispositivos según orientación al borde costero. [2]

### 3.1.3 Según el principio de funcionamiento y captación de energía

Se clasifican principalmente en dos grupos: [2], [13]

1. **Sistemas pasivos o estáticos,** es este grupo se encuentran los dispositivos cuya estructura se mantiene fija durante todo el proceso de extracción de energía, la energía se genera exclusivamente con el movimiento del oleaje.
2. **Sistemas activos u oscilantes,** se genera energía a partir del movimiento relativo entre partes fijas y móviles. Se distinguen dos sistemas, uno en que el oleaje actúa sobre la parte móvil del sistema y otro en que el oleaje actúa sobre aire a través de una cámara donde se desplaza el aire que finalmente desplaza las partes móviles del generador.

## 3.2 Análisis de prototipos desarrollados

A continuación, se analizan los principales proyectos desarrollados considerando distintas tecnologías y principios utilizados para la extracción de energía según lo definido anteriormente.

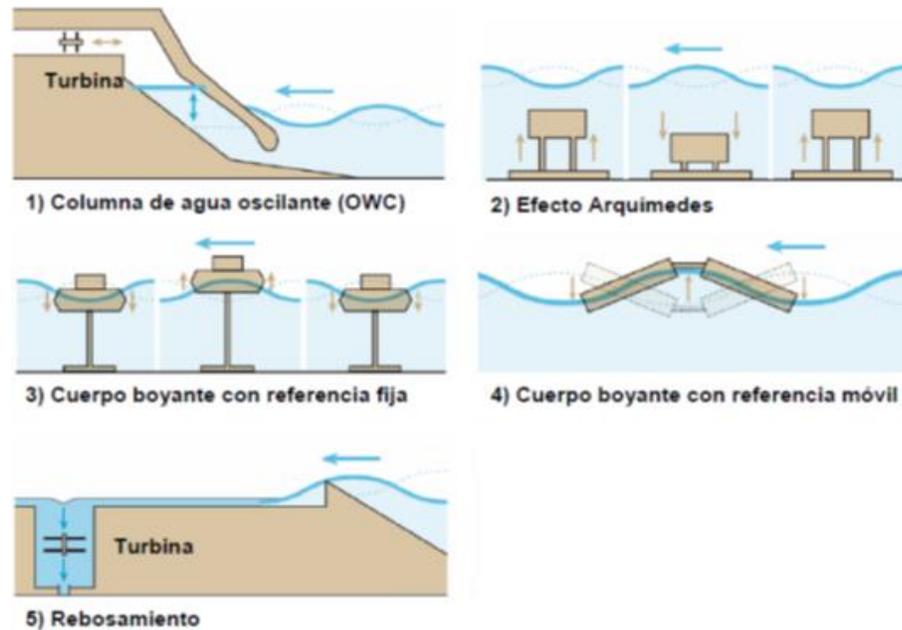


Figura 3.2.1: Principales principios de generación de energía undimotriz. [2]

### 3.2.1 Columna Oscilante de Agua (Central Limpet)

El principio de columna oscilante de agua (OWC), es estudiado ampliamente como forma de captación de la energía de las olas, gracias al movimiento oscilatorio de un gran volumen de agua que ingresa a una columna, que a su vez comprime el aire que se encuentra dentro, obteniendo así grandes presiones que se traducen en enormes ráfagas de viento. Cuando el mar se recoge, se genera un vacío en la columna que impulsa el aire en la dirección contraria, generando prácticamente la misma presión que cuando la ola enfrenta la columna. Este viento oscilante es el que finalmente permite el accionamiento de una turbina cuyo movimiento rotatorio o lineal se mueve solidario al eje de un generador eléctrico.

Sin embargo, el hecho que el flujo de aire producto del movimiento oscilatorio de las olas sea bidireccional ocasiona una dificultad no menor al momento de transferir esta energía neumática a energía mecánica de rotación, ya que incide directamente sobre la eficiencia final de cualquier sistema de extracción. Dado que los dispositivos convencionales de generación eléctrica son

unidireccionales, se debe primeramente rectificar el flujo de aire o bien emplear turbinas que conserven el sentido de giro ante un flujo bidireccional.

La Figura 3.2.2, muestra el interior de la cámara de los sistemas basados en el principio de columna oscilante de agua.

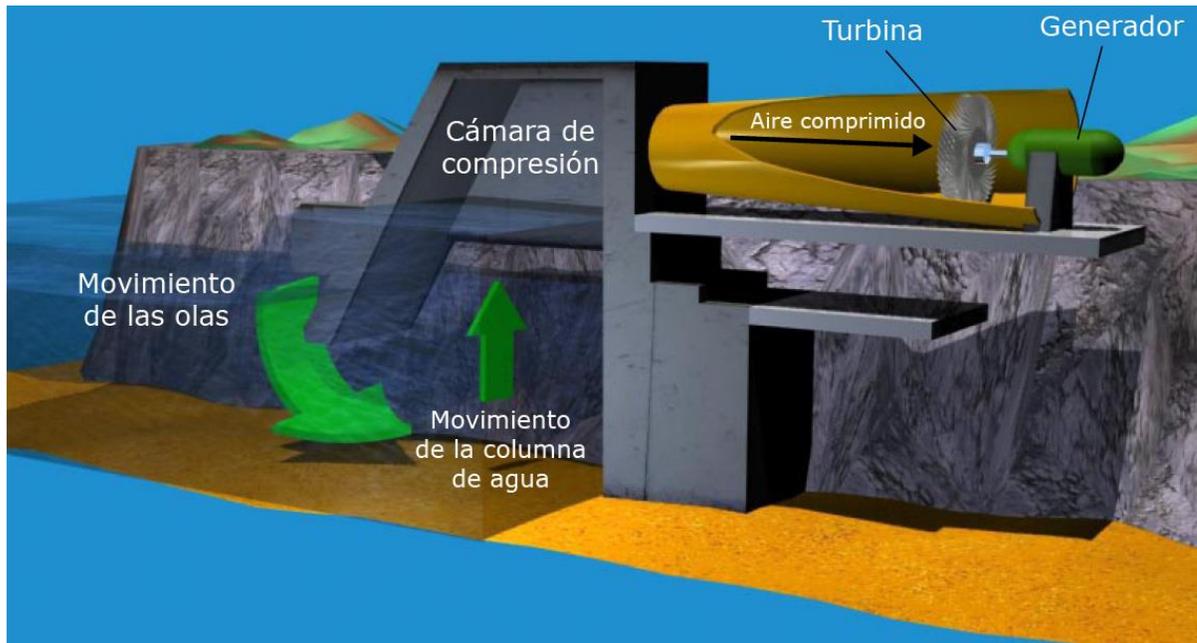


Figura 3.2.2: Interior cámara sistema OWC. [14]

De acuerdo a lo expuesto en esta sección un generador de energía a partir del principio de columna oscilante de agua se clasifica como:

- Sistema pasivo o estático.
- Totalizador o terminador.
- Instalación cerca o junto al borde costero.

Para efectos de este trabajo, se analizará en detalle el comportamiento de un modelo a escala desarrollado por la Universidad de Queen's correspondiente al proyecto Limpet [15], en el que se analiza el comportamiento de un generador de energía de las olas para distintas condiciones de oleaje.

A través de experimentos y ensayos realizados en modelos de dos y tres dimensiones para un dispositivo costero de captura de energía de las olas se logró determinar el comportamiento de este para distintas condiciones de oleaje distinguiendo la potencia incidente y el período de las olas.

El propósito de estos estudios desarrollados por la Universidad de Queen [15], [16], [17], es definir los parámetros que permitan obtener un óptimo diseño y estimar el comportamiento del dispositivo de captura de energía de las olas, las variables geométricas investigadas fueron:

- Inclínación de la pared frontal del colector ( $fw$  [°])
- Inclínación de la pared trasera del colector ( $bw$  [°])
- Largo de la superficie de la columna de agua, desde la pared frontal a la pared trasera ( $L_0$  [m])
- Posición vertical de la pestaña o labio de la pared frontal especificado en términos de:
  - La profundidad desde la superficie del agua ( $d$  [m]) o,
  - La altura de la pestaña sobre el fondo del mar ( $LH$  [m])
- Profundidad del mar ( $h$  [m]).

- **Resultados experimentales**

La energía de las olas, convertida a energía neumática por el modelo a escala depende de la geometría del tanque sumergido. Para una representación en dos dimensiones se consideró un modelo de 0,33 m de ancho, el que fue usado en un tanque que simula el mar, la Figura 3.2.3, muestra las características físicas del colector de energía de las olas.

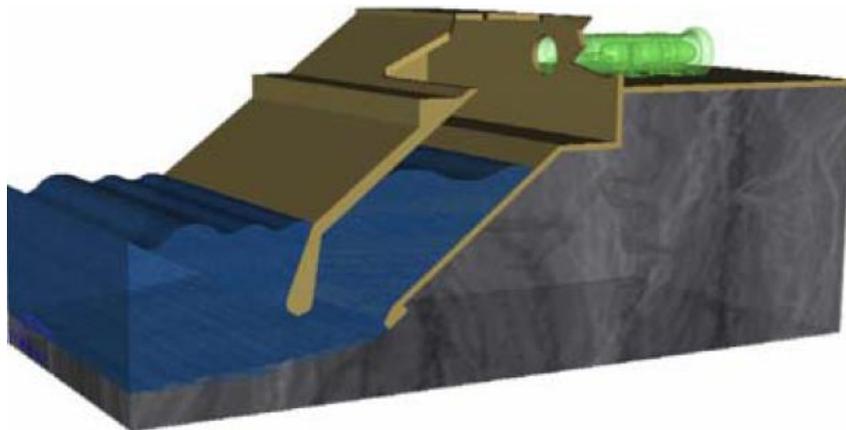


Figura 3.2.3: Modelo Limpet a escala analizado. [15]

Las pruebas fueron realizadas en un tanque simulando una pendiente marina de 1:20 (Figura 3.2.4) y el modelo de prueba fue puesto en un fondo plano (o plateau) a varias distancias del comienzo de la pendiente. La energía neumática capturada depende de la ubicación del modelo respecto a la pendiente, de la profundidad del tanque y del ángulo de inclinación de las paredes del dispositivo.

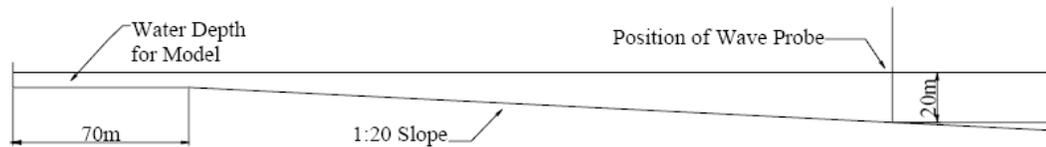


Figura 3.2.4: Pendiente fondo marino del tanque de pruebas. [15]

Para determinar el comportamiento del modelo de prueba, se realizaron simulaciones de oleaje con distintas características, las que se detallan en la Tabla 3.2.1:

Tabla 3.2.1: Características de oleajes simulados [15]

<b>Período Te [s]</b>	<b>Potencia incidente Pi [kW/m]</b>
7	15
7	40
10	15
10	40
10	65
13	40
13	65

Durante el programa de pruebas, el fondo del tanque fue variado simulando una profundidad del plateau de 4, 5, 6, 8 y 10 metros. El Gráfico 3.2.1 muestra la potencia medida por frente de ola para las profundidades ya señaladas, hasta profundidades de 20 metros siguiendo la pendiente del fondo marino y para un plateau de 60 metros.

Se logra distinguir en el Gráfico 3.2.1 tres grupos de curvas que indican la potencia del oleaje, para oleajes de bajo contenido energético no se registran grandes pérdidas al enfrentarse a bajas profundidades, en cambio para el oleaje con mayor potencia al entrar en aguas poco profundas sufren una importante reducción debido a que se enfrenta a fenómenos como rotura de la ola, caracterizado por una gran disipación de energía.

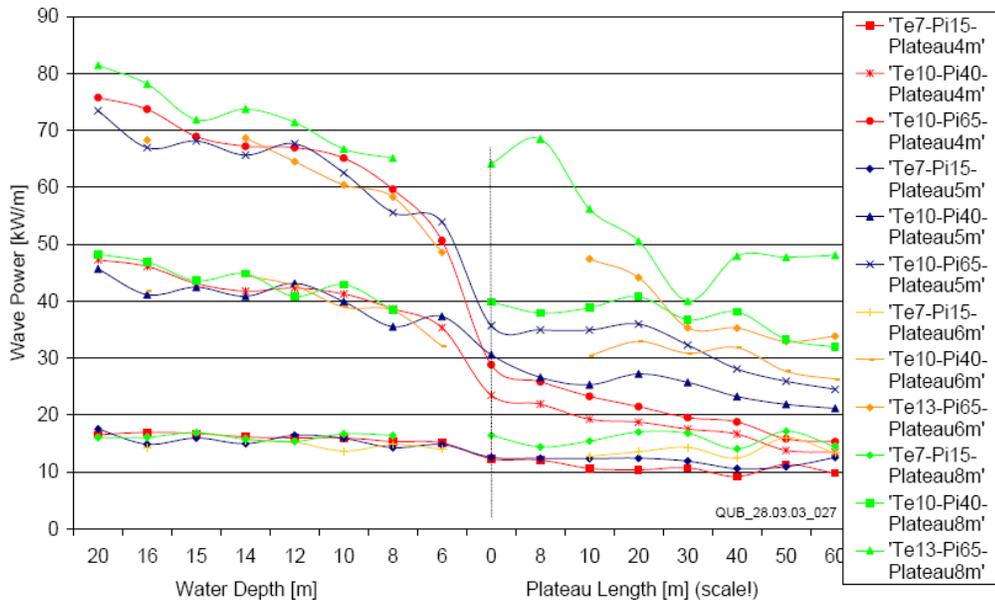


Gráfico 3.2.1: Resultados experimentales modelo Limpet. [15]

El Gráfico 3.2.2 y Gráfico 3.2.3 confirman lo mencionado anteriormente, en ellos se muestra con mayor detalle la potencia medida para profundidades 5 y 10 metros, para los distintos tipos de oleajes simulados, en mares de 10 metros de profundidad prácticamente no se reduce la energía del oleaje al entrar al plateau, lo cual es altamente beneficio al momento de definir la ubicación del colector de energía de las olas. Para profundidades de 10 metros es posible observar marcadamente fenómenos de reflexión de las olas lo que se traduce en un aumento de altura de la ola y por ello un aumento de la energía contenida.

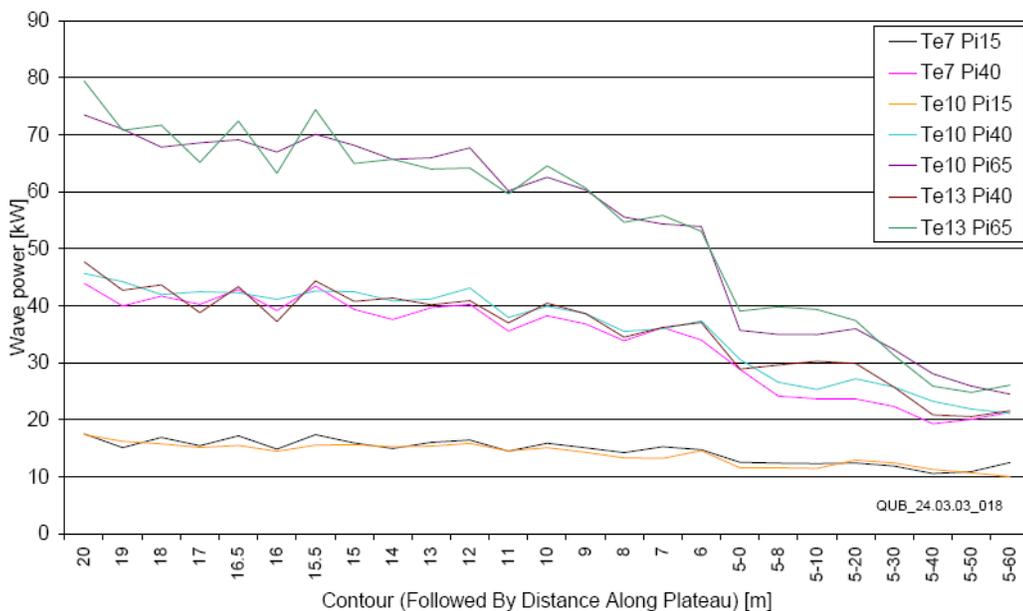


Gráfico 3.2.2: Resultados experimentales modelo Limpet, profundidad 5 m. [15]

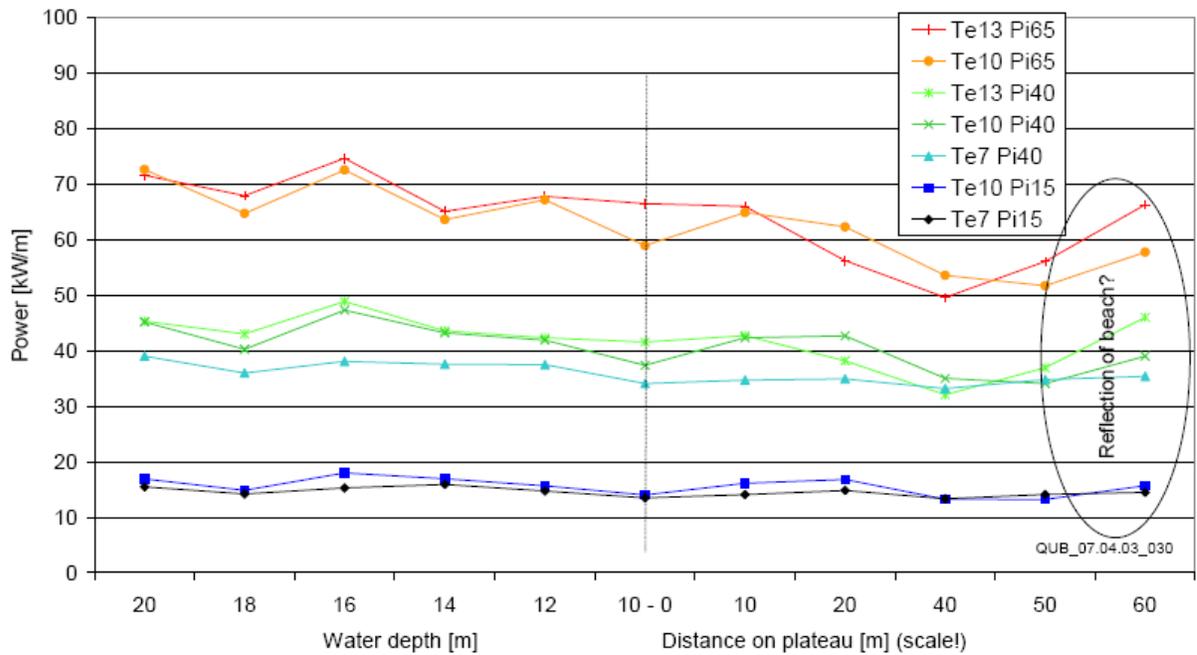


Gráfico 3.2.3: Resultados experimentales modelo Limpet, profundidad 10 m [15]

El Gráfico 3.2.4 resume la influencia de la profundidad del mar en la energía media capturada para las distintas características de oleaje. La mayor reducción de energía se produce para olas con mayor contenido energético.

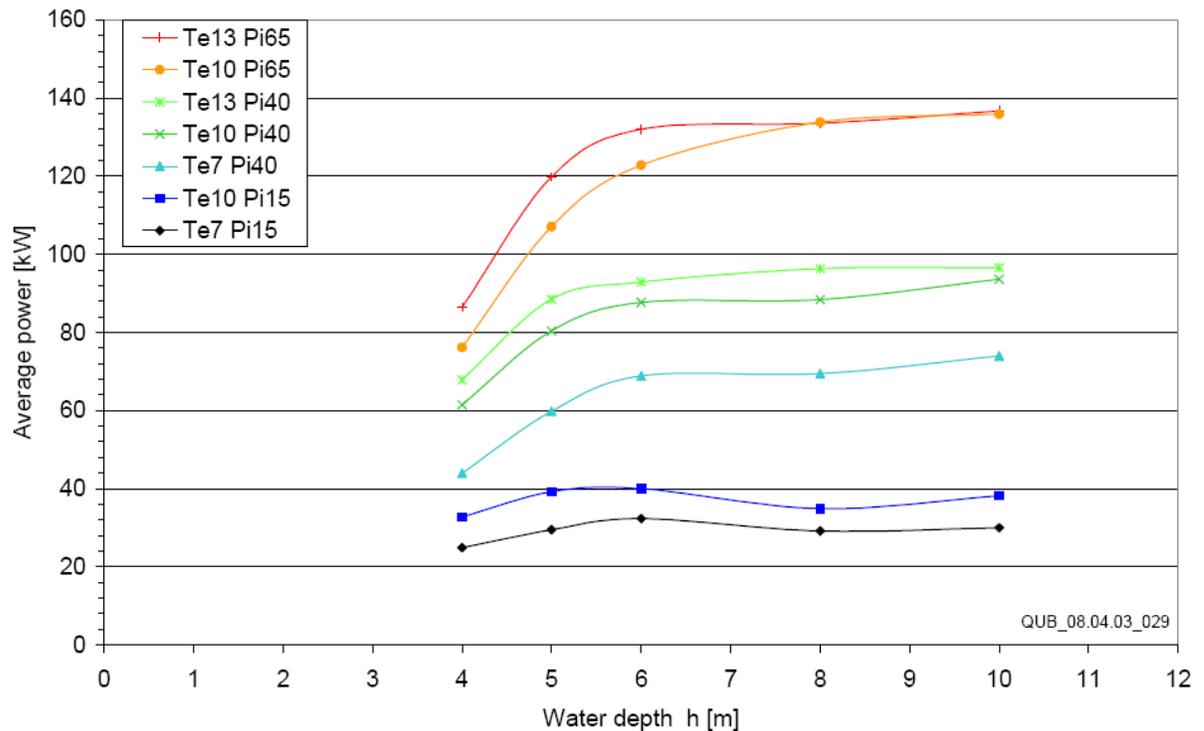


Gráfico 3.2.4: Influencia de la profundidad en la captura del colector. [15]

Otro aspecto a considerar es la ubicación de la central y como esta se emplaza sobre el perfil costero. Esta puede ser: estar en línea con la costa, sobresalir de ella o adentrarse en el borde tal como lo muestra la Figura 3.2.5.

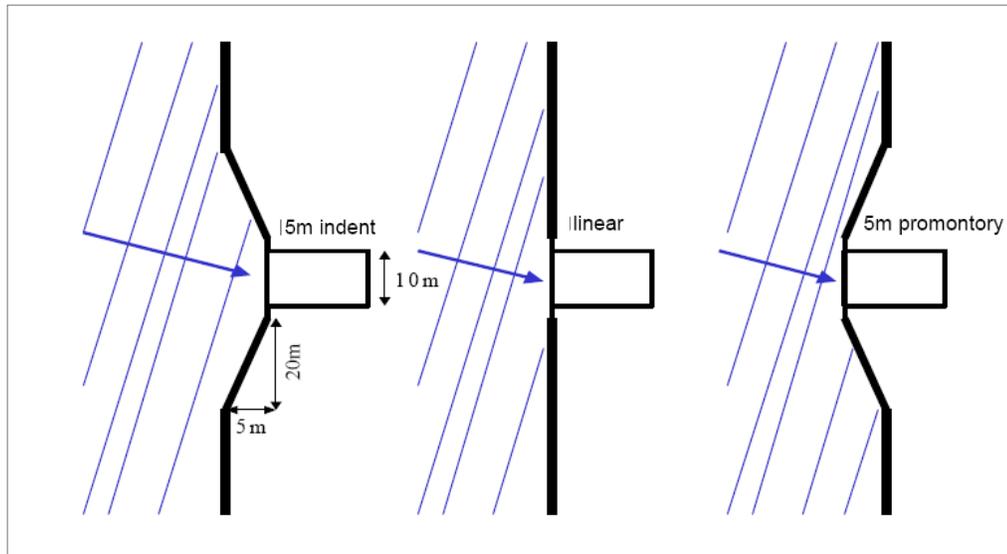


Figura 3.2.5: Ubicación del colector respecto a la línea de borde costero. [15]

Dependiendo de esta característica es el rendimiento que se puede obtener de la central, la Gráfico 3.2.5 muestra la energía capturada para cada uno de los casos señalados.

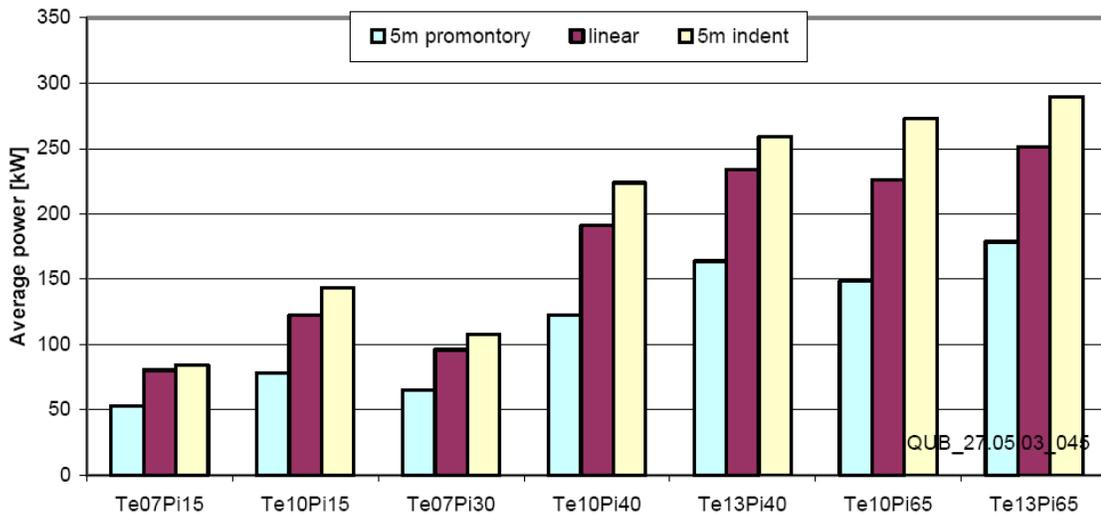


Gráfico 3.2.5: Rendimiento del colector en función de la ubicación respecto al borde costero. [15]

El mejor desempeño se observa para la central ubicada dentro de la línea costera independiente de las características del oleaje incidente, esto se debe a que se logra un efecto de concentración del oleaje, aumentando el volumen de la columna de agua que ingresa a la cámara.

El factor de captura, coeficiente importante para determinar el rendimiento del colector ante el oleaje incidente queda determinado a partir de pruebas realizadas para tres perfiles distintos de fondo marino con oleajes de amplitudes de 1 y 2 metros y períodos entre 7 y 16 segundos.

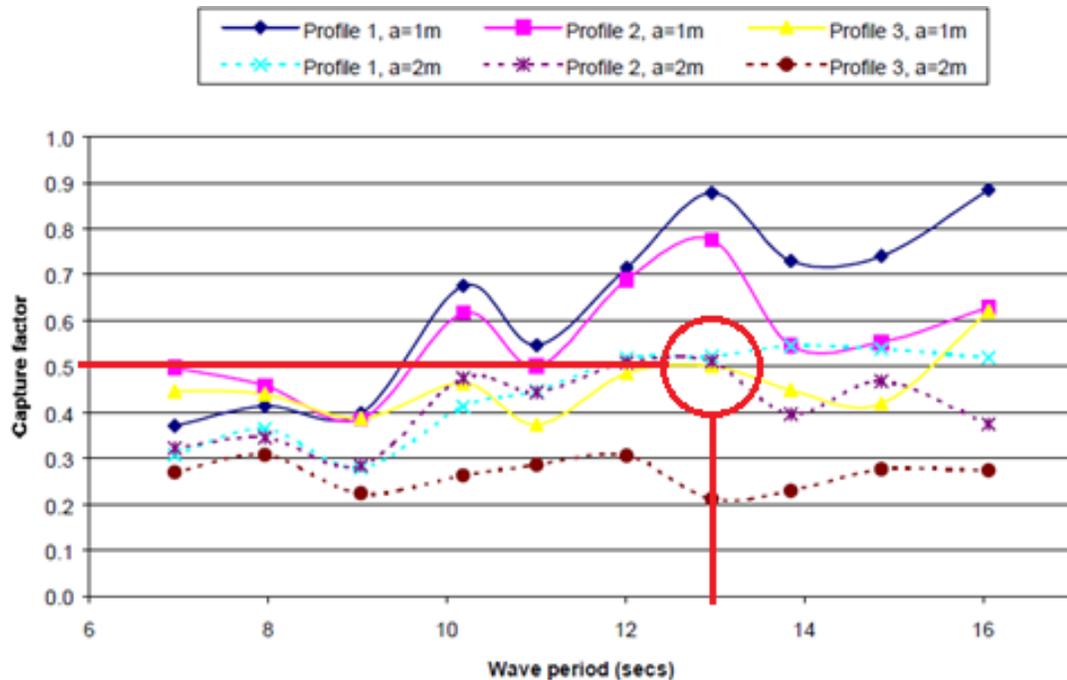


Gráfico 3.2.6: Factor de captura de la Central Limpet para distintos tipos de oleaje. [16]

El Gráfico 3.2.6 muestra un factor de captura de 0,5 para oleajes de 2 metros de amplitud sobre un perfil de fondo marino típico caracterizado por un plateau o meseta de 17 metros de largo donde comienza luego una pendiente de 1:25 hasta llegar a aguas profundas. Este perfil corresponde a: “profile 2, a=2m” en el gráfico, perfil típico del oleaje en la zona de estudio, cuyo período es de 13 segundos en promedio.

- **Conversión a energía eléctrica**

En sistemas basados en el principio de columna oscilante de agua, la turbina Wells es el dispositivo aerodinámico utilizado para extraer la energía cinética generada por un flujo oscilante de aire; como el que se presenta al desplazar una columna de aire por acción de las olas. Para aprovechar esta forma de energía el rotor de la turbina Wells consiste en un determinado número de aspas con perfiles simétricos, distribuidos alrededor de un cubo central [18]. Esta característica de construcción induce un sólo sentido de giro en la turbina independiente de la dirección de flujo de aire que incida sobre ella, Figura 3.2.6.

La naturaleza del flujo bidireccional es extremadamente compleja tratándose de un flujo no estacionario con un amplio rango de velocidades, esto implica que oscila en un gran abanico de regímenes, desde el laminar al turbulento [19]. Dado que el objetivo de este trabajo no se centra en el diseño de este tipo de turbinas, se muestran a continuación de modo teórico las ecuaciones básicas de diseño, para efectos de cuantificar la energía convertida por este dispositivo se considerarán valores de eficiencia obtenidos de manera experimental de distintos proyectos.

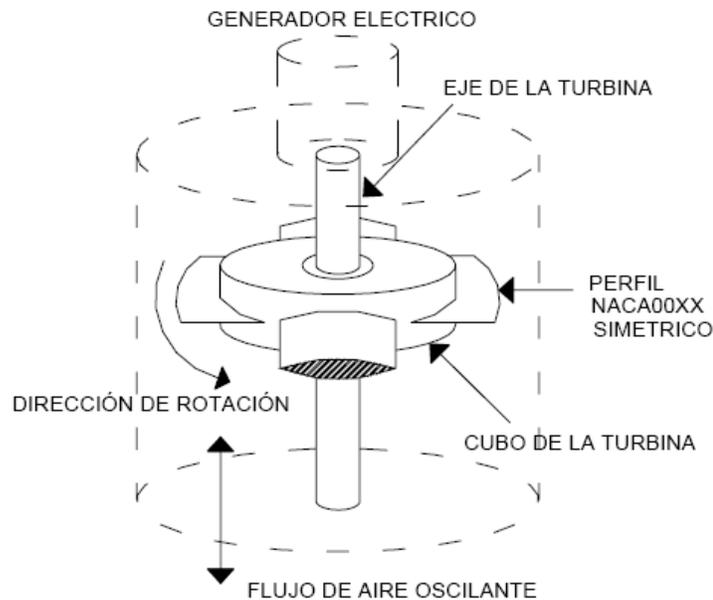


Figura 3.2.6: Turbina Wells. [19], [20]

La turbina Wells debe extraer la energía cinética disponible del aire sin cambios bruscos en su velocidad de rotación; esto se refleja en una transmisión de un movimiento rotacional uniforme representado en potencia mecánica al eje del generador.

Las dimensiones y el número de aspas de la turbina Wells dependerán de la potencia que sea posible extraer del dispositivo, y de la capacidad del generador eléctrico que tenga acoplado.

La potencia total en la turbina está dada por [19]:

$$W_{total} = Q \cdot \Delta P$$

Donde:

$Q$ : Caudal de aire que entra a la turbina

$\Delta P$ : Caída de presión entre la entrada y salida del aire de la turbina

La potencia efectiva de la turbina está dada por la velocidad de rotación de esta y torque y se define como [19]:

$$W_{util} = \Omega \cdot T$$

Donde:

$\Omega$ : Velocidad angular de la turbina

$T$ : Torque o momento sobre la turbina

La eficiencia de la turbina se define como:

$$\eta = \frac{\Omega \cdot T}{Q \cdot \Delta P}$$

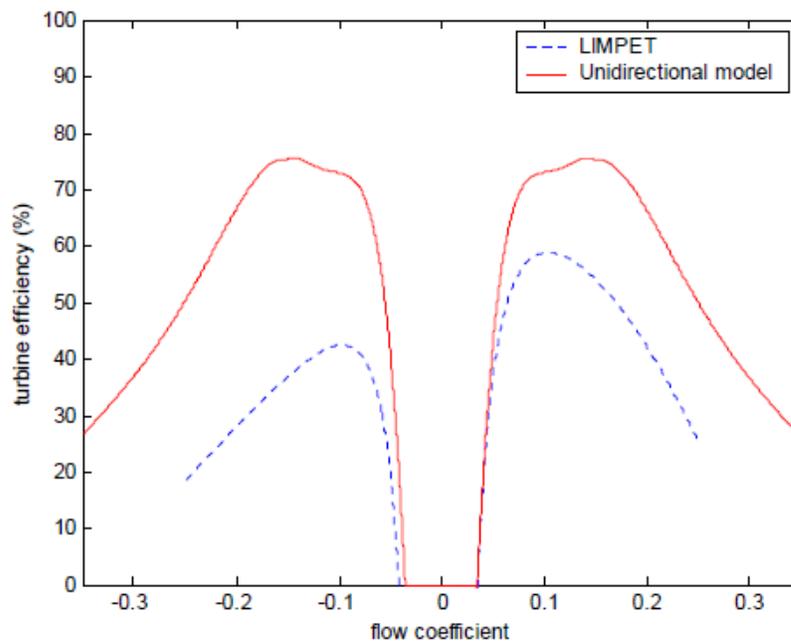


Figura 3.2.7: Eficiencia turbina Wells. [19]

La experiencia indica además que la eficiencia de este tipo de turbinas es baja sobre todo cuando opera con flujos bidireccionales, la Figura 3.2.7, muestra la eficiencia típica que en régimen de exhalación no supera el 55% y en inhalación alcanza un 40%, [19]. Entendiendo que la turbina opera la mitad del ciclo de trabajo en régimen de inhalación y la otra mitad en régimen de exhalación, se supondrá una eficiencia media del 47,5%.

$$P_{mec} = P_{neu} \cdot 0,475$$

La Figura 3.2.8 muestra el proceso desde que la energía de las olas ingresa a la cámara semi sumergida como energía neumática y que es transformada a energía mecánica gracias a la turbina Wells. La producción de energía eléctrica se realiza a través de un generador acoplado al eje de la turbina, cuya potencia depende de la potencia del oleaje incidente, dada la variabilidad del flujo incidente en la turbina que implica una variabilidad en la velocidad de giro del generador, se opta por un generador de inducción de velocidad variable doblemente alimentado ya que ofrece un adecuado control de potencia activa y reactiva con baja contaminación armónica.

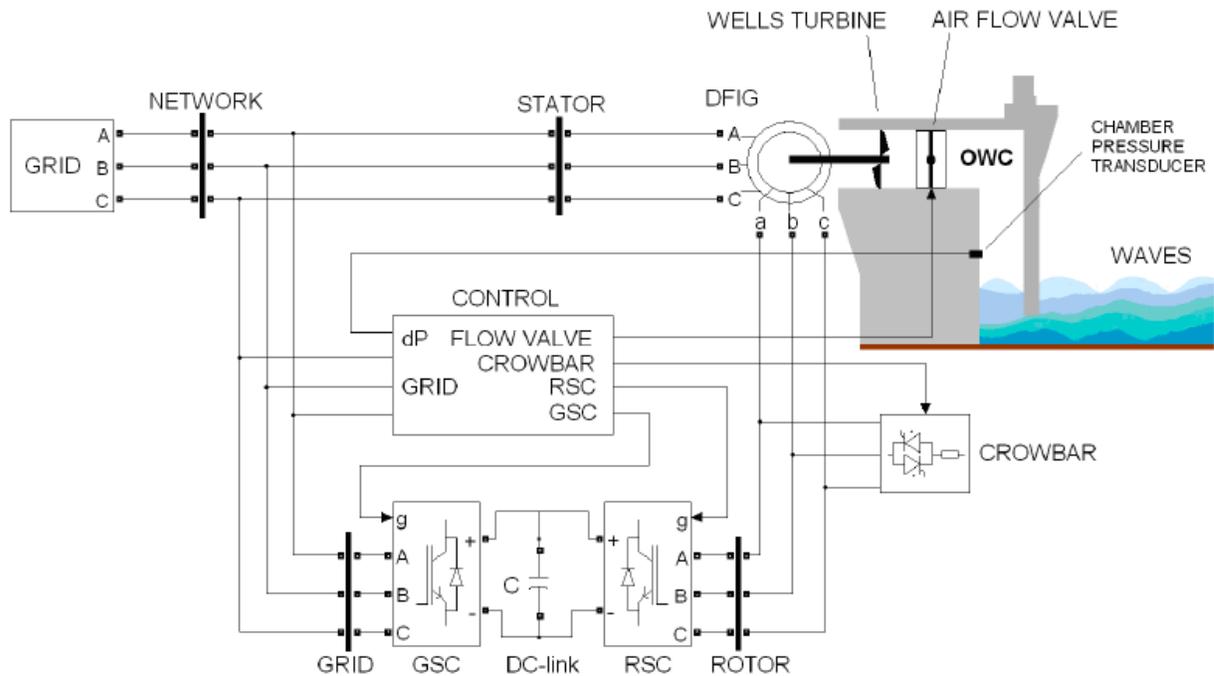


Figura 3.2.8: Esquema de conexión generador OWC a red eléctrica. [21]

En la Figura 3.2.8, se distinguen las etapas en el proceso de conversión de energía, desde el ingreso de las olas al colector o cámara de captura, donde la energía undimotriz es transformada en energía neumática la cual se transforma en energía mecánica de rotación a través de la turbina Wells, finalmente el generador de inducción convierte esta energía en energía eléctrica inyectándola a la red. Por otro lado los actuadores del sistema corresponden al convertidor de frecuencia configurado en back to back, formado por los convertidores de tensión RSC y GSC (Rotor Side Converter y Grid Side Converter respectivamente) que se acoplan a través de un condensador de enlace C, se tiene además como sistema de protección un transductor de presión que actúa para regular el flujo de aire dentro de la cámara a través de una válvula de flujo, para evitar huecos de tensión con la red eléctrica se tiene un Crowbar como sistema de protección. [21]

### 3.2.2 Efecto Arquímedes

Corresponde a un sistema de extracción sumergido (entre 40 y 100 metros de profundidad), por lo que no genera impacto visual. Está formado por dos cilindros: uno anclado fijamente al fondo del mar (cilindro interior) y el otro hace la función de flotador, desplazándose verticalmente en función del oleaje incidente sobre el dispositivo (cilindro exterior).

Cuando la cresta de la ola se encuentra sobre el dispositivo, este se contrae producto de la presión, por el contrario, si el valle se encuentra sobre el dispositivo, el flotador se expande. De esta manera se equilibran las presiones entre el interior y exterior del dispositivo generando un movimiento oscilatorio. El movimiento relativo entre el flotador y la parte fija se transforma en electricidad mediante un generador lineal o un sistema hidráulico acoplado a un generador convencional.

La idea original corresponde a Hans Van Breugel y Fred Gardner quienes trabajaron en el prototipo a escala 1:20 desde 1993 con la empresa holandesa Teamwork Technology B.V. En el año 2004 la empresa de energías marinas renovables AWS Ocean Power, compró los derechos de propiedad del dispositivo y es quien actualmente lo desarrolla. La empresa tiene su sede en Ross-Shire, cerca de Inverness, capital del condado escocés de Highland. [13]

El primer proyecto desarrollado corresponde a la planta piloto instalada en Viana do Castelo (Portugal), las características técnicas se indican a continuación:

- Diámetro: 9,5 [m]
- Profundidad: 43 [m]
- Carrera nominal: 7 [m]
- Potencia máxima: 2 [MW]
- Potencia media: 1 [MW]

La amplitud nominal del movimiento del flotador es de 3,5 metros, dado que la carrera es de 7 metros, la velocidad nominal de oscilación es de 2,2 [m/s] [13]. En la Figura 3.2.9, se explica el principio de funcionamiento.

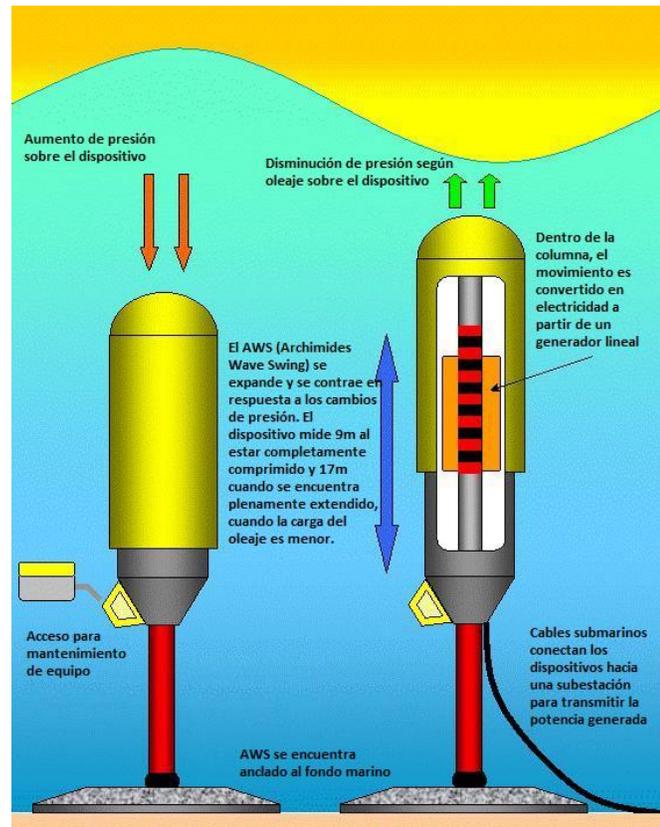


Figura 3.2.9: Principio de operación generador efecto Arquímedes. [2], [12], [13]

En la Figura 3.2.10 se observa el dispositivo antes de ser sumergido.



Figura 3.2.10: Central Undimotriz Arquímedes. [1], [2]

- Matriz de potencia de la Central Archimides Wave Swing

En este trabajo se analizará y evaluará el comportamiento de una unidad con las similares características al primer proyecto desarrollado, pero con una potencia nominal de 2 [MW]. La matriz de potencia de este dispositivo se muestra en la Tabla 3.2.2: Matriz de potencia AWS. .

Tabla 3.2.2: Matriz de potencia AWS. [22]

		Período Peak Tp [s]																			
		5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0	13,5	14,0	14,5
Altura de Ola Significativa Hs [m]	1,0	2	7	13	19	26	34	41	48	58	68	81	93	105	118	131	144	153	163	183	203
	1,5	4	15	28	41	56	72	85	99	121	143	173	203	226	248	266	285	309	334	357	380
	2,0	8	26	49	73	100	127	150	172	210	247	292	337	366	395	418	442	482	523	543	563
	2,5	15	43	78	113	159	205	234	263	320	376	438	499	531	563	603	643	675	708	741	774
	3,0	25	61	111	161	227	293	339	386	453	521	600	680	722	765	827	888	897	906	945	984
	3,5	35	92	155	218	305	391	454	517	605	694	772	851	913	975	1036	1096	1119	1141	1163	1185
	4,0	35	114	194	273	380	486	572	659	776	894	961	1027	1103	1179	1227	1275	1316	1357	1365	1374
	4,5	-	-	235	332	479	626	722	819	957	1096	1168	1240	1320	1401	1449	1497	1547	1598	1590	1583
	5,0	-	-	280	400	592	784	899	1014	1144	1274	1380	1487	1569	1651	1691	1731	1785	1838	1807	1777
	5,5	-	-	320	432	641	849	1033	1216	1331	1446	1568	1690	1778	1867	1919	1970	1977	1984	1994	2005
	6,0	-	-	-	-	680	944	1155	1367	1495	1623	1759	1895	1963	2072	2137	2202	2205	2207	2226	2246
	6,5	-	-	-	-	720	1123	1335	1547	1678	1809	1963	2116	2200	2284	2332	2380	2425	2470	2452	2434

De acuerdo a los valores de potencia de salida que se indican en la matriz de la Tabla 3.2.2, se tiene que el mejor desempeño de la central se obtiene para oleajes de un elevado período, por sobre los 12 segundos y una elevada altura significativa de la ola. Lo anterior tiene su explicación en que dado el principio de funcionamiento oscilatorio del generador lineal se optimiza la extracción de energía en la medida en que la carrera o el máximo desplazamiento entre flotador y la parte fija coincida con la altura de la ola. Otro factor importante es el tiempo en que el dispositivo realiza su carrera respecto a la velocidad nominal de este.

Al tomar el período de ola significativo en la costa del sector en estudio (13 segundos), se tiene el Gráfico 3.2.7 que muestra la potencia de salida del dispositivo a medida que aumenta la altura de la ola, esto se explica, como se mencionó anteriormente a que dado que la carrera nominal del dispositivo es de 7 metros, al operar con alturas de olas de similar amplitud al desplazamiento del generador, se obtiene el mayor desempeño del dispositivo. Del mismo modo al operar ante alturas significativas de oleaje de 2,5 metros en promedio, se logra un bajo rendimiento del generador.

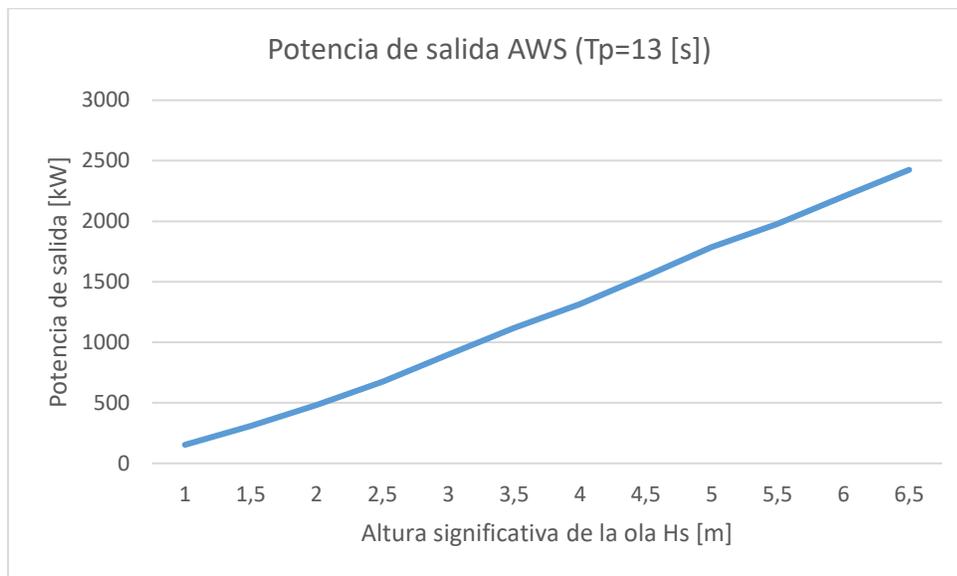


Gráfico 3.2.7: Potencia de salida en función de la altura de ola sobre el AWS. [Elab. Propia]

- **Conversión a energía eléctrica**

Dada la dinámica natural de las olas resulta práctico desarrollar dispositivos que transformen la energía undimotriz en energía eléctrica aprovechando el movimiento vertical de las olas. Un generador lineal para la conversión de energía undimotriz en energía eléctrica presenta una serie de ventajas comparativas respecto a otros sistemas de conversión de la energía de las olas, de las cuales destacan:

- Mayor eficiencia al existir menos pasos de conversión de energía
- El movimiento de las olas corresponde a un movimiento vertical
- La costa chilena presenta excelentes condiciones para el uso de esta tecnología ya que presenta poca variabilidad de los parámetros como altura y frecuencia

Al igual que la máquina rotatoria, el generador lineal, se compone de una parte fija equivalente al estator en un generador rotatorio y una parte móvil equivalente al rotor denominada también traslator. El movimiento relativo entre la parte móvil y la parte fija generan las variaciones de flujo magnético en el estator generando energía eléctrica.

Para un adecuado diseño del generador lineal, se debe tener en cuenta la energía disponible y que fracción de esta es posible finalmente convertir en energía eléctrica, con esta información y basándose además en experiencias desarrolladas que indican una eficiencia cercana al 87% para un convertidor de energía de las olas.

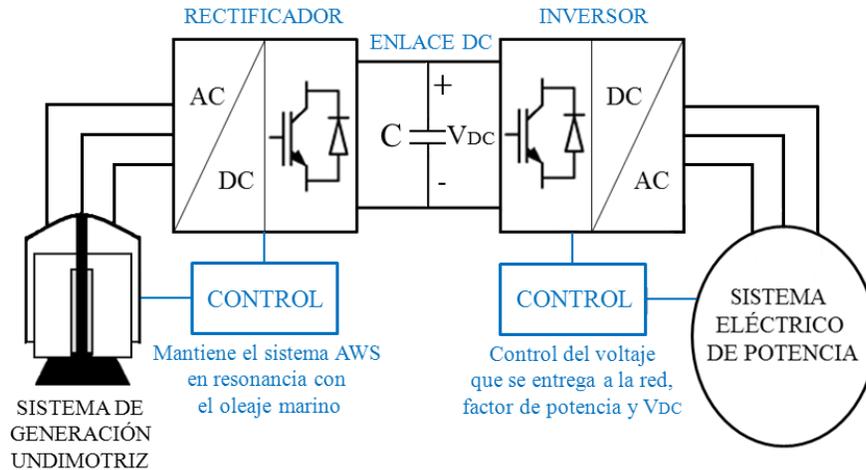


Figura 3.2.11: Esquema de conexión generador AWS a red eléctrica. [23]

Tal como en el caso del generador OWC, la integración del generador undimotriz a la red eléctrica se realiza a partir de un convertidor back to back, formado por un convertidor del lado del generador y otro del lado de la red, actuando como rectificador e inversor de la energía eléctrica generada respectivamente, ambos convertidores se encuentran acoplados por un condensador de enlace C. Visto desde el generador, el sistema cuenta con un rectificador encargado de convertir la señal de corriente alterna obtenida del generador undimotriz, en corriente continua, además de maximizar la energía capaz de extraer y minimizar pérdidas, para esto, la parte móvil del generador debe estar en resonancia con el oleaje y la fuerza de amortiguación hidrodinámico de la máquina síncrona debe ser igual a la fuerza generada por el agua sobre el generador. [23]

Para que el translator este en resonancia con el oleaje, se regula la presión y el volumen de aire dentro de la cámara del generador AWS

De acuerdo a esto la distancia vertical que recorre la parte móvil del generador lineal corresponde a la altura de la ola a una frecuencia  $f$  dada por  $1/T$  Hz, por lo tanto, se debe determinar el número de polos que permita obtener la frecuencia de generación deseada

La potencia en un generador lineal está dada por:

$$P = F \cdot v$$

Donde:

$v$ : Velocidad lineal de la parte móvil del generador o rotor.

$F$ : Fuerza neta aplicada sobre el translator.

Por otro lado, de acuerdo a la ley de Faraday se tiene:

$$V = -N \frac{d\phi}{dt}$$

Donde:

$N$ : Número de polos

$\phi$ : Flujo magnético

Otra consideración importante es la existencia de imanes permanentes que generen un flujo magnético de la magnitud necesaria para extraer la mayor cantidad de energía por unidad de superficie sin saturar el núcleo del rotor de la máquina.

### 3.2.3 Boya con referencia fija

Con estas características es posible distinguir una serie de dispositivos, por ejemplo, el desarrollado por la Universidad de Upsala en Suecia y probado en la costa oeste de ese país el año 2006. Corresponde a una boya flotante acoplada a través de un eje al generador lineal, en este dispositivo el generador se fija sobre el fondo marino. En otros en tanto el generador se encuentra sumergido como es el caso de Power Buoy, desarrollado Ocean Power Technologies OPT, Figura 3.2.12, cada unidad es capaz de generar 40 [kW], por lo que un arreglo de estos generadores puede dar resultar en una granja de varios Mega Watts.



Figura 3.2.12: Generador Power Buoy en operación. [2]

Otro sistema de similares características es el Wavebob, desarrollado por la empresa Wavebob Ltd. del Reino Unido, cada unidad dispone de tres alternadores 0,5 [MW] cada uno por lo que se tiene una potencia de salida de 1,5 [MW], está diseñado para operar a 70 metros de profundidad, también es posible dimensionar granjas con la conexión de varios de estos dispositivos.

- **Matriz de potencia del Generador Power Buoy**

Para efectos de este trabajo se analizará el generador Power Buoy de 250 [kW] de potencia, cuya matriz de potencia se muestra en la Tabla 3.2.3, la cual permite predecir el comportamiento de cada unidad de acuerdo a los parámetros de oleaje incidente.

Tabla 3.2.3: Matriz de potencia Power Buoy.

		Período Peak Tp [s]									
		6	7	8	9	10	11	12	13	14	17
Altura de Ola Significativa [m]	1,0	-	8	11	12	11	10	8	7	-	-
	1,5	13	17	25	27	26	23	19	15	12	7
	2,0	24	30	44	49	47	41	34	28	23	12
	2,5	37	47	69	77	73	64	54	43	36	19
	3,0	54	68	99	111	106	92	77	63	51	27
	3,5	-	93	135	152	144	126	105	86	70	38
	4,0	-	122	176	198	188	164	137	112	91	49
	4,5	-	-	223	250	239	208	173	142	115	62
	5,0	-	-	250	250	250	250	214	175	142	77
	5,5	-	-	250	250	250	250	250	211	172	92

La matriz de potencia indica que el generador Power Buoy en estudio está diseñado para que su rendimiento óptimo sea en oleajes de período entre 8 y 10 segundos y altura promedio de 4,5 metros, distantes de los parámetros observado en la costa del sector de Laguna Verde, Región de Valparaíso, cuyos parámetros característicos de período y altura significativa son 13 segundos y 2,7 metros respectivamente. El Gráfico 3.2.8 muestra la diferencia en la potencia extraíble por el dispositivo al operar en condiciones de oleaje diferentes a las cuales fue diseñado el generador undimotriz.

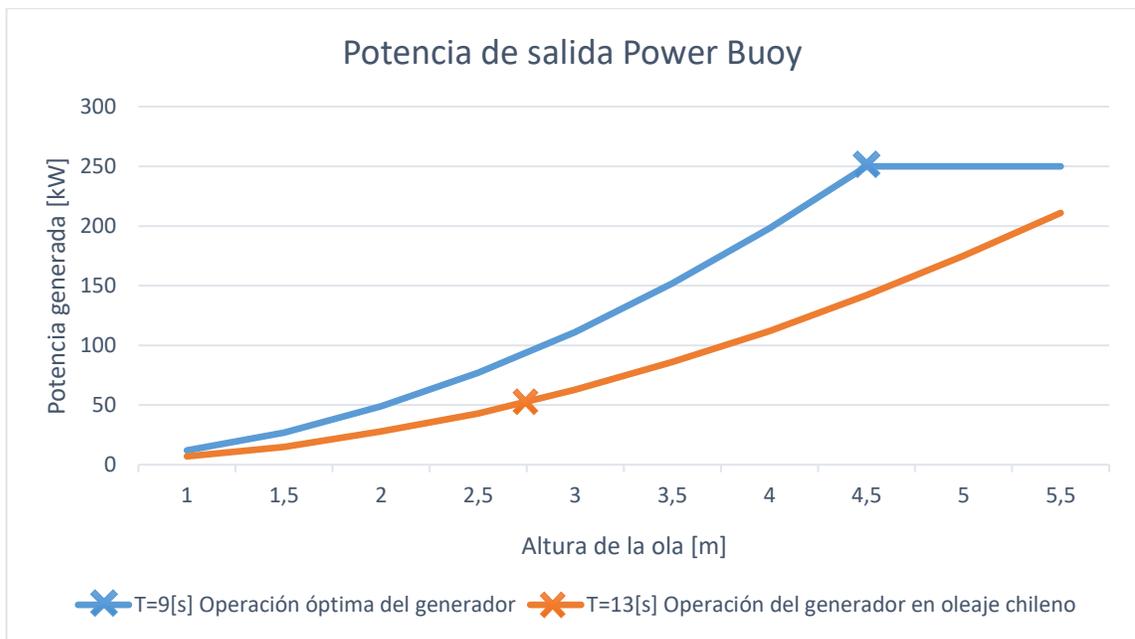


Gráfico 3.2.8: Curvas de operación Power Buoy. [Elab. Propia]

- **Conversión a energía eléctrica**

El proceso de conversión se realiza según se trate de un dispositivo basado en un generador eléctrico lineal o un generador impulsado por una turbina, en este caso una turbina Pelton, la Figura 3.2.13 muestra dos esquemas de conexión del generador undimotriz a la red eléctrica, a través de un generador lineal y generador rotatorio respectivamente.

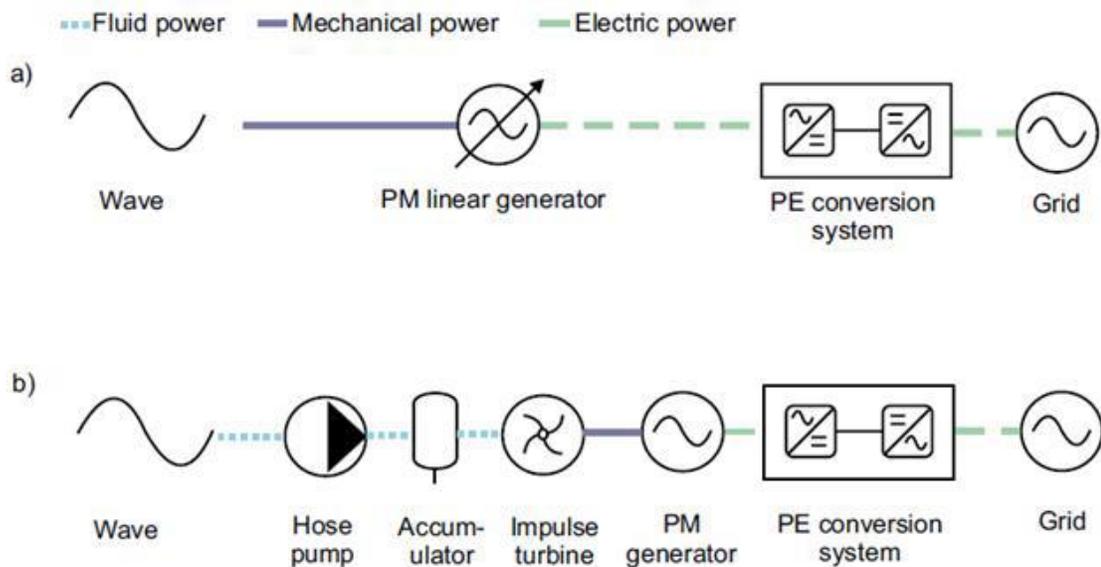


Figura 3.2.13: a) Conversión con generador lineal.

b) Conversión con turbina y generador rotatorio. [24]

Particularmente el uso del generador lineal presenta un mayor costo de construcción que el uso de un actuador hidráulico junto a la turbina y generador rotatorio, además se debe considerar que, para obtener la misma potencia de salida, el generador lineal resulta ser de mayor tamaño en términos de volumen, esto dado a la necesidad de utilizar imanes permanentes de gran tamaño para obtener la potencia de salida deseada a diferencia del sistema hidráulico que resulta ser además más liviano. Desde el punto de vista del mantenimiento el uso de un generador lineal presenta ventajas en comparación a un sistema que requiere mayores etapas de conversión como el hidráulico el que debe estar cuidadosamente sellado que le permita ser sumergido en el mar. [24]

La conexión a la red de distribución de un parque undimotriz basado en unidades Power Buoy puede configurarse de múltiples maneras, la gran diferencia entre una y otra alternativa recae en el hecho de incorporar equipos sumergidos en el mar lo que por un lado dificulta las labores de montaje, mantenimiento y operación, pero que pueden reducir las pérdidas por transmisión de energía si el parque se encuentra instalado alejado del borde costero.

La Figura 3.2.14, Figura 3.2.15, Figura 3.2.16 y Figura 3.2.17 muestran distintas topologías de conexión de los equipos que componen el sistema de conexión a la red de distribución eléctrica en todas se conectan las unidades Power Buoy entre sí, las variaciones se observan en el proceso de conversión y transmisión de la energía que para reducir pérdidas se opta por instalar equipos sumergidos junto al conjunto o arreglo de unidades, lo que a su vez trae como desventaja tener que utilizar equipos sumergibles o bien tener que diseñar una subestación que pueda operar bajo el mar. En todos los casos sin embargo se opta por la conversión AC/DC junto a cada unidad.

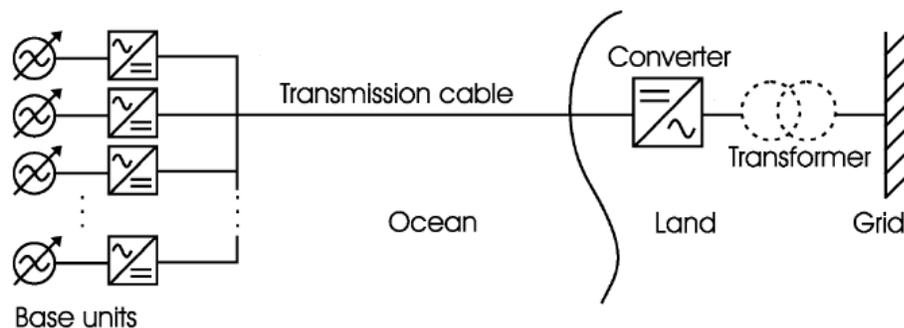


Figura 3.2.14: Unidades conectadas y transmisión en corriente continua al borde costero. [24]

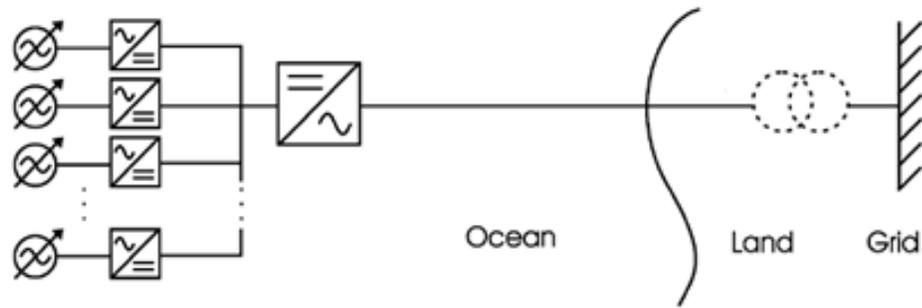


Figura 3.2.15: Unidades conectadas y el conjunto conectado al inversor sumergido en el mar. [24]

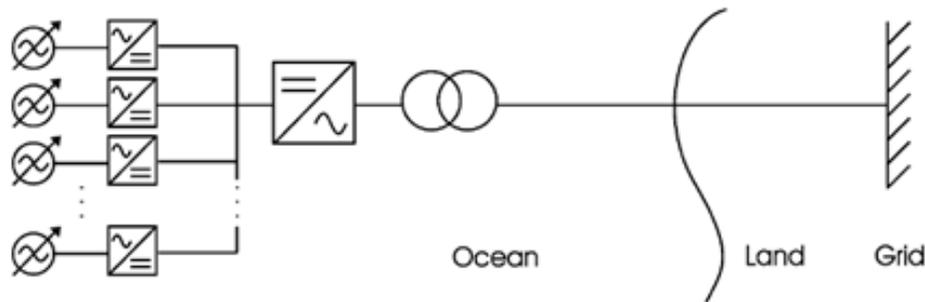


Figura 3.2.16: Unidades conectadas y el conjunto conectado al inversor y transformador elevador de tensión sumergidos en el mar. [24]

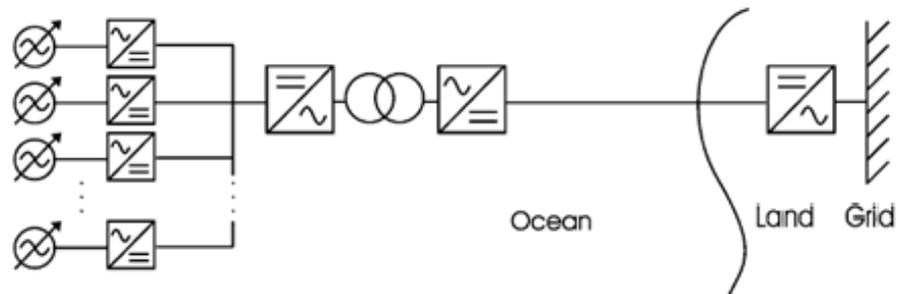


Figura 3.2.17: Unidades conectadas y el conjunto conectado al inversor, transformador elevador de tensión y rectificador sumergidos en el mar. [24]

La Figura 3.2.17 puede ser ejemplificada agrupando los componentes que conforman el proceso de rectificación y conversión de energía en una subestación marítima como se ilustra en la Figura 3.2.18.

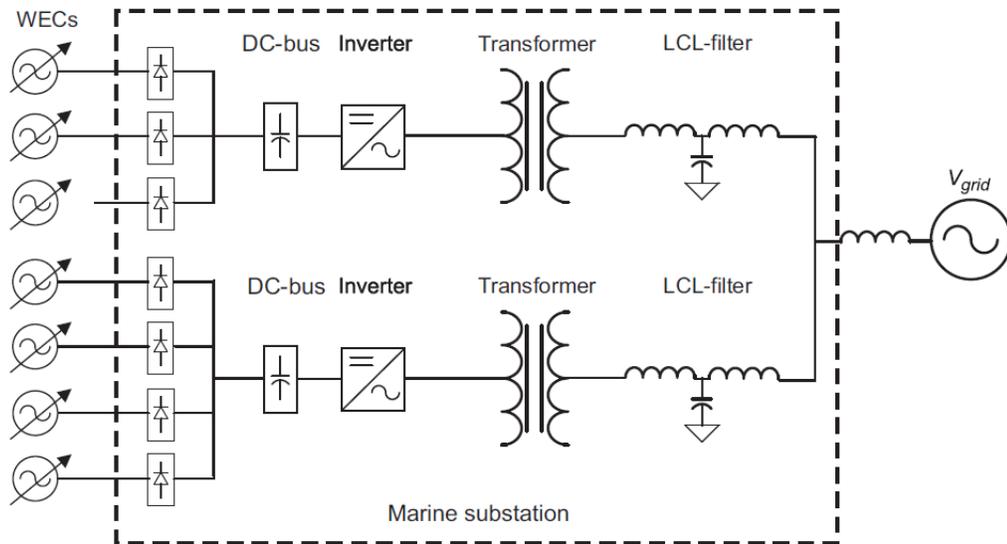


Figura 3.2.18: Diagrama de componentes de la subestación marítima. [25]

El diseño expuesto en la Figura 3.2.18 es aplicable cuando la instalación del parque undimotriz con unidades Power Buoy es instalado a una distancia aproximada de 8 kilómetros del borde costero, donde existan profundidades marinas de entre 40 y 60 metros. Dada las características particulares del sitio en estudio del presente trabajo es posible realizar dicha instalación sólo a decenas de metros de la costa, situación que resulta altamente ventajosa y que permite prescindir de instalar una subestación eléctrica sumergida en el mar, siendo factible su instalación en tierra reduciendo el costo de equipamiento, mantención y operación de este sin que esto implique mayores pérdidas en la transmisión de energía hasta el punto de conexión a la red eléctrica.

### 3.2.4 Boya con referencia móvil

En esta categoría destaca el convertidor de energía Pelamis, desarrollado en Escocia. Consiste en cuatro cilindros articulados de 3,5 metros de diámetro y 30 metros de largo que corresponden a los flotadores y tres cilindros articulados de igual diámetro, pero de 5 metros de longitud que corresponden a las unidades generadoras de energía. La estructura semi sumergida se instala con su eje orientado paralelamente a la dirección del oleaje, el sistema requiere un sistema de anclaje para evitar que se vaya a la deriva, pero sin evitar que oscile libremente para generar energía, el dispositivo completo alcanza un largo de 140 o 150 metros. [12], [26]



Figura 3.2.19: Parque Undimotriz formado por unidades Pelamis. [27]

Si bien la empresa Pelamis Wave Power Ltd. cerró sus operaciones en noviembre de 2014, por la falta de financiamiento y escasa comercialización de sus proyectos [28], es interesante analizar el comportamiento de este dispositivo undimotriz debido a que logra un alto desarrollo, logrando comercializarse en Escocia y Portugal.

La generación de energía se produce al generarse movimiento en las partes articuladas acciona el sistema hidráulico que actúa finalmente sobre un generador eléctrico. El sistema hidráulico es capaz de convertir en energía tanto el movimiento vertical como horizontal de los ejes articulados. Este sistema se encuentra anclado al fondo marino sin que se impida su libre oscilación en función de las características del oleaje presente. [2]

La Figura 3.2.20 y Figura 3.2.21 muestran el interior del dispositivo y su sistema de conversión de energía en base a acumuladores hidráulicos encargados de hacer que el flujo de energía hacia el generador eléctrico sea más suave y estable que la energía proveniente directamente del oleaje. [2], [29]

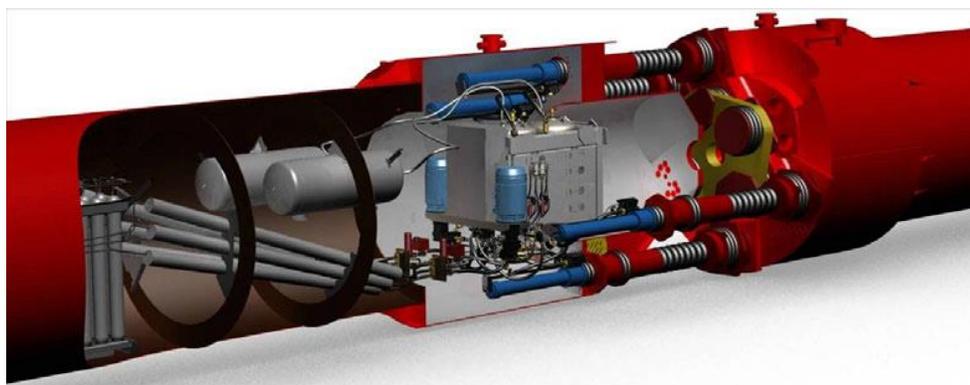


Figura 3.2.20: Sistema de articulación Pelamis. [29]

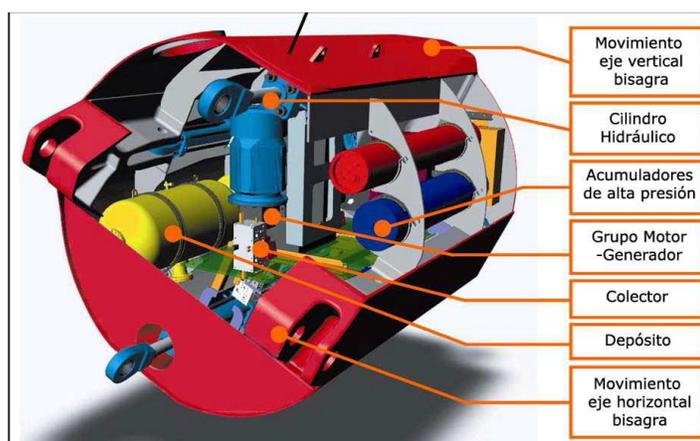


Figura 3.2.21: Sistema de conversión Pelamis. [26]

- **Matriz de potencia de la Central Pelamis**

Para analizar el comportamiento de la central Pelamis se considera la matriz de potencia característica del dispositivo, a través de ella es posible predecir el comportamiento en mares con oleajes con parámetros típicos de la costa chilena. La Matriz de Potencia se muestra en la Tabla 3.2.4.

Los valores de potencia de salida expresados en kW corresponden a la potencia generada por un dispositivo de capacidad nominal de 750 [kW] compuesto por 3 módulos de generación de 250 [kW]. La matriz permite determinar la potencia generada para distintas condiciones de oleaje determinadas por el período de la ola y la altura significativa de esta.

Tabla 3.2.4: Matriz de Potencia Pelamis. [12]

		Periodo Peak Tp [S]																	
		5,6	6,1	6,7	7,2	7,8	8,3	8,9	9,4	10,0	10,6	11,1	11,7	12,2	12,8	13,3	13,9	14,4	
Período de Ola Significativa Hs [m]	1,0	-	22	29	34	37	38	38	37	35	32	29	26	23	21	-	-	-	
	1,5	32	50	65	76	83	86	86	83	78	72	65	59	53	47	42	37	33	
	2,0	57	88	115	136	148	153	152	147	138	127	116	104	93	83	74	66	59	
	2,5	89	138	180	212	231	238	238	230	216	199	181	163	146	130	116	103	92	
	3,0	129	198	260	305	332	340	332	315	292	266	240	219	210	188	167	149	132	
	3,5	-	270	354	415	438	440	424	404	377	362	326	292	260	230	215	202	180	
	4,0	-	-	462	502	540	546	530	499	475	429	384	366	339	301	267	237	213	
	4,5	-	-	544	635	642	648	628	590	562	528	473	432	382	356	338	300	266	
	5,0	-	-	-	739	726	731	707	687	670	607	557	521	472	417	369	348	328	
	5,5	-	-	-	750	750	750	750	750	737	667	658	586	530	496	446	395	355	
	6,0	-	-	-	-	750	750	750	750	750	750	711	633	619	558	512	470	415	
	6,5	-	-	-	-	750	750	750	750	750	750	750	743	658	621	579	512	481	
	7,0	-	-	-	-	-	750	750	750	750	750	750	750	750	750	676	613	584	525
	7,5	-	-	-	-	-	-	750	750	750	750	750	750	750	750	750	686	622	593
	8,0	-	-	-	-	-	-	-	750	750	750	750	750	750	750	750	750	690	625

La matriz de potencia de la Central Pelamis, muestra un desempeño óptimo para oleajes con parámetros entre 6,5 y 10 segundos de período y 4,5 y 6 metros de altura, muy lejanos a los parámetros del oleaje en la costa de Chile que se caracterizan por un período promedio de 13 segundos y una altura entre 2,5 y 3 metros. El Gráfico 3.2.9 muestra la variación en la potencia generada en función del período de las olas para la central Pelamis para una altura significativa del oleaje de 3 metros.

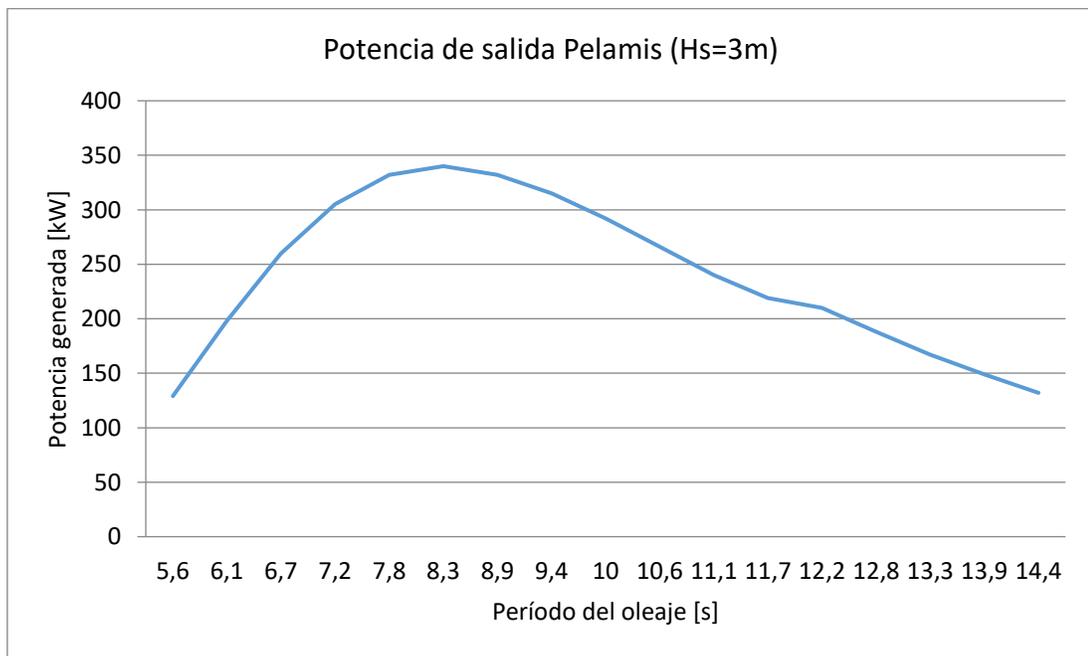


Gráfico 3.2.9: Variación de la potencia de salida según período del oleaje. [Elab. Propia]

De acuerdo a lo indicado por el fabricante, Pelamis ofrece un mejor desempeño cuando la estructura coincide con el perfil de oleaje incidente, esto implica que las dimensiones físicas de cada brazo articulado de la central deben tener relación directa tanto con la amplitud del oleaje como con el período de la ola, la Figura 3.2.22 muestra las diferencias en el comportamiento oscilatorio de la Central Pelamis ante distintos perfiles de oleaje.

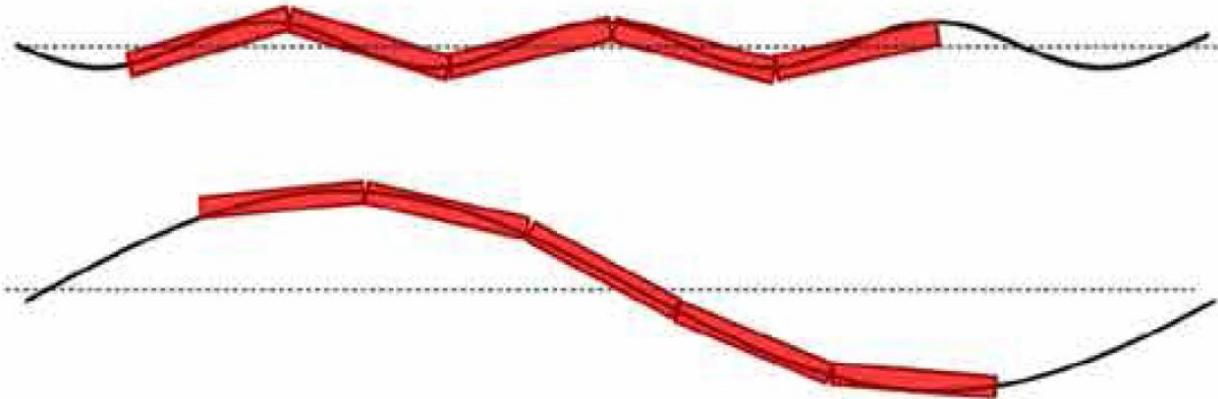


Figura 3.2.22: Diferencias en la oscilación de Pelamis según parámetros de oleaje. [30]

- **Conversión a energía eléctrica**

El proceso de conversión a energía eléctrica comienza con la conversión primaria, que corresponde a transformar la energía del oleaje incidente en el dispositivo en energía neumática, se realiza con la oscilación de los brazos articulados o cilindro hidráulico que mueven el fluido de trabajo o aceite contenido en los depósitos, el que es bombeado a los acumuladores de alta presión, esto independiente si el sistema oscila en dirección vertical u horizontal. Desde el acumulador de alta presión fluye el fluido hasta el grupo motor-generador, fluido que se descarga en el depósito o tanque de almacenamiento de baja presión, desde donde vuelve al cilindro hidráulico para repetir el proceso. [12], [29]

El acumulador permite almacenar una gran cantidad de energía en un corto plazo, permitiendo liberar esta energía de manera gradual y continua en el motor hidráulico acoplado al generador, de esta manera es posible que la energía absorbida caracterizada por su variabilidad temporal sea transformada de manera constante al eje del generador eléctrico, que corresponde a un generador de inducción. Pudiendo el sistema hidráulico absorber potencias hasta 10 veces más grandes que las generadas por el dispositivo. [12], [29]

Un parque undimotriz con este tipo de tecnología requiere ser instalado a unos 5 o 10 kilómetros del borde costero, donde sea posible encontrar profundidades del mar de entre 40 y 60 metros, no obstante, y considerando lo mencionado en este trabajo referente a las condiciones de oleaje presentes en la localidad de Laguna Verde es posible la instalación del parque cercano al borde costero dado que en esa zona los parámetros del oleaje se asemejan a los presentes en aguas profundas.

La Figura 3.2.23 muestra una central undimotriz conformada por 20 unidades Pelamis conectadas a través de un cable submarino a una subestación eléctrica la cual se conecta a la red de distribución eléctrica.

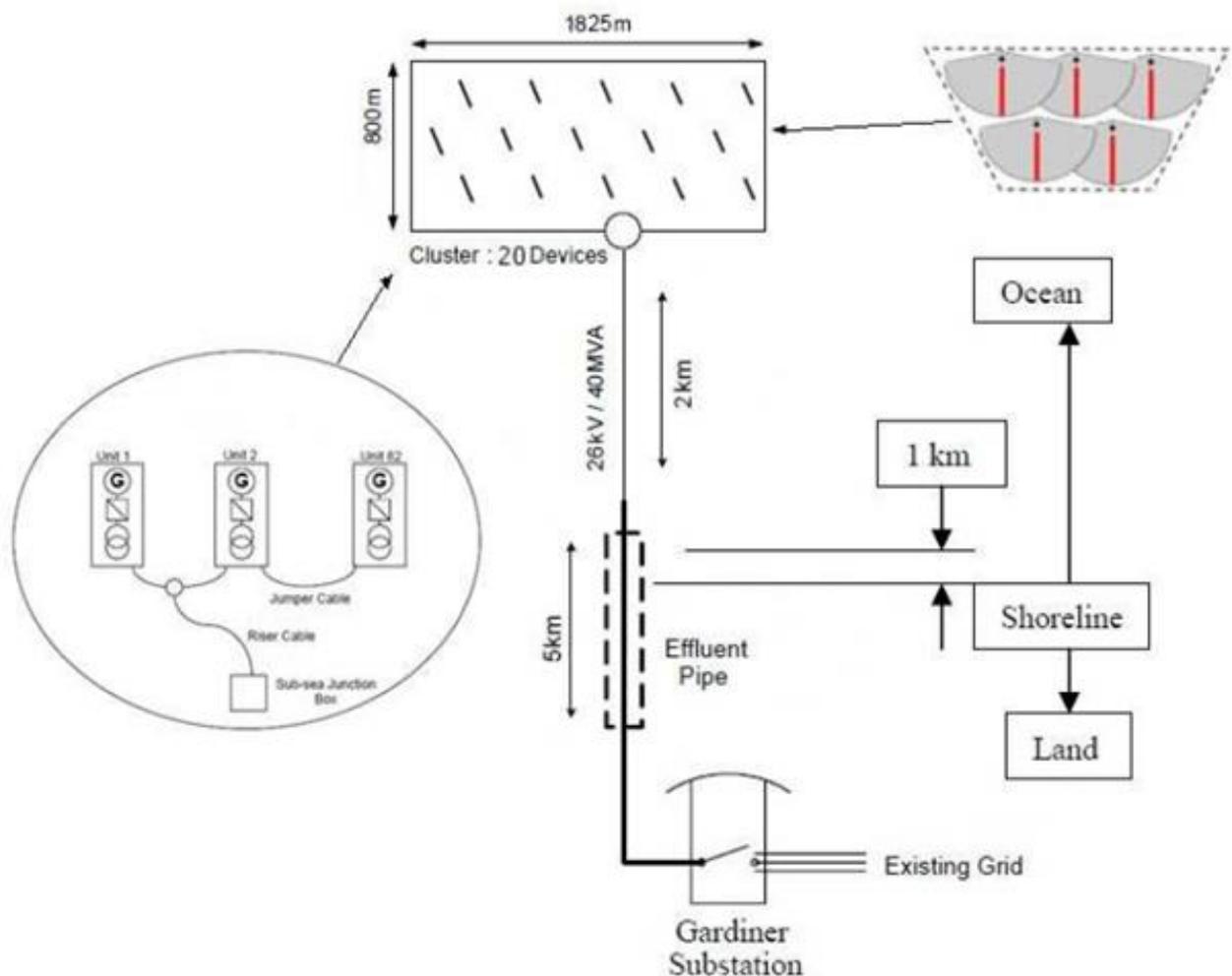


Figura 3.2.23: Parque undimotriz Pelamis conectado a la red de distribución. [12]

### 3.2.5 Rebosamiento

El sistema basado en esta técnica de extracción corresponde al Wave Dragon, desarrollado por la compañía Wave Dragon ApS, de origen danés. Consiste en un dispositivo elevado entre 2 y 3 metros sobre el nivel del mar, formado por un reflector de dos brazos que concentra el oleaje hacia una rampa, estos reflectores permiten incrementar la altura de las olas aumentando con ello la energía capturada hasta en un 70%. Esta rampa permite conducir el oleaje a un dispositivo de mayor altura con un desagüe y un conjunto de turbinas Kaplan de baja presión. [31], [32]

La Figura 3.2.24 muestra el receptor parabólico, encargado de orientar el oleaje hacia la rampa. El desarrollo de este diseño data de 1998 a partir de modelos numéricos y simulaciones en tanques experimentales, las mejoras al diseño se centran en el reflector y sección transversal de la rampa.

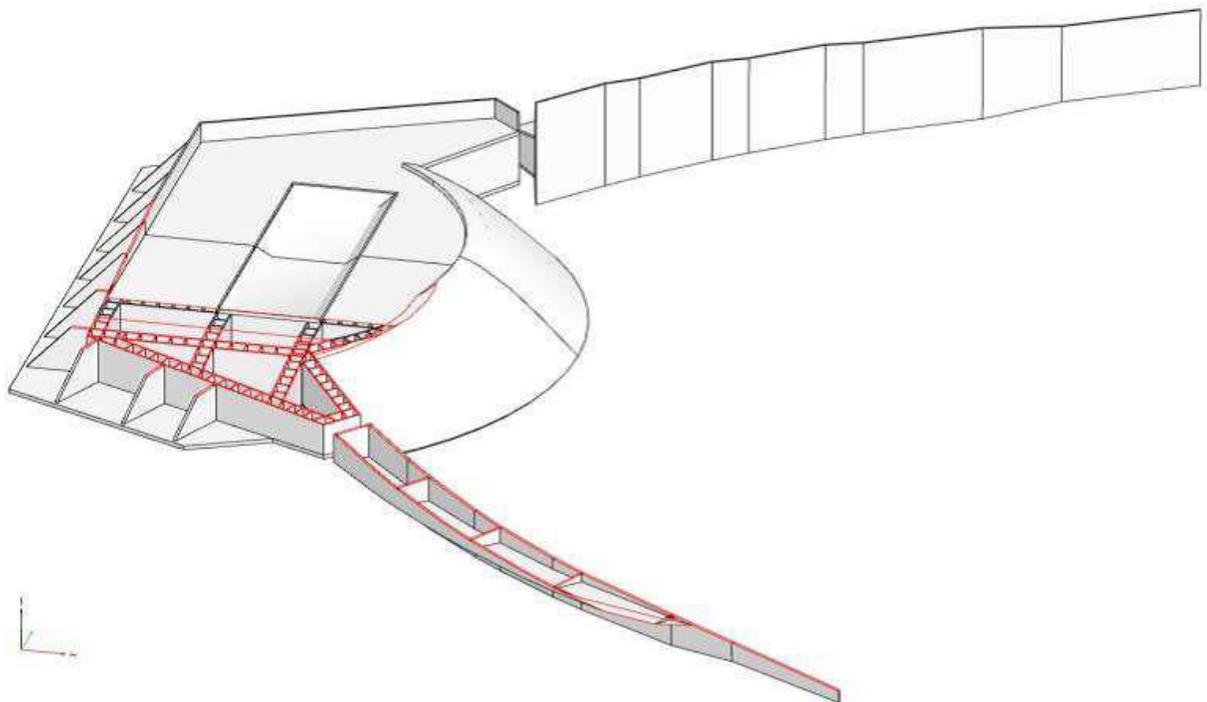


Figura 3.2.24: Modelo 3D de la central Wave Dragon. [32]

El corte transversal de la Figura 3.2.25 permite visualizar el sector donde se receptiona el oleaje, este acciona las turbinas al descender el agua producto de la gravedad a través del receptáculo.

La Figura 3.2.26 muestra los niveles mínimo y máximo que permiten la operación en los rangos de diseño de la central.

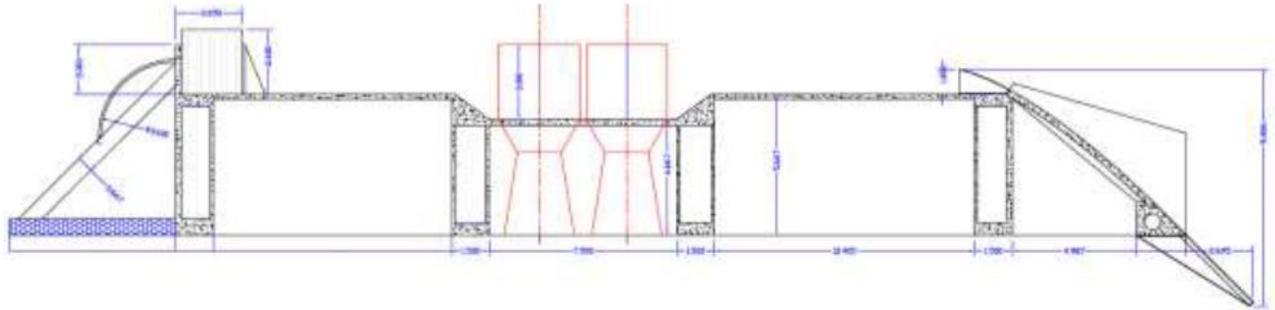


Figura 3.2.25: Corte transversal de la central Wave Dragon. [32]

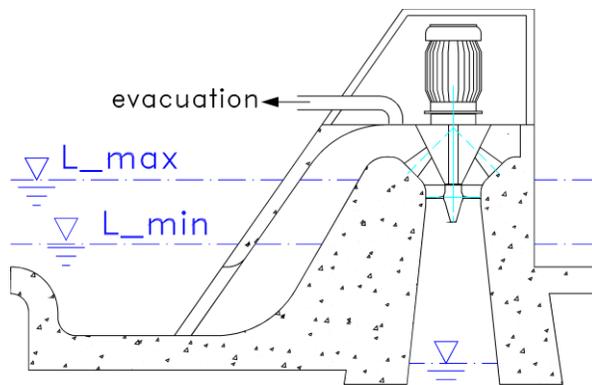


Figura 3.2.26: Niveles de trabajo en el receptor de la central Wave Dragon. [31]

Respecto a otros dispositivos de extracción de energía de las olas, Wave Dragon genera la energía directamente a partir del agua que circula a través de las turbinas sin necesidad de elementos adicionales o pasos intermedios de conversión, permitiendo reducir costos de operación y mantenimiento.

El generador acoplado a la turbina corresponde a un generador síncrono de imanes permanentes, cada unidad Wave Dragon contempla el uso de múltiples generadores los que pueden operar individualmente controlados por un inversor, la Figura 3.2.27 muestra la relación entre la turbina y un operario para dimensionar el tamaño de la turbina que se utiliza en la central.

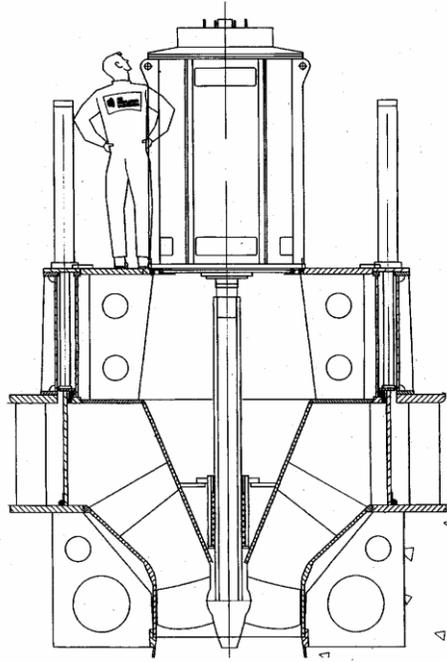


Figura 3.2.27: Corte transversal de la turbina en la central Wave Dragon. [31]

- **Matriz de potencia de la Central Wave Dragon**

Aunque el principio de funcionamiento se base en las descargas del oleaje sobre un receptáculo a través de la rampa, el diseño óptimo contempla un flujo determinado de agua que debe circular para extraer el máximo de energía de las turbinas. El flujo óptimo está dado por los parámetros del oleaje incidente de manera de alcanzar el nivel requerido en el receptor dado por la altura del oleaje y la periodicidad necesaria para una generación continua de energía.

Lo anterior se resume en la matriz característica del generador Wave Dragon, que muestra la potencia de salida en función de los parámetros de oleaje existentes. La Tabla 3.2.5, muestra la potencia generada para diferentes tipos de oleaje, en particular los presentes en el sitio en estudio caracterizados por un período de 13 segundos y altura de 2,5 metros.

El Gráfico 3.2.10 compara las curvas de generación para dos alturas de oleaje, 2,5 metros que corresponde a la altura significativa del oleaje observado en la costa chilena y 5 metros que corresponde a la altura del oleaje a partir del cual se obtiene un máximo rendimiento del generador. Para un período de 13 segundos, característico del sitio en estudio, se tiene una potencia de salida de aproximadamente un tercio al valor nominal de la central Wave Dragon.

Tabla 3.2.5: Matriz de potencia Wave Dragon.

		Período																				
		4,0	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0	7,5	8,0	8,5	9,0	9,5	10,0	10,5	11,0	11,5	12,0	12,5	13,0	13,5	14,0
Altura significativa	1,0	203	276	348	432	516	608	699	798	896	925	953	958	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	983	1191	1398	1626	1853	1941	2029	2061	2092	2063	2034	1939	1844	1677	1509	1269	1028
	2,5	1123	1123	1123	1213	1304	1609	1914	2258	2602	2752	2903	2972	3041	3017	2993	2868	2743	2504	2266	1910	1555
	3,0	1624	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	4926	4845	4765	4374	3983	3372	2761
	4,0	3538	3538	3538	3538	3538	3538	3538	4285	5032	5424	5816	5858	5900	5900	5900	5895	5889	5416	4943	4191	3439
	4,5	4719	4719	4719	4719	4719	4719	4719	5093	5466	5662	5858	5879	5900	5900	5900	5897	5895	5658	5422	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
	6,0	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
	7,0	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
	8,0	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900	5900

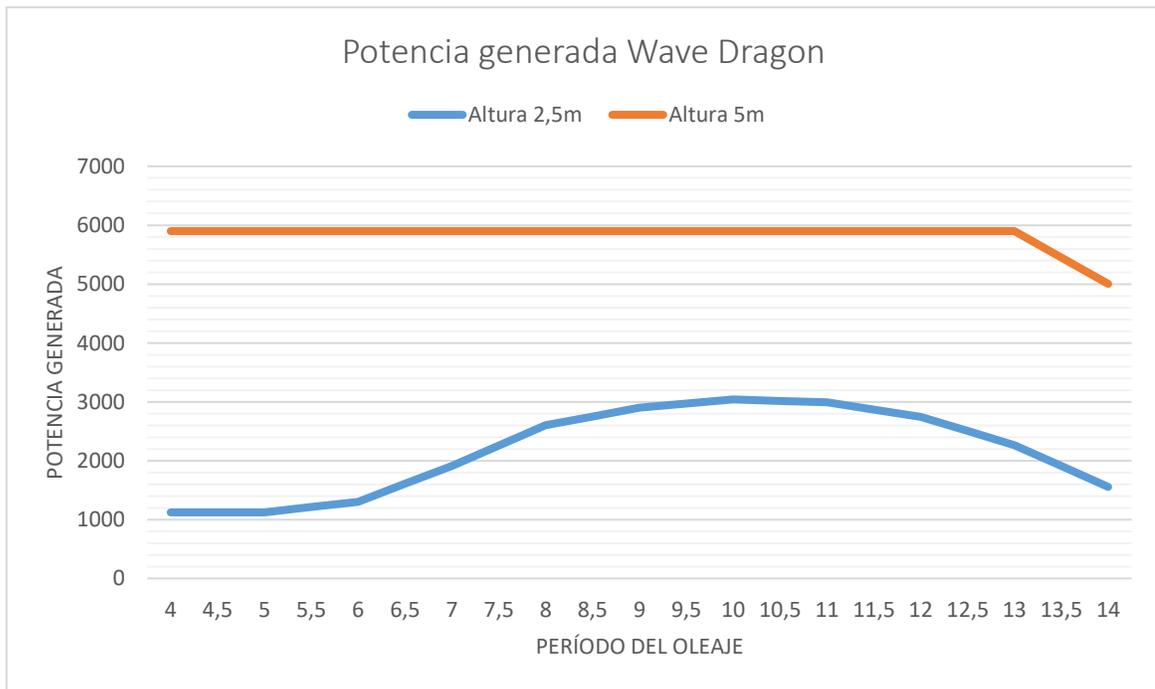


Gráfico 3.2.10: Comparación de potencia de salida para oleajes de 2,5 y 5 metros. [Elab. Propia]

### 3.3 Resumen del capítulo

El desempeño de cualquier dispositivo de generación de energía de las olas está condicionado, por diversos factores uno de ellos, es el clima de oleaje incidente caracterizado por los parámetros de las olas como altura y período que permiten determinar la potencia incidente por frente de ola. Pero otro factor tan importante es el diseño del generador undimotriz, que permita optimizar la extracción de energía presente en el oleaje.

Los generadores analizados corresponden a distintos principios de generación, de distintas potencias nominales, pero independiente de estas variables la respuesta que ofrece cada uno están directamente relacionadas a la geometría de los dispositivos, cuyo diseño está optimizado para oleajes de parámetros muy distintos a los presentes en la costa chilena, condicionando la potencia eléctrica generada al factor de captura o la potencia obtenida a través de la matriz característica de cada generador.

Lo anterior limita el rendimiento del generador cuyo diseño se basa en condiciones de operación presentes en los países en los cuales se han desarrollado cada una de las tecnologías expuestas en este trabajo.

# 4 Marco regulatorio y comercialización de energía

---

## 4.1 Incentivo a las ERNC

El marco regulatorio define al Estado chileno como un ente regulador, que hasta la promulgación de la Ley 19.940 de 2004, conocida como Ley Corta I, que modifica la Ley General de Servicios Eléctrico DFL de 1982 y que estable incentivos a la conexión de medios de generación cuya fuente no sea convencional, cuyos excedentes de potencia suministrada al sistema sea inferior a 20 [MW], estarán exceptuados del pago total de peajes por el uso que las inyecciones de los medios de generación hacen de los sistemas de transmisión troncal cuando la potencia suministrada sea hasta 9 [MW] o de una porción de los peajes para sistemas por sobre los 9 [MW].

Por otra parte, se indica que los concesionarios de servicio público de distribución de electricidad y empresas que posean líneas de distribución de energía eléctrica que utilicen bienes nacionales de uso público, deberán permitir la conexión de los medios de generación cuyos excedentes de potencia suministrables al sistema no superen los 9 [MW].

Otra ley que impacta positivamente a la diversificación de la matriz energética hacia fuentes renovables no convencionales es la Ley 20.257 o Ley ERNC promulgada el año 2008, modificada a través de la Ley 20.698 o Ley 20/25 el año 2013, que introduce modificaciones a la Ley General de Servicios Eléctricos y que obliga a las empresas cuyos retiros de energía desde los sistemas eléctricos con capacidades instaladas superior a 200 [MW], deberán acreditar ante la Dirección del Peajes del CDEC, que el equivalente al 10% de la energía retirada en cada año haya sido inyectada por medios de generación renovables no convencionales, ya sea propios o contratados.

Para dispositivos de hasta 100 [kW] que deseen conectarse a la red de distribución en baja tensión, entro en vigencia el 22 de octubre de 2014 la Ley 20.571 o Ley de Generación Distribuida, que permite a los clientes de las empresas distribuidoras generar su propia energía, para autoconsumo o venta de excedentes. Para acceder a los beneficios de esta Ley, se debe cumplir lo indicado en el Reglamento DS N°71, Norma Técnica de Conexión y Operación de Equipamiento

en Baja Tensión, la Resolución de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles (SEC) N°5308: Autorización de Equipamiento y el Procedimiento de Comunicación de Puesta en Servicio de Generadores Residenciales.

## 4.2 Procedimiento de conexión de un PMGD

Respecto a la conexión de la Central de Undimotriz al sistema de distribución (SD), prevalece lo indicado en la Norma Técnica de Conexión y Operación de PMGD en Instalaciones de Media Tensión. En dicho documento se detallan y especifican las exigencias que deben cumplir tanto el interesado como el dueño de la instalación o empresa concesionaria. Además de los criterios para determinar el punto de conexión del PMGD y los antecedentes requeridos en la Solicitud de Conexión a la Red de Media Tensión de un SD (SCR). Finalmente, en dicha Norma Técnica se indica el protocolo de puesta en servicio e inicio de operación.

## 4.3 Ingresos por venta de energía y potencia instalada

La principal ventaja a la que acceden los PMGD en términos de comercialización de energía, según el privilegio otorgado por la Ley 19.940 (Ley Corta I), es acceder a recibir como remuneración por la inyección de su energía un régimen de precio estabilizado, el Precio Nudo de Energía de Corto Plazo, calculado semestralmente por la Comisión Nacional de Energía (CNE) en base a la siguiente fórmula:

$$\text{Precio Básico Energía}_{\text{NUDO REFERENCIA}} = \frac{\sum_{i=1}^{48} \frac{CMg_{Nref,i} \cdot E_{Nref,i}}{(1+r)^{i-1}}}{\sum_{i=1}^{48} \frac{E_{Nref,i}}{(1+r)^{i-1}}}$$

Donde:

$N_{ref}$  : Nudo troncal definido como Subestación Básica de Energía para el Precio de Nudo Básico de la Energía, Quillota 220 kV.

$CMg_{Nref}$  : Costo Marginal-Mensual en el mes  $i$  en la Subestación Básica de Energía.

$E_{Nref,i}$  : Energía Mensual en el mes  $i$  asociada a la Subestación Básica de Energía.

$i$  : Mes  $i$ -ésimo del año.

$r$  : Tasa de descuento mensual, equivalente a 10% anual.

En otros términos, este precio corresponde al valor presente descontado a una tasa del 10% de los Costos Marginales proyectados por la CNE en una ventana móvil de tiempo de 4 años.

Dicho precio es posteriormente ajustado por una banda de precios que refleja las negociaciones bilaterales de precios (Clientes Libres y Licitaciones de Suministro para clientes regulados). La principal ventaja de este esquema es que dada su periodicidad bianual (semestral) y la banda que mantiene los precios en un rango acotado, hacen del Precio Nudo de Corto Plazo un índice de precio muy estable, característica muy valorada por la banca y que permita el financiamiento de este tipo de iniciativas en modalidad de “Financiamiento de Proyecto”, en términos simples (pues no es el objetivo principal de este trabajo), que el proyecto PMGD se financie principalmente con sus propios ingresos dada la gran estabilidad que posee esta señal de precio.

El Gráfico 4.3.1 muestra la evolución de 1987 a 2017 del Precio Nudo de Corto Plazo, junto con el costo marginal del nudo Polpaico 220 kV, que puede ser considerado referencial para el centro de carga del sistema.

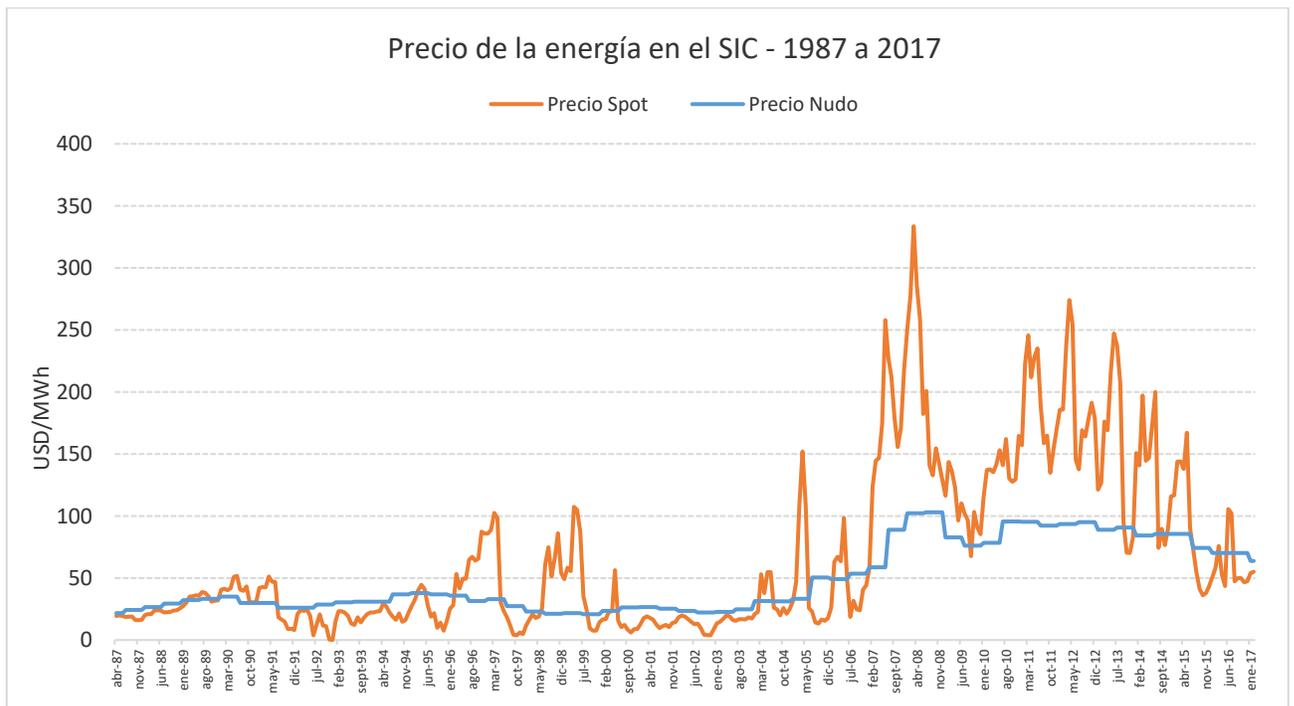


Gráfico 4.3.1: Variación precio de la energía en el SIC, período 1987-2017. [Elab. Propia]

Del Gráfico 4.3.1, se aprecia la gran estabilidad en comparación con el Costo Marginal Promedio mensual que presenta el precio nudo, dicha estabilidad resaltaría aún más, si los precios graficados hubiesen sido horarios. A modo de referencia, a enero de 2017 el Precio Nudo alcanza un valor de alrededor de 64 US\$/MWh, la volatilidad del Precio Spot en el período alcanzó un valor de 99%, mientras que el Precio Estabilizado fue de 56%.

Cabe destacar que en virtud de las últimas modificaciones introducidas al Reglamento que rige los PMGD, estos proyectos participan en el Balance de Inyecciones y Retiros de Energía y Potencia entre los coordinados por el CDEC. Las diferencias entre el costo marginal horario instantáneo y el precio estabilizado es sociabilizado en el resto de los coordinados.

Por su parte el precio de la potencia es calculado igual que para el resto de los medios de generación, las inyecciones de potencia se valorizan al precio instantáneo de la potencia que corresponde al precio nudo de la potencia valorizado en la barra de inyección. De todas maneras, este es un ingreso de menor envergadura para este tipo de proyectos, en vista que la potencia de suficiencia inicial reconocida es del orden del 25% a 40% de la potencia nominal (relacionado al factor de planta de la central).

Para finalizar, es destacable indicar que la opción de inyectar energía a precio estabilizado no excluye la opción de que el PMGD pueda firmar compromisos bilaterales con clientes libres o bien participar de las licitaciones de suministro de clientes regulados, toda vez que dichos compromisos financieros serán reconocidos en el Balance del CDEC correspondiente mencionado anteriormente.

# 5 Evaluación de tecnologías en la costa chilena

---

En este capítulo se analizará el comportamiento de las cinco centrales de generación de energía undimotriz basados en distintos principios de operación definidos en el Capítulo 3. Para lo anterior se requiere previamente definir la ubicación, esto se realizará tomando en cuenta lo expuesto en el Capítulo 2, referente a las características del oleaje en la costa chilena de manera de maximizar la energía capaz de extraer.

Posteriormente se analizarán los costos de inversión para un parque undimotriz dimensionado en función de la capacidad de la red de distribución existente, de manera de determinar la factibilidad económica que cada tecnología pueda ofrecer. Finalmente se indicarán los incentivos a la incorporación de estos tipos de Medios de Generación a las redes de distribución eléctrica.

## 5.1 Ubicación de la central de energía de las olas

Como ya se ha mencionado, conforme las olas se aproximan a la costa comienzan a verse afectadas por la influencia del fondo marino y en general por la geografía presente, se debe considerar que los cálculos y estimaciones de la energía de las olas son hechas mar adentro, en aguas profundas; sin considerar influencias del borde costero por lo que al momento de cuantificar la energía cercana a la costa se deben considerar estos efectos.

Como criterio de elección de la ubicación de la Central Undimotriz, se considera:

- Alto potencial energético.
- Baja variabilidad temporal en la potencia incidente.
- Disponibilidad de información respecto a energía del oleaje en el sector.
- Información de batimetría del sector.
- Cercanía de redes de distribución y/o lugares de consumo.
- Accesibilidad a través de vías y caminos.

Tomando en cuenta que la zona que presenta una mayor uniformidad tanto estacional como diaria de la energía undimotriz es la zona central, se utilizarán los parámetros de oleaje y estimaciones correspondientes al litoral de la región de Valparaíso, particularmente el sector de Laguna Verde cuyo potencial energético es en promedio de 40 [kW/m] a 10 metros de profundidad y que presenta un coeficiente de transferencia de oleaje de 0,99 respecto a oleaje en aguas profundas. Esto quiere decir que dadas las condiciones de batimetría del sector es posible obtener prácticamente la misma potencia incidente por frente de ola junto al borde costero que en aguas con profundidades por sobre los 50 metros.

Respecto a la batimetría del fondo marino, la Figura 5.1.1 muestra las características del sector escogido en la que se observa que junto al borde costero la profundidad del mar varía desde los 10 metros junto a la línea de la costa hasta los 50 metros en una corta distancia, dándole a este sector características que permiten el desempeño de generadores undimotrices equivalente al que tendrían operando a distancias mayores de la costa, lo que se traduce en un ahorro por concepto de tendido eléctrico submarino.

De la Figura 5.1.1 también es posible inferir que no existen fenómenos de difracción, dado que no existe una barrera que impida el desplazamiento de las olas antes de llegar a la costa. Por otro lado, es posible aprovechar la reflexión de las olas sobre el borde costero captando una mayor altura de las olas a través del OWC.



Figura 5.1.1: Batimetría del borde costero de interés. [33]

## 5.2 Características de la red de distribución

### 5.2.1 Red de distribución a conectar el PMGD

El perfil de demanda de la red en estudio es bajo considerando las características de los consumos, además de acuerdo a información obtenida del Sistema de Infraestructura Eléctrica de la Superintendencia de Electricidad y Combustibles [34], se obtienen la capacidad de los transformadores y características de las líneas de distribución que permiten representar la red y realizar las simulaciones requeridas para determinar el impacto en la red ante la conexión del PMGD. Los parámetros de la línea de distribución en el punto de conexión son los que se indican en la Tabla 5.2.1, las características técnicas respecto a la capacidad de transporte y resistencia mecánica se muestran en la Tabla 5.2.2.

Tabla 5.2.1: Características conductor eléctrico en el punto de conexión. [34]

Parámetros Conductor	
Material	Cobre
Aislación	Desnudo
Instalación	Aéreo
Clase	15 kV
Construcción	Alambre
N° de fases	Trifásico sin neutro
Sección	16 mm <sup>2</sup>

Tabla 5.2.2: Características eléctricas y mecánicas conductor eléctrico. [35]

Especificaciones Conductor	
Resistencia a 20 °C	1,07 Ohm/km
Peso	148,99 kg/km
Capacidad de corriente	155 A

Capacidad de transporte calculada a 40°C de temperatura ambiente y 80°C de temperatura de servicio del conductor. [35]

La Figura 5.2.1 muestra el trazado de la red de media tensión existente, corresponde a una red trifásica rural de tipo radial, la tensión de servicio es de 12 [kV], los consumos típicos alimentados por esta red corresponden a consumos mayoritariamente domiciliarios.



Figura 5.2.1: Red de distribución en MT, sector Laguna Verde. [34]

## 5.2.2 Verificación de la capacidad de diseño del alimentador

La potencia máxima capaz de transmitir a través del alimentador de la red de distribución o capacidad de diseño, considerando un factor de potencia de 0,93 es de:

$$Cap_{diseño} = \sqrt{3} \cdot V \cdot I \cdot fp$$

Donde:

$Cap_{diseño}$ : Potencia máxima que puede transmitir una sección de línea de distribución sin superar sus límites térmicos a inyectar [MW].

$V$ : Tensión nominal de la red de distribución [V].

$I$ : Capacidad nominal de transporte del alimentador [I].

$fp$ : Factor de potencia.

Por lo tanto, la capacidad de diseño del alimentador será:

$$Cap_{diseño} = 1,73 \cdot 12 \cdot 155 \cdot 0,93 [MW]$$

$$Cap_{diseño} = 3 [MW]$$

La potencia máxima a inyectar por el PMGD debe cumplir lo indicado en el Artículo 2-12 de la Norma Técnica de Conexión y Operación de PMGD en Instalaciones de Media Tensión

(NTCO) y se expresa en la siguiente relación:

$$PMI = 0,85 \cdot Cap_{diseño}$$

Donde:

*PMI*: Potencia máxima a inyectar por el PMGD [MW].

Por lo tanto, la capacidad máxima a inyectar será de:

$$PMI = 0,85 \cdot 3 [MW]$$

$$PMI = 2,55 [MW]$$

## 5.3 Producción de energía y potencia del parque undimotriz

### 5.3.1 Estimación de generación de energía eléctrica por cada dispositivo

De acuerdo a las características de cada dispositivo, indicadas en el Capítulo 3 se obtiene la potencia de salida para los cinco prototipos estudiados, estos valores corresponden a una estimación media diaria para cada mes del año a intervalos de tres horas, a continuación, se indica la producción de energía diaria, obtenida a partir de la siguiente relación.

$$E_{dia} = \sum_{i=0}^8 P_i \cdot \Delta t$$

Donde:

$E_{dia}$  : Energía diaria generada en [kWh].

$P_i$  : Potencia extraída del dispositivo según matriz característica en función de la altura y período de la ola en dicho instante [kW].

$\Delta t$  : Intervalo de tiempo entre mediciones de energía [h], en este caso 3 horas.

De los valores obtenidos en el punto anterior, se tiene que la energía anual generada por cada uno de los dispositivos corresponde a:

$$E_{anual} = \sum_{i=1}^{12} E_i$$

Donde:

$E_{\text{anual}}$ : Energía anual generada en [kWh]

$E_i$ : Energía mensual en el mes  $i$  en [kWh]

- Central OWC (modelo Limpet)

La energía diaria producida por una central OWC similar al modelo Limpet compuesta por dos turbinas de 250 [kW], operando bajo el clima de oleaje del sector de Laguna Verde en Valparaíso se muestra en la Tabla 5.3.1.

Tabla 5.3.1: Energía producida en [kWh]. [Elab. Propia]

HORA	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
0:00	104,45	110,78	121,92	141,05	123,88	139,62	132,18	110,72	132,30	142,88	94,50	104,69
3:00	105,03	110,79	122,47	140,83	123,66	140,16	131,44	111,15	132,02	142,73	94,40	105,01
6:00	102,53	108,82	120,99	139,82	123,39	140,21	130,80	111,45	131,40	142,16	93,72	103,55
9:00	99,65	106,75	118,90	139,08	123,27	139,76	130,66	111,51	130,75	141,71	92,90	101,76
12:00	96,78	104,79	116,61	138,77	123,03	138,80	130,61	111,07	129,98	141,31	91,98	99,71
15:00	94,29	103,41	114,96	139,33	123,09	138,19	131,06	110,78	129,64	141,48	91,25	97,78
18:00	95,50	104,07	115,57	140,57	123,39	138,14	131,86	110,90	129,71	142,28	91,57	98,53
21:00	100,17	106,91	118,20	142,07	123,63	138,46	132,50	111,19	129,84	143,19	92,73	101,91
E diaria	798,4	856,3	949,6	1.121,5	987,3	1.113,3	1.051,1	888,8	1.045,6	1.137,7	743,1	812,9
E mensual	24.750,5	23.976,6	29.438,7	33.646,1	30.607,4	33.399,9	32.584,4	27.551,9	31.369,4	35.269,7	22.291,6	25.201,1

- Central Archimides Wave Swing (AWS)

La energía diaria producida por una central Archimides Wave Swing compuesta por un generador lineal de 2.000 [kW], operando bajo el clima de oleaje del sector de Laguna Verde en Valparaíso se muestra en la Tabla 5.3.2.

Tabla 5.3.2: Energía producida en [kWh]. [Elab. Propia]

HORA	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
0:00	763,80	808,20	866,40	929,40	848,80	900,60	811,90	725,00	815,60	904,20	662,20	754,70
3:00	754,70	811,90	863,60	929,40	841,40	902,40	811,90	730,70	811,90	904,20	662,20	750,10
6:00	754,70	768,50	826,80	889,10	848,80	902,40	811,90	742,00	811,90	906,00	662,20	750,10
9:00	713,90	768,50	826,80	881,50	863,40	902,40	811,90	736,30	811,90	906,00	662,20	754,70
12:00	725,00	725,00	826,80	889,10	815,50	900,60	811,90	730,70	811,90	906,00	655,80	713,90
15:00	694,80	725,00	782,50	889,10	856,10	855,40	815,60	730,70	815,60	904,20	655,80	719,40
18:00	736,30	730,70	823,10	881,50	848,80	900,60	815,60	730,70	811,90	904,20	655,80	713,90
21:00	768,50	773,20	823,10	921,60	848,80	898,80	815,60	730,70	815,60	906,00	662,20	759,20
E diaria	17.735,1	18.333,0	19.917,3	21.632,1	20.314,8	21.489,6	19.518,9	17.570,4	19.518,9	21.722,4	15.835,2	17.748,0
E mensual	549.788,1	513.324,0	617.436,3	648.963,0	629.758,8	644.688,0	605.085,9	544.682,4	585.567,0	673.394,4	475.056,0	550.188,0

- Generador Power Buoy

La energía diaria producida por una unidad del generador Power Buoy de 250 [kW], operando bajo el clima de oleaje del sector de Laguna Verde en Valparaíso se muestra en la Tabla 5.3.3.

Tabla 5.3.3: Energía producida en [kWh]. [Elab. Propia]

HORA	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
0:00	51,00	55,00	54,60	53,40	47,00	60,60	55,00	45,40	53,00	58,20	45,20	53,44
3:00	53,44	51,00	54,60	53,40	47,00	60,60	53,00	45,40	55,00	58,20	45,20	53,44
6:00	53,44	51,00	49,00	50,20	43,80	60,60	53,00	43,80	55,00	58,20	45,20	55,88
9:00	47,00	51,00	49,00	52,40	42,00	60,60	53,00	45,40	53,00	55,80	45,20	49,32
12:00	43,00	47,00	49,00	50,20	43,80	56,80	53,00	45,40	53,00	54,60	42,00	49,32
15:00	41,60	47,00	47,40	50,20	43,80	59,00	53,00	45,40	53,00	54,60	44,00	47,00
18:00	43,80	43,80	47,40	50,20	47,00	56,80	53,00	45,40	55,00	58,20	45,20	47,00
21:00	47,00	49,20	51,00	53,40	47,00	56,80	53,00	45,40	53,00	58,20	45,20	47,00
E diaria	380,3	395,0	402,0	413,4	361,4	471,8	426,0	361,6	430,0	456,0	357,2	402,4
E mensual	11.788,7	11.060,0	12.462,0	12.402,0	11.203,4	14.154,0	13.206,0	11.209,6	12.900,0	14.136,0	10.716,0	12.474,4

- Generador Pelamis

La energía diaria producida por una unidad Pelamis compuesta por tres generadores de 250 [kW], operando bajo el clima de oleaje del sector de Laguna Verde en Valparaíso se muestra en la Tabla 5.3.4.

Tabla 5.3.4: Energía producida en [kWh]. [Elab. Propia]

HORA	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
0:00	146,48	157,52	151,13	152,00	133,27	170,50	153,88	132,36	150,24	164,00	130,00	153,20
3:00	153,20	157,52	153,97	152,00	135,93	167,00	153,88	129,28	153,88	164,00	130,00	156,27
6:00	153,20	143,12	141,27	142,63	133,27	167,00	153,88	126,20	153,88	161,00	130,00	156,27
9:00	138,52	143,12	141,27	145,47	121,40	167,00	153,88	126,20	153,88	161,00	132,67	141,60
12:00	132,36	132,36	141,27	142,63	121,40	160,72	153,88	129,28	153,88	151,13	132,67	138,52
15:00	118,80	132,36	133,90	142,63	121,40	164,64	150,24	129,28	150,24	153,97	123,07	135,44
18:00	126,20	129,28	143,93	145,47	133,27	160,72	150,24	129,28	153,88	164,00	132,67	138,52
21:00	132,36	143,12	143,93	155,00	133,27	174,00	150,24	129,28	150,24	161,00	130,00	149,84
E diaria	1.101,1	1.138,4	1.150,7	1.177,8	1.033,2	1.331,6	1.220,1	1.031,2	1.220,1	1.280,1	1.041,1	1.169,7
E mensual	34.134,7	31.875,2	35.670,8	35.334,9	32.029,5	39.947,4	37.823,7	31.966,0	36.603,6	39.683,1	31.232,4	36.259,5

- Central Wave Dragon

La energía diaria producida por una central Wave Dragon de 6.000 [kW], operando bajo el clima de oleaje del sector de Laguna Verde en Valparaíso se muestra en la Tabla 5.3.5.

Tabla 5.3.5: Energía producida en [kWh]. [Elab. Propia]

HORA	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
0:00	2568,80	2720,20	2535,50	2366,60	2231,10	2898,40	2663,80	2366,70	2607,30	2774,80	2360,60	2674,10
3:00	2674,10	2720,20	2634,30	2366,60	2287,50	2836,60	2663,80	2316,00	2663,80	2774,80	2360,60	2727,70
6:00	2674,10	2515,20	2400,40	2357,50	2231,10	2836,60	2663,80	2265,40	2663,80	2552,00	2360,60	2727,70
9:00	2466,70	2515,20	2400,40	2416,80	2137,00	2836,60	2663,80	2265,40	2663,80	2552,00	2360,60	2674,10
12:00	2316,00	2366,70	2400,40	2357,50	2051,10	2898,40	2663,80	2316,00	2663,80	2552,00	2408,40	2466,70
15:00	2170,40	2366,70	2354,60	2357,50	2174,60	2812,30	2607,30	2316,00	2607,30	2774,80	2244,80	2417,40
18:00	2265,40	2316,00	2494,40	2357,50	2231,10	2898,40	2607,30	2316,00	2663,80	2774,80	2408,40	2466,70
21:00	2568,80	2515,20	2494,40	2428,40	2231,10	2960,20	2607,30	2316,00	2607,30	2552,00	2360,60	2620,60
E diaria	59.112,9	60.106,2	59.143,2	57.025,2	52.723,8	68.932,5	63.422,7	55.432,5	63.422,7	63.921,6	56.593,8	62.325,0
E mensual	1.832.499	1.682.973	1.833.439	1.710.756	1.634.437	2.067.975	1.966.103	1.718.407	1.902.681	1.981.569	1.697.814	1.932.075

### 5.3.2 Factor de planta

El factor de capacidad neta o factor de planta se obtiene como el cuociente entre la energía generada en un intervalo de tiempo (en este caso anual) y la energía capaz de generar el dispositivo si operara de manera continua a potencia nominal por igual período.

$$f_c = \frac{E_{anual}}{P \cdot h_{año}}$$

Donde:

$f_c$  : Factor de carga.

$P$  : Potencia nominal del prototipo [kW].

$h_{año}$  : Número de horas en un año (8.760 horas).

Para cada dispositivo de generación, los factores de planta se indican en la Tabla 5.3.6.

Tabla 5.3.6: Factor de planta de las unidades undimotrices analizadas. [Elab. Propia]

	Central OWC	Central AWS	Power Buoy	Pelamis	Wave Dragon
Energía anual generada [MWh]	1.540,21	7.171,41	451,71	1.292,24	22.387,03
Energía anual teórica [MWh]	4.380,00	17.520,00	2.190,00	6.570,00	52.560,00
<b>FACTOR DE PLANTA</b>	<b>35,16%</b>	<b>40,93%</b>	<b>20,63%</b>	<b>19,67%</b>	<b>42,59%</b>

El factor de planta determinado para cada dispositivo, operando en la zona definida en el punto 4.1, permite cuantificar lo representado en los gráficos de energía en cuanto a la energía capaz de extraer por cada tecnología en estudio

### 5.3.3 Dimensionamiento del parque de energía undimotriz

Se dimensionará un sistema cuya capacidad instalada será de 6 [MW] (que corresponde a la potencia nominal del dispositivo más grande), con esta consideración los sistemas de generación de energía undimotriz a analizar se muestran en la Tabla 5.3.7.

Tabla 5.3.7: Número de unidades y potencia instalada de cada parque undimotriz. [Elab. Propia.]

TECNOLOGÍA	Central OWC	Central AWS	Power Buoy	Pelamis	Wave Dragon
Potencia por unidad [kW]	500	2.000	250	750	6.000
N° unidades	12	3	24	8	1
Potencia instalada [MW]	6	6	6	6	6
Potencia a inyectar [MW]	2,11	2,46	1,24	1,18	2,55

La potencia a inyectar a la red se determina de acuerdo al factor de planta de cada central y la potencia instalada del parque undimotriz, en todos los casos se cumple con la capacidad máxima de potencia a inyectar, sin necesidad de reforzar el alimentador existente. Tanto la potencia instalada como la potencia máxima a inyectar deben ser declaradas en los formularios requeridos para la tramitación de un PMGD a un sistema de distribución, donde además se debe hacer una predicción de la energía anual generada.

Considerando que es probable que el PMGD ante determinados casos genere mayor potencia a la máxima a inyectar en el alimentador, se debe considerar dentro del esquema de protecciones un equipo que limite la potencia a inyectar a la red de acuerdo a lo definido en el punto 5.2.2 y que corresponde a 2,55 [MW]

### 5.3.4 Energía generada por el parque undimotriz

Considerando la producción unitaria de cada tecnología undimotriz y el número de unidades necesarias para configurar el parque se tiene la producción de energía final, el Gráfico 5.3.1 muestra la energía promedio diaria generada según la tecnología de cada parque y como varía en cada caso, esto debido a la respuesta que ofrece cada dispositivo al oleaje incidente caracterizado por su período y altura.

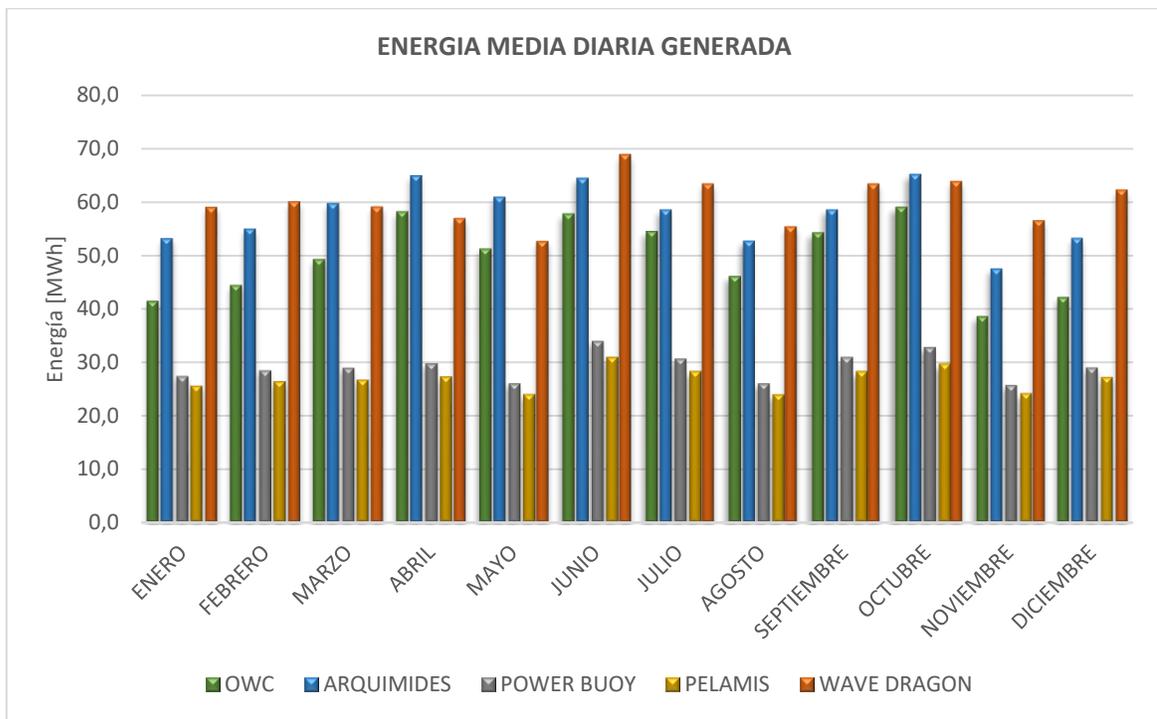


Gráfico 5.3.1: Energía promedio diaria. [Elab. Propia]

Al graficar la energía mensual se observa la tendencia antes señalada, donde para igual potencia instalada se obtienen grandes diferencias en la energía generada, dependiendo del principio de funcionamiento de cada central, Gráfico 5.3.2.

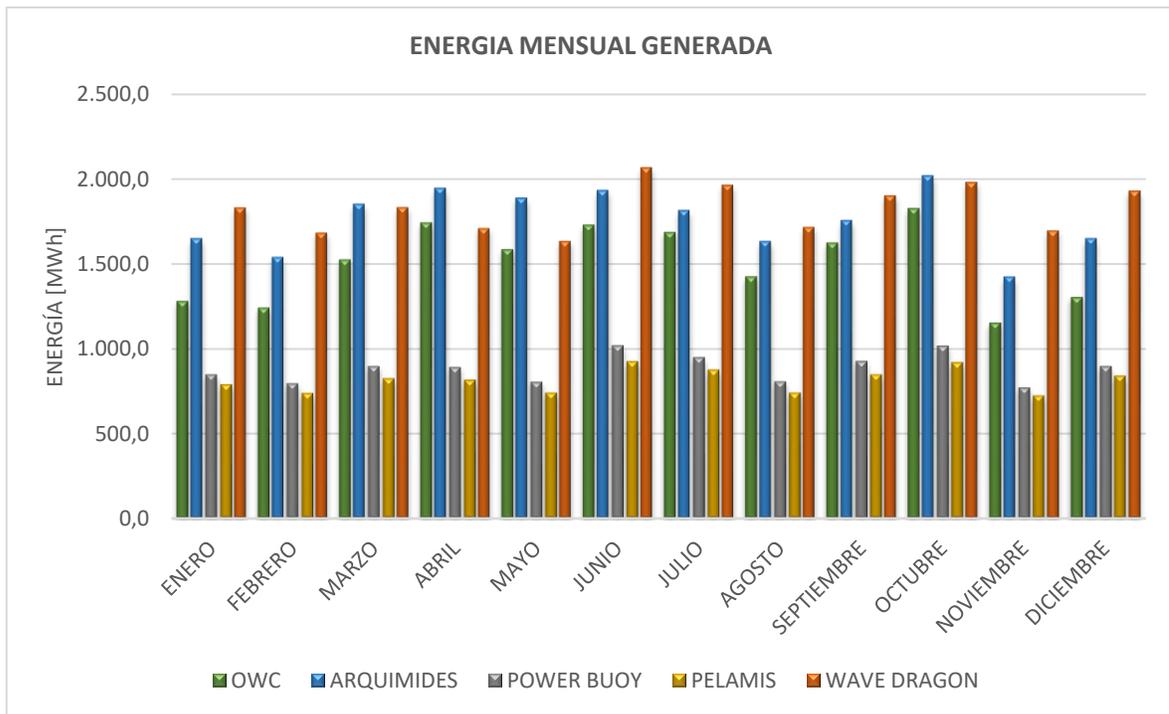


Gráfico 5.3.2: Energía mensual por dispositivo. [Elab. Propia]

De los valores obtenidos en el punto anterior, se tiene que la energía anual generada por cada uno de los dispositivos corresponde a:

$$E_{anual} = \sum_{i=1}^{12} E_i$$

Donde:

$E_{anual}$ : Energía anual generada en [kWh]

$E_i$ : Energía mensual en el mes  $i$  en [kWh]

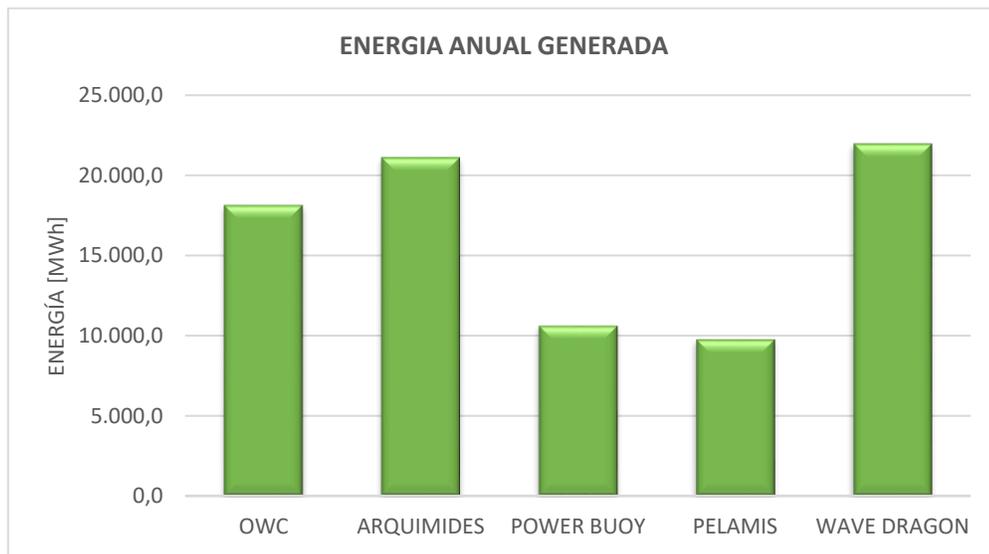


Gráfico 5.3.3: Energía anual generada por los distintos parques undimotrices. [Elab. Propia]

Para igual capacidad instalada se tiene que la respuesta de un dispositivo respecto a otro instalado expuesto al mismo clima de oleaje puede ser el doble, esto debido a que independiente de las condiciones de operación, las características de diseño de los dispositivos permiten optimizar de distinta manera la energía del oleaje incidente.

## 5.4 Costos

Existe poca información respecto a los valores reales de adquisición, instalación, operación y mantenimiento de las unidades de energía undimotriz. No obstante, es posible estimar estos costos ya que existen proyectos que se encuentran en fase comercial o avanzado nivel de desarrollo. De acuerdo a lo indicado en [36], se obtienen costos unitarios por los dispositivos a analizar.

## 5.4.1 Costo unitario y por parque undimotriz

Los costos por adquisición de equipos se muestran en la Tabla 5.4.1.

Tabla 5.4.1: Costos generadores undimotrices. [Elab. Propia]

	<b>OWC</b>	<b>ARQUIMIDES</b>	<b>POWER BUOY</b>	<b>PELAMIS</b>	<b>WAVE DRAGON</b>
<b>COSTO UNITARIO</b>	US\$ 1.704.646	US\$ 1.824.000	US\$ 200.128	US\$ 1.804.000	US\$ 16.798.801
<b>N° DE DISPOSITIVOS</b>	12	3	24	8	1
<b>COSTO PARQUE</b>	US\$ 20.455.746	US\$ 5.472.000	US\$ 4.803.072	US\$ 14.432.000	US\$ 16.798.801

## 5.4.2 Costos asociados a la instalación del parque undimotriz

La Tabla 5.4.2 muestra los costos asociados a los estudios y permisos requeridos para el desarrollo de cada proyecto undimotriz. Estos valores fueron estimados tomando como base lo señalado en [34], pero se igualaron los valores asociados a ingeniería del proyecto, estudios requeridos y seguros dado que los proyectos se emplazan en un mismo sector y que la potencia instalada es equivalente para cada tecnología. Sólo se hace una distinción en los costos de operación, mantenimiento y administración (COMA), ya que estos costos dependen del grado de complejidad y necesidad de mantenimiento de cada tecnología.

Tabla 5.4.2: Costos asociados a cada parque undimotriz. [Elab. Propia]

	<b>OWC</b>	<b>ARQUIMIDES</b>	<b>AQUA BUOY</b>	<b>PELAMIS</b>	<b>WAVE DRAGON</b>
<b>Costo Estudios y Permisos</b>	<b>US\$ 1.260.000</b>	<b>US\$ 2.060.000</b>	<b>US\$ 2.560.000</b>	<b>US\$ 2.260.000</b>	<b>US\$ 1.560.000</b>
Ingeniería	US\$ 300.000				
Estudios terrestres	US\$ 50.000				
Estudios marinos y batimetría	US\$ 100.000				
Estudios impacto ambiental	US\$ 60.000				
Concesiones y trámites legales	US\$ 70.000				
Fletes y transporte	US\$ 140.000				
Seguros	US\$ 40.000				
Obras eléctricas y sala de máquinas	US\$ 500.000				
Cableado eléctrico submarino	US\$ 0	US\$ 500.000	US\$ 1.000.000	US\$ 700.000	US\$ 0
Obras civiles y montaje	US\$ 0	US\$ 300.000	US\$ 300.000	US\$ 300.000	US\$ 300.000
<b>COMA</b>	<b>US\$ 818.230</b>	<b>US\$ 328.320</b>	<b>US\$ 288.184</b>	<b>US\$ 577.280</b>	<b>US\$ 671.952</b>
<b>Costos de interconexión a la red</b>	<b>US\$ 200.000</b>				
<b>Costos Obras Adicionales</b>	<b>US\$ 1.136.000</b>				
Camino de acceso	US\$ 776.000				
Línea de distribución	US\$ 360.000				

En la Tabla 5.4.2 además se incluyen costos de interconexión a la red de distribución local y obras adicionales que corresponden a una extensión de la red eléctrica en media tensión y mejoras al camino de acceso en ambos casos se consideró un tramo de 5 kilómetros.

## 5.5 Ingresos

Los ingresos que percibe el parque de energía de las olas corresponden a la venta de energía e ingresos por potencia instalada, además de los ingresos por venta de bonos de Carbono al tratarse de una fuente de generación limpia. Para efectos de analizar la viabilidad económica de cada uno de los proyectos, se considerará: un período de vida útil de 30 años para los equipos; una tasa de descuento del 12%; los costos de equipamiento se indican en la ; los costos de instalación, estudios, operación, mantenimiento y administración señalados en la , donde se muestran además los costos de interconexión a red y costos de obras adicionales necesarias para la ejecución y operación de la central.

Para determinar el precio de la energía se impone como condición que el VAN sea igual a cero en el período de evaluación del proyecto, en este caso 30 años, de esta manera se obtienen los ingresos producto de la comercialización de la potencia y energía de cada tecnología para las distintas tecnologías, indicado en la Tabla 5.5.1.

Tabla 5.5.1: Precio de la energía generada [Elab. Propia]

OWC	ARQUIMIDES	POWER BUOY	PELAMIS	WAVE DRAGON
180,6 US\$/MWh	44,9 US\$/MWh	96,4 US\$/MWh	262 US\$/MWh	125,3 US\$/MWh

Comparando estos valores con la última fijación de Precio Nudo de Corto Plazo, correspondiente a enero de 2017 cuyo valor fue de 64 US\$/MWh, hacen rentable económicamente sólo el proyecto basado en el efecto Arquímedes, ya que las otras alternativas reportan un precio de venta de energía por sobre el precio estabilizado.

## 5.6 Impacto de la conexión del PMGD en la red de distribución

Antes de la conexión de un proyecto de generación a la red debe verificarse el impacto que la operación de la central de generación provocará en dicha red. Dentro de los impactos que una central de ERNC puede ocasionar en el Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), pueden ser de carácter local o afectar a toda la red y dependen del tamaño de la central de la red. [37]

La Guía de Conexión de Proyectos ERNC [35] y la Norma Técnica de Seguridad y Calidad de Servicio (NTSyCS), identifica los siguientes impactos de un PMGD en la red de distribución.

Impacto local:

- Cambios en el flujo de potencia del SEP al que se conecta el generador.
- Modificación de los perfiles de tensión de las barras adyacentes al punto de conexión.
- Modificación del esquema de protecciones.
- Aumento en los niveles de cortocircuito.
- Reducción o aumento de la frecuencia de la red.

Dado lo anterior, se requiere analizar y acotar los impactos de la conexión del generador a la red de manera de asegurar la calidad y seguridad de suministro cumpliendo fielmente lo indicado en la normativa vigente referida a la conexión de PMGD a las redes de distribución.

Dentro de los estudios de conexión requeridos se cuentan los estudios que evalúan el impacto sistémico que permite cuantificar el impacto en la red del medio de generación, estos estudios se clasifican en estudios dinámicos, estáticos y de cortocircuito.

En la Figura 5.2.1 se proyecta la red de media tensión necesaria para la conexión del generador undimotriz ubicado junto a la costa y el punto de conexión a la red de distribución existente. El tramo de la red de media tensión simulada a través del software Digsilent se muestra en la Figura 5.6.1.

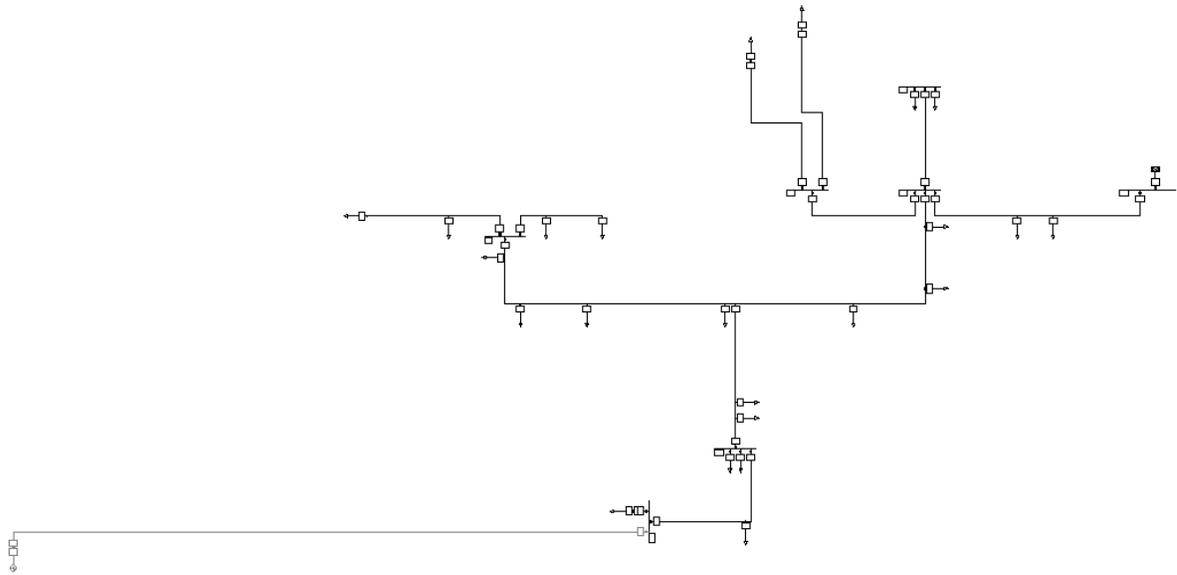


Figura 5.6.1: Modelo Digsilent red de distribución en MT, sector Laguna Verde. [Elab. Propia]

En la Figura 5.6.1 se muestra también el generador undimotriz proyectado, desconectado de la red existente.

### 5.6.1 Características del punto de conexión

El punto de conexión del generador undimotriz se sitúa en la cola del alimentador en el punto indicado en la Figura 5.2.1 y representado en el modelo Digsilent como “Barra Conexión PMGD” de la Figura 5.6.2, la red de media tensión proyectada corresponde a las obras adicionales requeridas para la conexión del PMGD a la red existente, dado que el medio de generación se instala junto al borde costero.

La simulación muestra la operación actual de la red, antes de la conexión del PMGD, los parámetros y variables característicos del punto de conexión y barra adyacente se muestran en la Tabla 5.6.1.

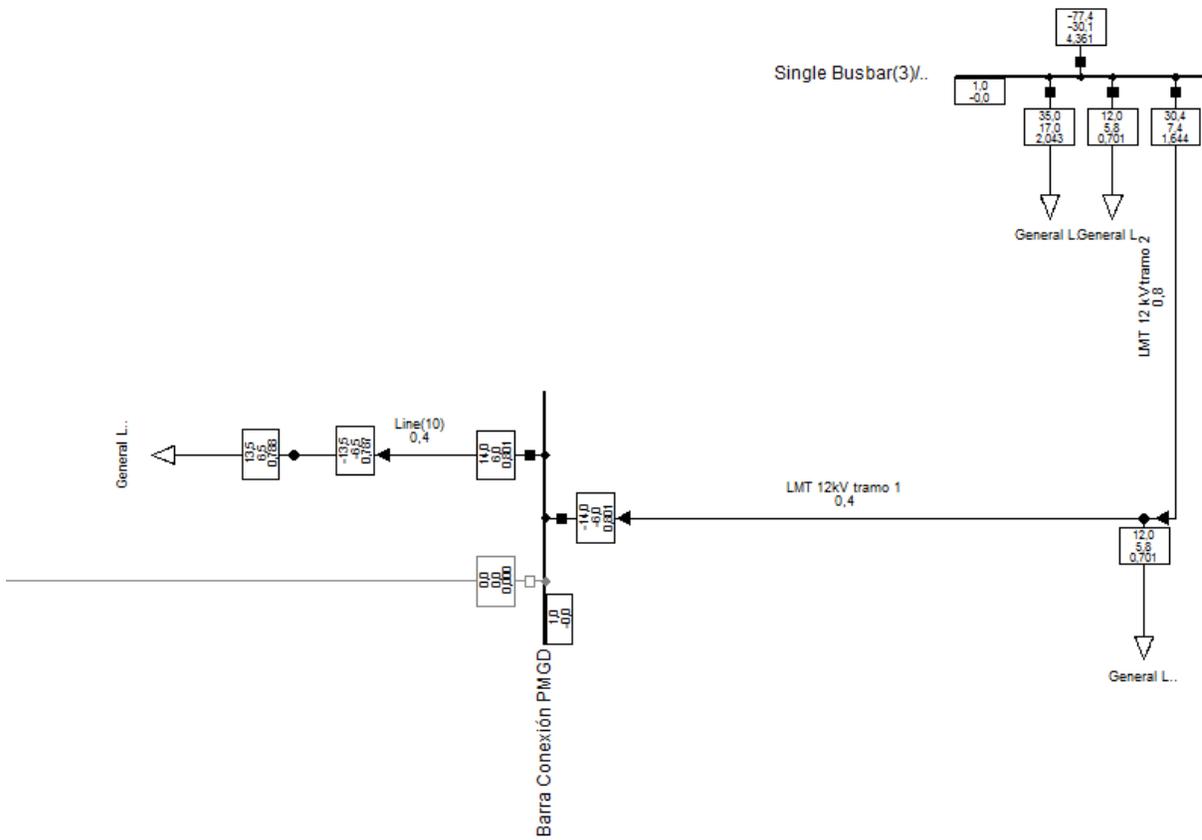


Figura 5.6.2: Modelo Digsilent del punto de conexión del PMGD. [Elab. Propia]

Tabla 5.6.1: Parámetros y variables de operación. [Elab. Propia]

	V [kV]	I [A]	P [kW]	Q [kVAr]	f [Hz]
Barra Conexión PMGD	11,99	0,801	-14	-6	50
Barra Adyacente	11,99	4,361	-77,1	-30,1	50

### 5.6.2 Impactos locales en la red

- Cambios en el flujo de potencias al conectar el PMGD

Dado que el generador se conecta en la cola del alimentador de la red de distribución, en un punto donde sólo existen cargas, al inyectar potencia en dicho punto se produce un cambio en el flujo de carga.

La Figura 5.6.3 muestra el flujo de potencia antes de la conexión del PMGD, se observa como las cargas son alimentadas a través de la red de distribución ya que no existen unidades generadoras en media tensión en ese tramo de la red.

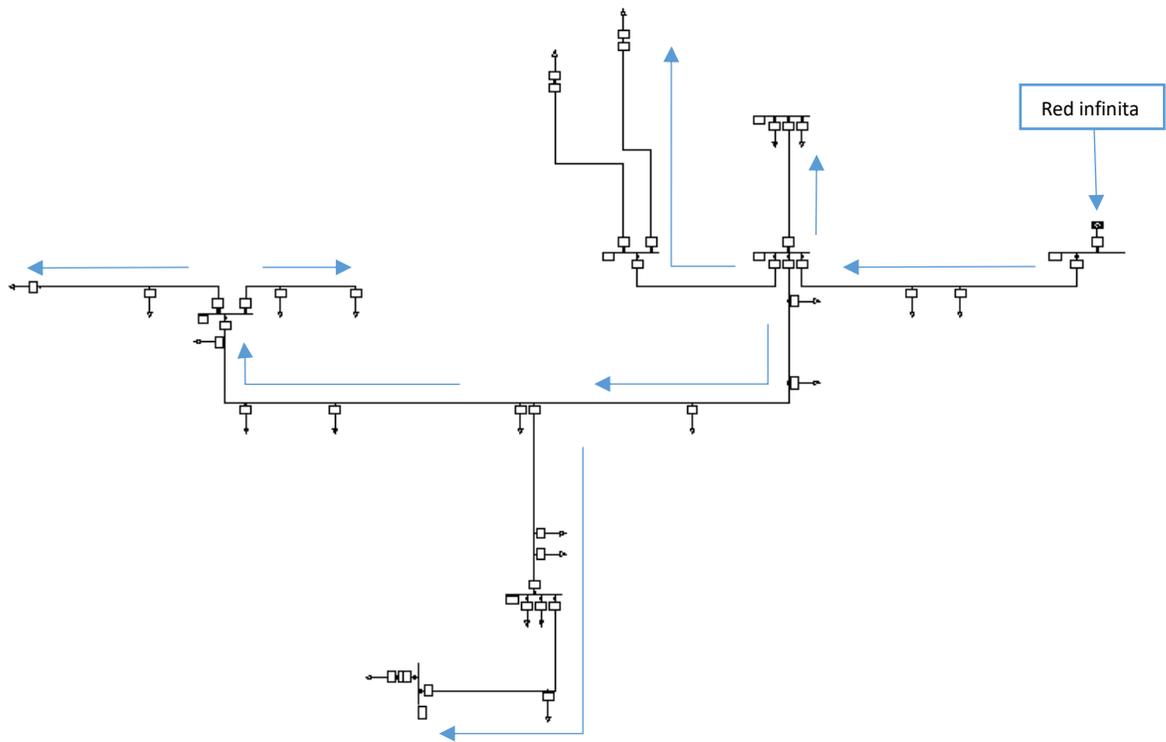


Figura 5.6.3: Dirección del flujo de potencia antes de la conexión del PMGD. [Elab. Propia]

Al conectar el generador, se produce un cambio de sentido en el flujo de potencia desde el punto de conexión del generador undimotriz o PMGD hasta el punto indicado como red infinita que representa el resto de la red de distribución estudiada. La variación en el flujo de potencia queda representada en la Figura 5.6.4.

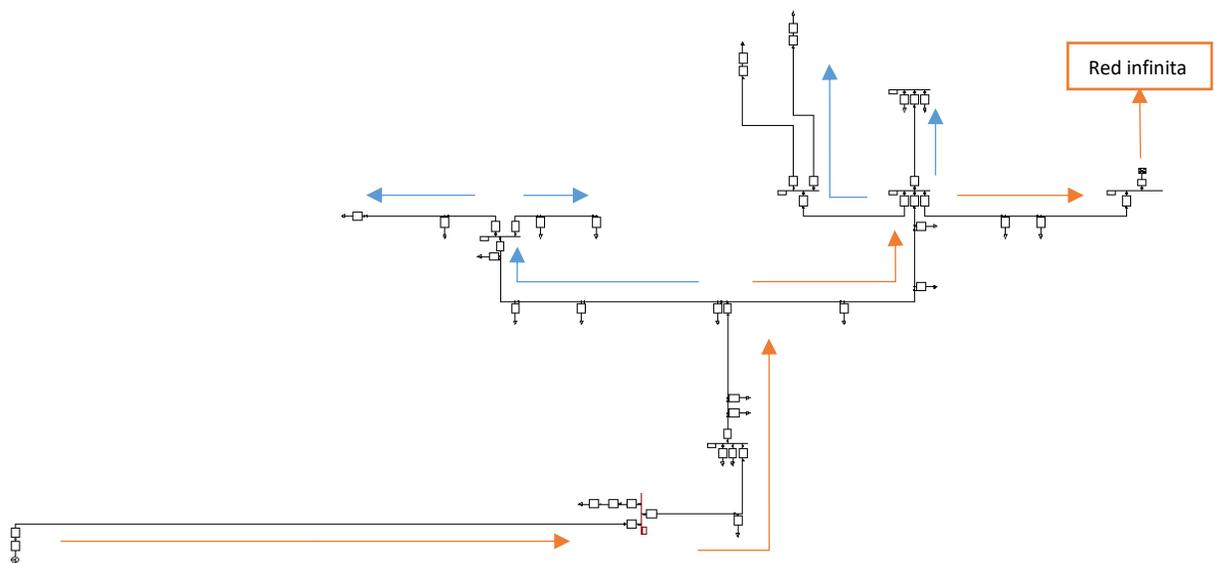


Figura 5.6.4: Dirección del flujo de potencia después de la *conexión* del PMGD. [Elab. Propia]

- Variación de los niveles de cortocircuito

De acuerdo a información proporcionada por la empresa de distribución eléctrica concesionaria de la zona, la potencia y corriente de cortocircuito en el punto de conexión antes de la puesta en servicio del PMGD son respectivamente:

$$P_{cc} = 12,5 \text{ [MVA]}$$

$$I_{cc} = 0,656 \text{ [kA]}$$

Con esta información referente a los niveles de corto circuito ( $N_{cc}$ ) antes de la conexión del generador es posible conocer el impacto en los  $N_{cc}$  tras la puesta en servicio del PMGD. Al simular un corto circuito en el punto de conexión del generador undimotriz se tiene:

$$P_{cc} = 10,66 \text{ [MVA]}$$

$$I_{cc} = 1,070 \text{ [kA]}$$

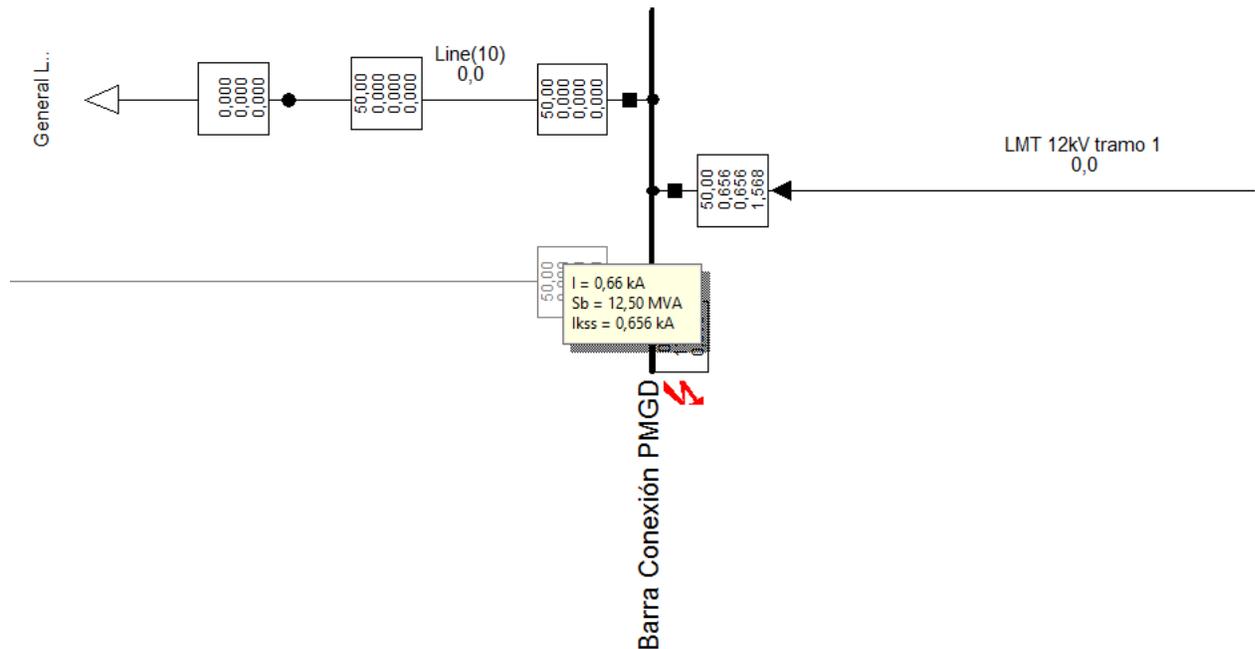


Figura 5.6.5: Nivel de corto circuito en la barra antes de la conexión del PMGD. [Elab. Propia]

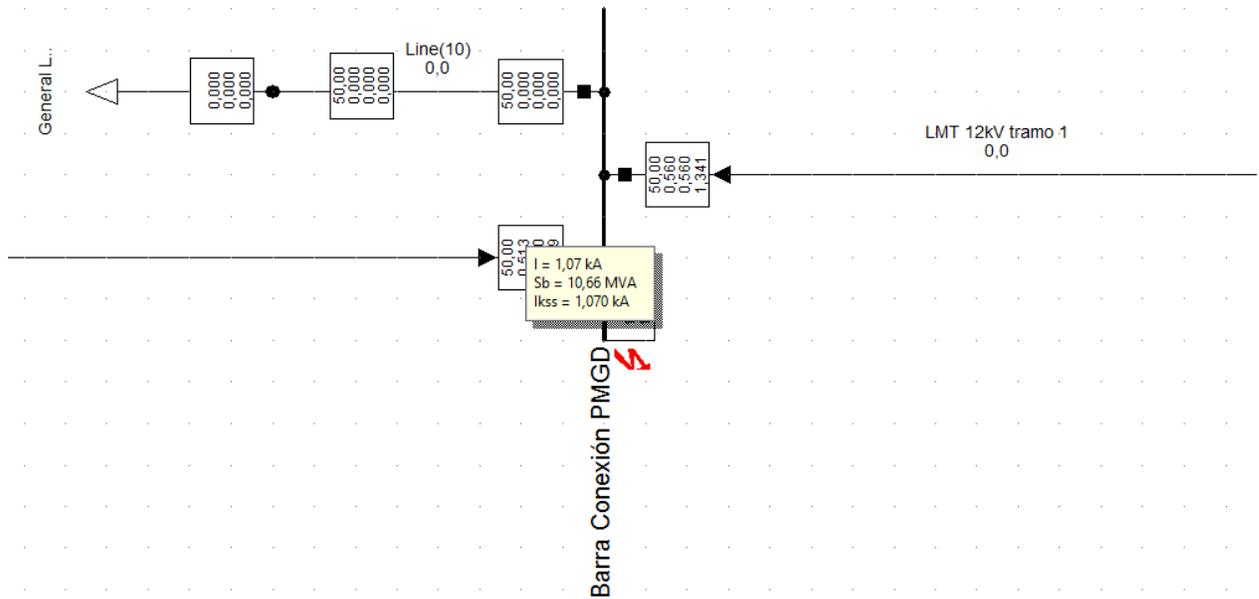


Figura 5.6.6: Nivel de corto circuito en la barra después de la conexión del PMGD. [Elab. Propia]

Respecto a la modificación en el nivel de corto circuito en la barra de conexión del PMGD, este resulta no ser significativamente superior y por lo tanto no resulta ser una limitación técnica para la conexión del generador, sólo se debe verificar las características de las protecciones existentes en la línea.

- Modificación de los perfiles de tensión en barras adyacentes

Al conectar el generador undimotriz, la tensión en la barra de conexión y barra adyacente presentan las siguientes variaciones indicadas en la Tabla 5.6.2. Estas variaciones no son significativas respecto al caso sin PMGD, tal como se demuestra a continuación

Tabla 5.6.2: Parámetros y variables de operación. [Elab. Propia]

	V [kV]	I [A]	P [kW]	Q [kVAr]	f [Hz]
Barra Conexión PMGD	12,12	153,015	2341,3	1787,6	50
Barra Adyacente	12,098	152,292	2273,1	1757,7	50

La variación de la tensión en la barra de conexión del generador se obtiene a partir de la siguiente expresión:

$$\Delta V = \frac{S_{PMGD} \cdot \cos(\varphi - \sigma)}{S_{CC}}$$

Donde:

$S_{PMGD}$ : Potencia aparente del PMGD en MVA.

$S_{CC}$ : Potencia de cortocircuito en el Punto de Conexión en MVA, sin considerar el PMGD.

$\varphi$ : Ángulo de la impedancia de la red en el Punto de Conexión en grados o radianes, sin considerar el PMGD.

$\sigma$ : Ángulo entre la corriente y la tensión del PMGD en grados o radianes.

Para el caso del PMGD en estudio se tiene:

$$S_{PMGD} = 2,82 \text{ [MVA]}$$

$$S_{CC} = 12,5 \text{ [MVA]}$$

$$\cos(\varphi - \sigma) = 0,8$$

Por lo tanto la variación de tensión será:

$$\Delta V = \frac{2,82 \cdot 0,8}{12,5}$$

$$\Delta V = 18\%$$

Esta variación no cumple con lo indicado en el Artículo 2-13 de la Norma Técnica de Conexión y Operación de PMGD en Instalaciones de Media Tensión, que establece como criterio de tensión los siguientes valores:

$$\Delta V_{urbanos} \leq 6\%$$

$$\Delta V_{rural} \leq 8\%$$

Por lo que se deben realizar obras adicionales en el sistema que permitan limitar la sobretensión generada por la conexión a la red del PMGD, esto a través de la conexión de un reactor de potencia en el punto de conexión del generador.

- Verificación de las protecciones existentes

La línea en estudio cuenta con protecciones en distintos puntos del trazado, estas protecciones son del tipo fusible y cuchillos seccionadores, en el caso de la capacidad de los fusibles existentes estos deben ser reemplazados dado que en ambos casos la capacidad de corriente admisible está por sobre la corriente a inyectar por el PMGD, limitada por la capacidad de la línea



# 6 Conclusiones y trabajo futuro

---

## 6.1 Comentarios

La energía presente en el mar es abundante y prácticamente ilimitada, particularmente la energía proveniente de las olas, cuya caracterización obedece a parámetros físicos, que varían según el tipo de oleaje presente (clima de generación) y la batimetría presente. De acuerdo a las características y extensión geográfica, Chile presenta condiciones naturalmente óptimas para la extracción de energía proveniente de las olas, caracterizándose en general por la poca variabilidad de los parámetros de oleaje y de la energía presente, esta condición resulta favorable ya que permite especificar las características técnicas de la central en función del tipo de oleaje incidente.

La experiencia en el mundo es cada vez más exitosa, aumentando la potencia de los dispositivos, gracias a la permanente investigación en el tema que permite además reducir el costo por cada kW instalado.

En Chile gracias a los cambios en la normativa vigente en materia de energías renovables, se ha experimentado un aumento en las inversiones de energías renovables no convencionales ya sea como PMG o PMGD, que no resultaban competitivas respecto de las fuentes convencionales de generación.

## 6.2 Conclusiones

Este trabajo muestra el potencial energético presente en la costa de la Región de Valparaíso, específicamente el sector de Laguna Verde; dicho potencial no es posible determinar de manera precisa ya que las características del oleaje cercano a la costa son altamente no lineales, sin embargo, las estimaciones realizadas y fuentes de información consultadas permiten predecir que el comportamiento del oleaje en el sector es similar al observado en aguas profundas del mismo sitio.

Respecto al desempeño técnico de cada parque undimotriz estudiado se obtuvieron resultados dispares entre cada prototipo estudiado esto básicamente porque los principios de generación eran distintos y porque el diseño en algunos casos no se adaptaba al perfil del oleaje presente en el sector en estudio.

Dispositivos basados en el principio de columna oscilante de agua (OWC) ofrecen una mejor respuesta ante el oleaje, particularmente en este trabajo se estudió el desempeño de una central con las características de la Central Limpet instalada en Escocia. Considerando además que esta central es construida íntegramente en su lugar de operación, es posible optimizar su geometría considerando que tan energético sea el oleaje incidente. Además, presenta un mejor rendimiento ya que captura energía en un amplio rango de olas, desde cortos a largos períodos y de bajo potencial hasta olas de elevada potencia, en este último caso dada la geometría no es posible capturar toda la energía incidente, por lo que a mayor potencia incidente disminuye el factor de captura del colector.

En el caso del generador Arquímedes (AWS), resulta ventajoso el hecho de reducir los pasos de conversión al utilizar un generador lineal, sin embargo, esto implica robustecer el generador de manera que el estator sea capaz de inducir en la parte móvil la corriente producto del movimiento vertical del oleaje. Respecto al funcionamiento de la central, el diseño estudiado presenta un excelente desempeño en oleajes de elevado período, cercano a los 14 segundos y altura significativa de ola de 6,5 metros, esto comparado con el período promedio del oleaje en la costa chilena de 13 segundos permite una oscilación cercana al punto de máximo rendimiento del generador, sin embargo dado que la altura promedio de las olas en Chile no supera los 3 metros el generador no logra realizar toda la carrera necesaria para extraer el máximo de potencia incidente sobre él. Sin embargo, se obtiene un elevado factor de planta del 40% muy por sobre otras tecnologías.

El dispositivo peor evaluado desde el punto de vista técnico resulto ser la central Pelamis, que si bien presentaba un mayor grado de desarrollo, su diseño no se adapta al perfil de las olas incidentes, debido a que la geometría permite una óptima extracción de energía para olas de período entre 7,2 y 8,3 segundos y altura significativa por sobre los 5 metros, parámetros muy distantes a los observados en el oleaje del litoral chileno caracterizados por un período promedio de 13 segundos y altura significativa por sobre los 2,7 metros. Este bajo rendimiento queda representado en el factor de carga asociado al dispositivo obtenido a partir de la generación anual estimada y la energía capaz de producir si operara a su capacidad nominal durante un año.

El dispositivo Power Buoy, presenta una respuesta similar a Pelamis dado que su diseño está optimizado para olas de período en torno a los 9 segundos y altura significativa de la ola por sobre los 4 metros, no obstante tiene un mejor desempeño que Pelamis, entre las razones se puede mencionar que al tratarse de un absorbedor puntual la ubicación y distancia entre cada unidad generadora dependen del perfil de las olas, de manera que un generador no interfiera en la operación de los que se encuentran colindantes a él. Esto quiere decir que en un parque basado en dispositivos con este principio de generación es posible tener a todos los generadores operando con el mismo rendimiento (aunque éste no sea el óptimo), a diferencia de Pelamis que, dada la distancia fija entre generadores, y que esta distancia no coincide con el perfil de la ola no es posible tener los tres generadores de un dispositivo operando a igual capacidad.

El último generador undimotriz analizado fue el Wave Dragon cuya principal ventaja en este trabajo es que con un dispositivo se obtiene la capacidad instalada requerida, además de ofrecer el mejor desempeño de los generadores analizados debido a que el principio de captación de energía está basado en el rebosamiento por lo que capta olas en un amplio espectro de parámetros, limitado únicamente por la altura de la ola. Para alturas por sobre los 5 metros se tiene que la central opera a capacidad nominal, dado que la altura promedio en Chile es de 2,7 metros se obtiene un rendimiento reducido del dispositivo, pero que alcanza un factor de planta de casi un 42%.

En resumen, se tiene que dada la particularidad del oleaje en la costa chilena, caracterizado por un elevado período y altura significativa de olas bajo los tres metros, es necesario adaptar los dispositivos desarrollados a las condiciones locales que permita optimizar la generación de energía, implementar cambios en la geometría que les permita adaptarse al perfil del oleaje, o cambios en el sistema de conversión de energía que permitan generar energía durante todo el movimiento vertical de la ola.

Otro factor importante además del desempeño técnico es el costo de construcción de los dispositivos y los costos de operación, mantenimiento y administración. De esta manera se determina en función de la producción de energía y el costo de cada dispositivo la factibilidad económica del proyecto.

De acuerdo al análisis de rentabilidad, sólo un proyecto arrojó un precio competitivo de la energía producida, para el análisis se impuso como condición VAN igual a cero y un período de vida útil de 30 años. El dispositivo Archimides Wave Swing, resulta ser el más ventajoso ya que la

relación precio por potencia instalada y factor de planta, está por sobre el resto de las tecnologías analizadas.

Para la central basada en el principio de columna oscilante de agua (OWC), el alto costo de construcción (el más elevado de todas las tecnologías evaluadas) y considerando que el diseño del dispositivo no optimiza la extracción de energía pese a tener un buen factor de planta (34,5%), se obtiene un elevado precio de venta de energía alcanzando los 0,180 US\$/kWh, casi el triple del precio nudo considerado como referencia en este trabajo.

Para el caso de una central undimotriz compuesta por unidades Power Buoy, si bien el precio por kW instalado es competitivo, la baja producción de energía reflejada a través de su factor de planta eleva el precio de la energía producida, en este caso al mejorar la capacidad de producción de energía del generador, adaptando su diseño es posible mejorar el factor de planta y bajar el precio de la energía alcanzando valores de mercado.

La central Pelamis ofrece un elevado costo por potencia instalada y el peor factor de planta alcanzando precios de energía del orden de los 0,262 US\$/kWh, muy por sobre los actuales precios que no superan los 0,064 US\$/kWh.

Finalmente, la central Wave Dragon que si bien tiene el mejor factor de planta (42,59%) su alto costo de instalación hace que el precio de la energía producida esté por sobre los 0,125 US\$/kWh, en este caso dado que el principio de generación es producto del rebosamiento del oleaje incidente, mejoras en el diseño que le permita operar para oleajes de menor altura podrían mejorar su factor de planta y con ello reducir el costo de la energía generada.

Respecto al impacto en la conexión del generador como pequeño medio de generación conectado a la red de distribución, se observa un cambio de sentido en el flujo de potencia debido a que el punto de conexión corresponde a la cola del alimentador donde existen sólo consumos de baja potencia básicamente consumos residenciales. La conexión del generador implicó un aumento en la corriente por la línea de distribución en media tensión alcanzando prácticamente el límite técnico de capacidad de transporte de corriente. Se debe rediseñar el sistema de protecciones de la línea asociada al punto de conexión del PMGD, permitiendo la desconexión del generador en caso de falla de la línea o que el generador inyecte una potencia mayor a la permitida técnicamente, además de realizar una debida coordinación de protecciones que entregue fiabilidad al sistema

eléctrico. Por lo tanto, no existe una limitante técnica importante desde el punto de vista de la red eléctrica existente que condicione la conexión y operación de cualquiera de las unidades undimotrices estudiadas.

Para que los proyectos undimotrices sean rentables económicamente, se debe no sólo determinar el potencial energético de las olas, sino que además diseñar tecnologías que maximicen la extracción de energía para parámetros de oleaje (altura y período) existentes en el sitio de interés, esta consideración mejorará el factor de potencia permitiendo operar cada generador a su capacidad nominal con lo cual el precio de venta de energía se reduciría considerablemente.

Otro aspecto que mejora la rentabilidad de proyectos energéticos con tecnologías no convencionales es el apoyo estatal a partir de subsidios o incentivos al desarrollo de medios de generación basados en tecnologías renovables no convencionales que si bien en este caso aún no alcanzan su pleno grado de madurez, la permanente investigación en el tema hacen que sea una alternativa que permita innovar en la materia y dejar de depender de generación eléctrica basada en combustibles fósiles altamente contaminantes y con una alta huella de carbono.

## 6.3 Trabajo futuro

Este trabajo, enfocado en el desempeño técnico y económico de distintas tecnologías undimotrices en la costa del sector de Laguna Verde en la Región de Valparaíso, permitió identificar las tecnologías más favorables para extraer la energía contenida en el oleaje, sin embargo, para futuros trabajos resulta interesante abordar el diseño de cada dispositivo ahondando en las modificaciones necesarias que permitan maximizar la potencia extraíble de acuerdo al clima de oleaje al cual será expuesto el dispositivo.

Lo anterior implica realizar un rediseño de las tecnologías estudiadas que se adapten a las condiciones de oleaje existentes en el sitio de interés de manera de obtener para cada generador una matriz de potencia optimizada para parámetros de oleaje dominantes en la costa de Chile, que de acuerdo a lo expuesto en este trabajo difieren en período y amplitud o altura de la ola a las presentes en costas de Europa donde se han desarrollado estos dispositivos.

# 7 Bibliografía

---

- [1] H. POLINDER y M. SCUOTTO, «Wave Energy Converters and their Impact on Power Systems,» de *International Conference on Future Power Systems*, Amsterdam, 2005.
- [2] B. CAVIA DEL OLMO, «Explotación del potencial de energía del oleaje en función del rango de trabajo de prototipos captadores,» Tesina, Universitat Politecnica de Catalunya, Barcelona, 2009.
- [3] G. HARRISON y R. WALLACE, «Sensitivity of Wave Energy to Climate Change,» *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 20, nº 4, 2005.
- [4] PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE, «Dinámica de los Océanos,» [En línea]. Available: [www.puc.cl/sw\\_educ/geo\\_mar/](http://www.puc.cl/sw_educ/geo_mar/). [Último acceso: agosto 2014].
- [5] P. FERNÁNDEZ, «Energía de las Olas,» Universidad de Cantabria, Cantabria, 2002.
- [6] P. FERNÁNDEZ, «Modificación de la Energía de las Olas,» Universidad de Cantabria, Cantabria, 2002.
- [7] V. ROSALES, «Caracterización del Oleaje aplicada a Tuxpan, Veracruz,» Tesis de Magister en Ciencias, Instituto Politécnico Nacional, Veracruz, 1999.
- [8] D. JAROCKI, «Wave energy converter performance modeling and cost of electricity assessment,» Thesis of Master of Science in Engineering, California Polytechnic State University, San Luis Obispo, 2010.
- [9] H. ACUÑA, «Evaluación del potencial de la energía del oleaje en Chile,» Memoria de Título, UTFSM, Valparaíso, 2008.
- [10] SERVICIO HIDROGRÁFICO Y OCEANOGRÁFICO DE LA ARMADA DE CHILE, «Cartas Náuticas,» agosto 2014. [En línea]. Available: [www.shoa.cl](http://www.shoa.cl).
- [11] P. MONARDES, H. ACUÑA y D. SCOTT, «Evaluation of the potential of wave energy in Chile,» de *27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering (OMAE)*, Estoril, 2008.
- [12] C. RODRIGUEZ, «Análisis de viabilidad económica de ua plataforma de energía marítima,» Memoria de Título, Universidad Pontificia Comillas, Madrid, 2010.

- [13] J. FERNANDEZ, «Una aproximación al aprovechamiento de la energía de las olas para la generación de electricidad,» Memoria de Título, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2008.
- [14] M. FABREGA, «Hidrógeno, aplicación en motores de combustión interna,» Trabajo fin de carrera, Universitat Politecnica de Catalunya, Barcelona, 2009.
- [15] WAVEGEN, «Research into the further development of the Limpet shoreline wave energy plant,» de *Supplement to the final report*, 2003.
- [16] WAVEGEN, «Research into the further development of the Limpet shoreline wave energy plant,» 2002.
- [17] WAVEGEN, «Islay Limpet project monitoring,» *Final Report*, 2002.
- [18] I. LOPEZ, G. IGLESIAS, M. LOPEZ, F. CASTRO y M. RODRIGUEZ, «Turbine-chamber coupling in an OWC wave energy converter,» 2012.
- [19] B. PEREIRAS, *Estudio de una turbina de impulso radial para el aprovechamiento de la energía del oleaje*, Valladolid: Universidad de Valladolid, 2008.
- [20] A. SANTA, M. LOZANO y A. PINILLA, *Generación de Energía Eléctrica con Turbinas Wells*, 2005.
- [21] M. AMUNDARAIN, «La energía renovable procedente de las olas,» *Ikastorratza. e-Revista de Didáctica* 8, vol. Retrieved 2012/02/25 from [http://www.ehu.es/ikastorratza/8\\_alea/energía/energía.pdf](http://www.ehu.es/ikastorratza/8_alea/energía/energía.pdf), 2012.
- [22] J. PONCELAS, J. GUTIÉRREZ y J. PAREDES, «Situación actual y perspectivas de futuro de la energía hidráulica marina en Asturias,» Universidad de Oviedo, Asturias, 2014.
- [23] R. JARAMILLO, *Generación Undimotriz: Integración con la red y análisis de resonancia subsíncrona*, Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira, 2014.
- [24] S. HOYA ARIJA, «Electrical design for a wave buoy,» Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, 2011.
- [25] K. VENUGOPALAN, R. EKSTRÖM y M. LEIJON, «Optimal Constant DC Link Voltage Operation of a Wave,» Division of Electricity, Swedish Centre for Renewable Electric Energy Conversion, Uppsala, 2013.
- [26] S. MEDEL, *Estudio de implementación de tecnologías mareomotrices y undimotrices como pequeños medios de generación distribuida*, Santiago: Universidad de Chile, 2010.
- [27] M. PREVISIC, «Deployment Effects of Marine Renewable Energy Technologies,» *Re Vision*, 2010.

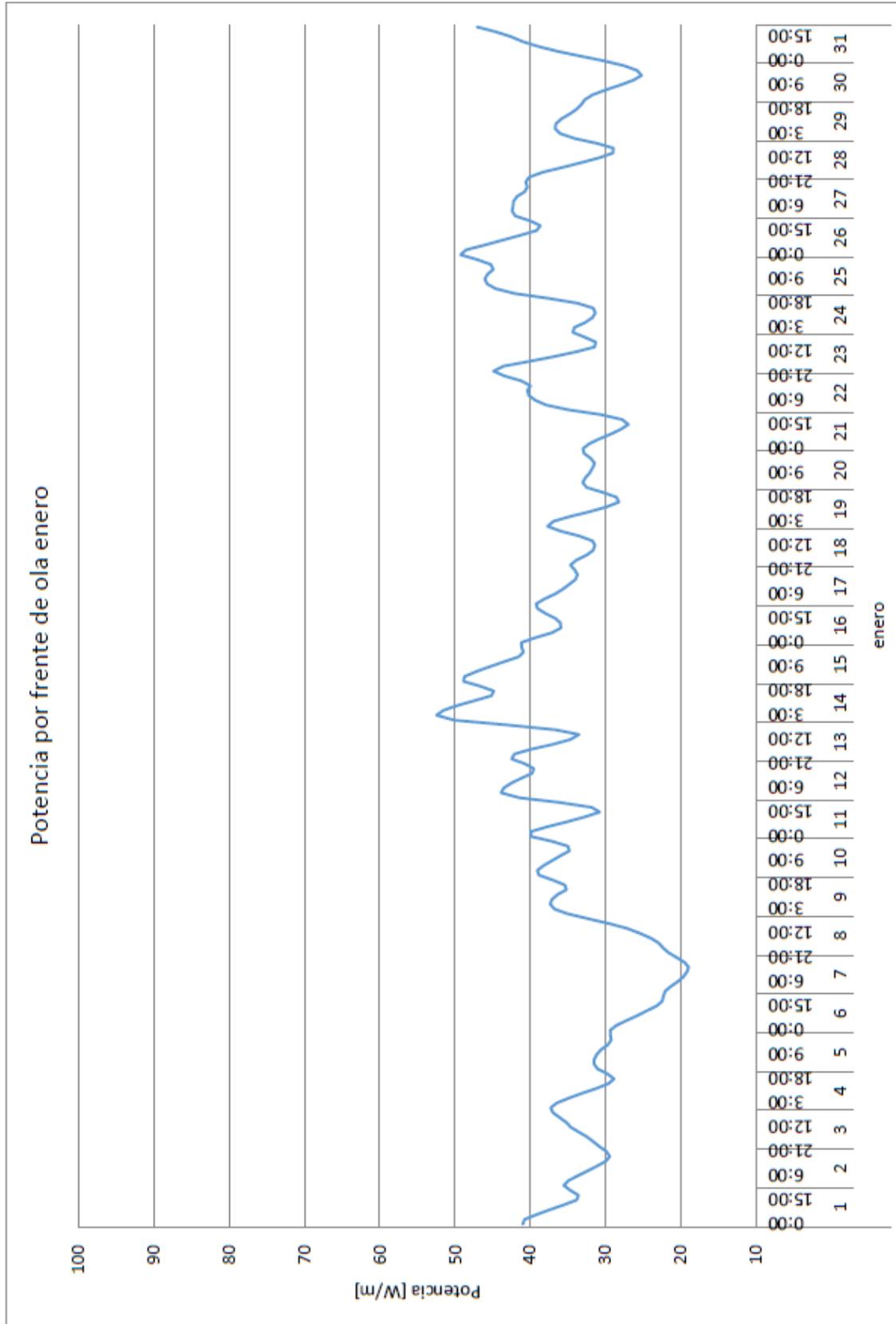
- [28] BBC, «Wave power firm Pelamis calls in administrators,» 21 Noviembre 2014. [En línea]. Available: <http://www.bbc.com/news/uk-scotland-scotland-business-30151276>. [Último acceso: agosto 2016].
- [29] R. YEMM, D. PIZER, C. RETZLER y R. HENDERSON, «Pelamis: experience from concept to connection,» The Royal Society, Edinburgh, 2011.
- [30] PELAMIS WAVE POWER, «Pelamis Wave Power,» [En línea]. Available: <https://www.pelamiswave.com>. [Último acceso: Agosto 2016].
- [31] L. CHRISTENSEN, E. FRIIS-MADSEN y J. KOFOED, «The wave energy challenge, the Wave Dragon case,» de *Power-Gen 2005 Europe Conference*, Milan, 2005.
- [32] H. SORENSEN y E. FRIIS-MADSEN, «Wave Dragon 1,5 MW north sea demonstrator phase 1,» Wave Dragon , Copenhagen, 2015.
- [33] NOAA, «Bathymetric Data Viewer,» [En línea]. Available: <http://maps.ngdc.noaa.gov/viewers/bathymetry/>. [Último acceso: septiembre 2014].
- [34] SUPERINTENDENCIA DE ELECTRICIDAD Y COMBUSTIBLES, «Infraestructura Eléctrica,» [En línea]. Available: [http://secgis.sec.cl/gis\\_electrico/infraestructura/maps.html#](http://secgis.sec.cl/gis_electrico/infraestructura/maps.html#). [Último acceso: octubre 2016].
- [35] COVISA, «Alambres desnudos - Covisa,» [En línea]. Available: <http://www.covisa.cl/productos/alambres-desnudos/>. [Último acceso: Abril 2017].
- [36] J. JOUBERT, An investigation of the wave energy resource on the South African coast, focusing on the spatial distribution of the south west coast, Stellenbosch, Sudáfrica: University of Stellenbosch, 2008.
- [37] CIFES, MINISTERIO DE ENERGÍA, GOBIERNO DE CHILE, «Guía de conexión de proyectos ERNC,» Marzo 2016. [En línea]. Available: <http://cifes.gob.cl/wp-content/uploads/2016/03/Conexion-Comun-web-1.pdf>. [Último acceso: Octubre 2016].
- [38] J. VERGARAY, *Generación eléctrica mediante el aprovechamiento del oleaje marítimo costero*, Santiago: Universidad de Chile, 2008.

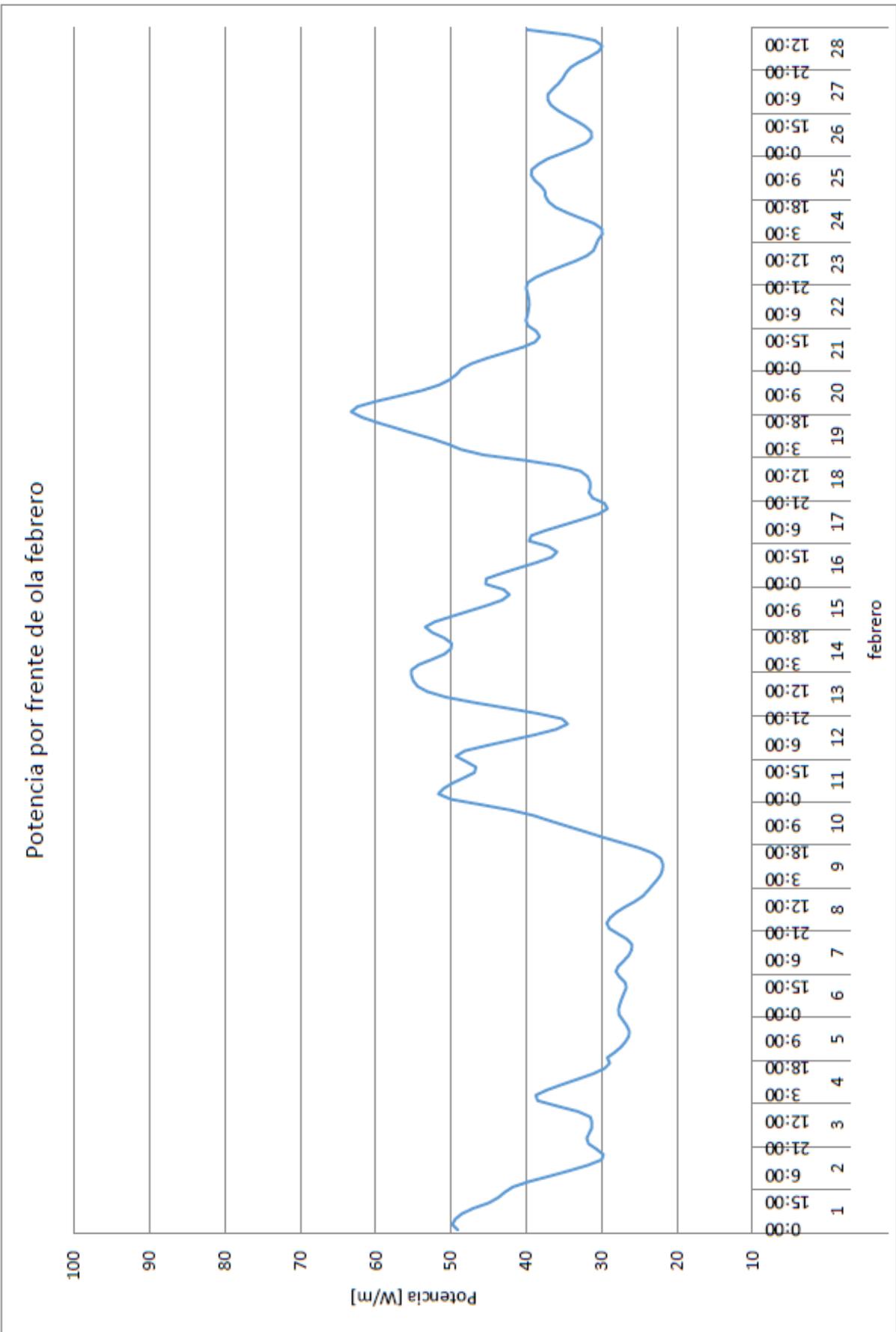
## 8 Anexos

---

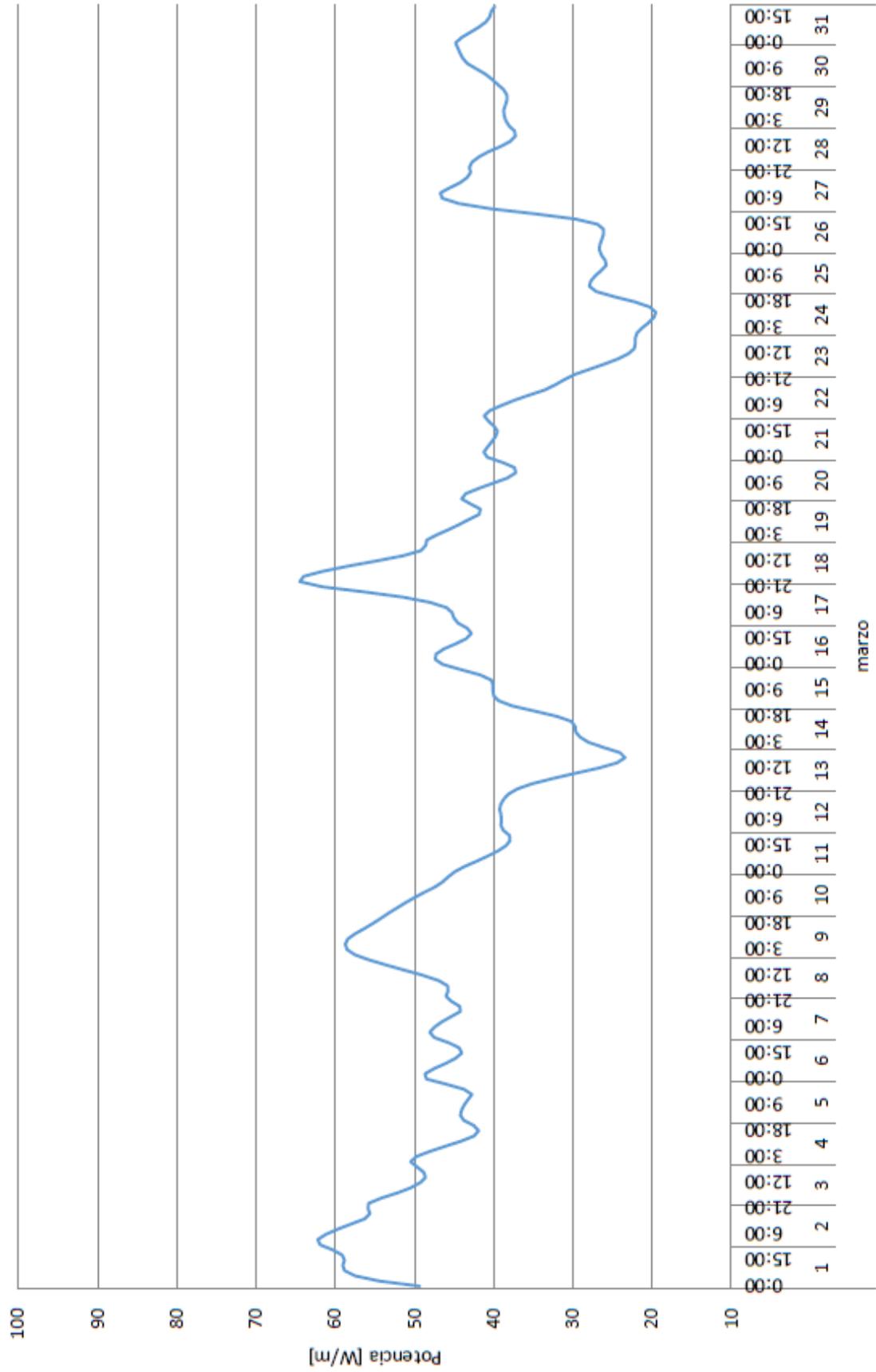
- A. Gráficos de potencia mensual del oleaje incidente
- B. Potencia mensual generada por parque undimotriz
- C. Flujo de caja de cada parque undimotriz

## A. Gráficos de potencia mensual del oleaje incidente

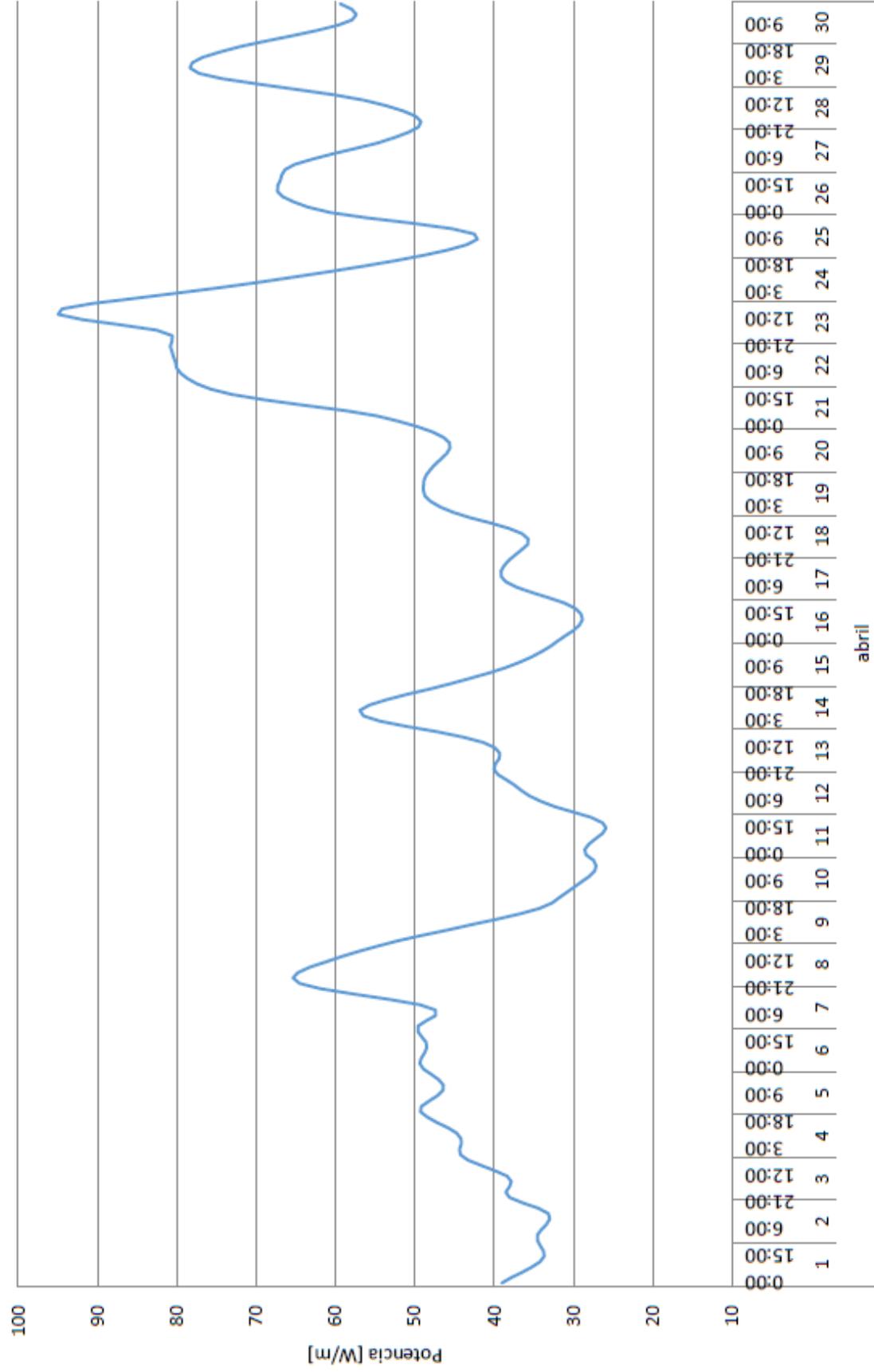




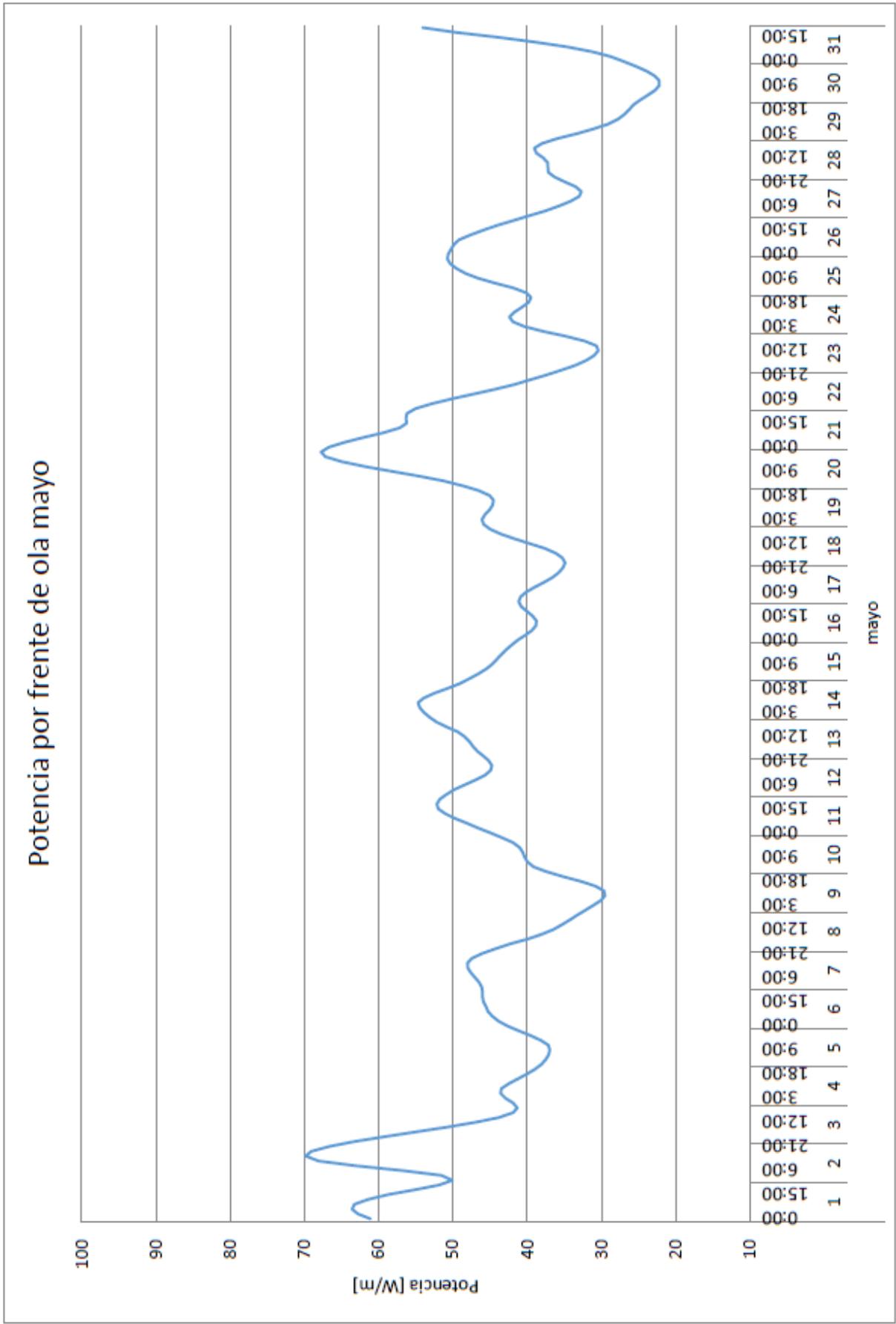
### Potencia por frente de ola marzo



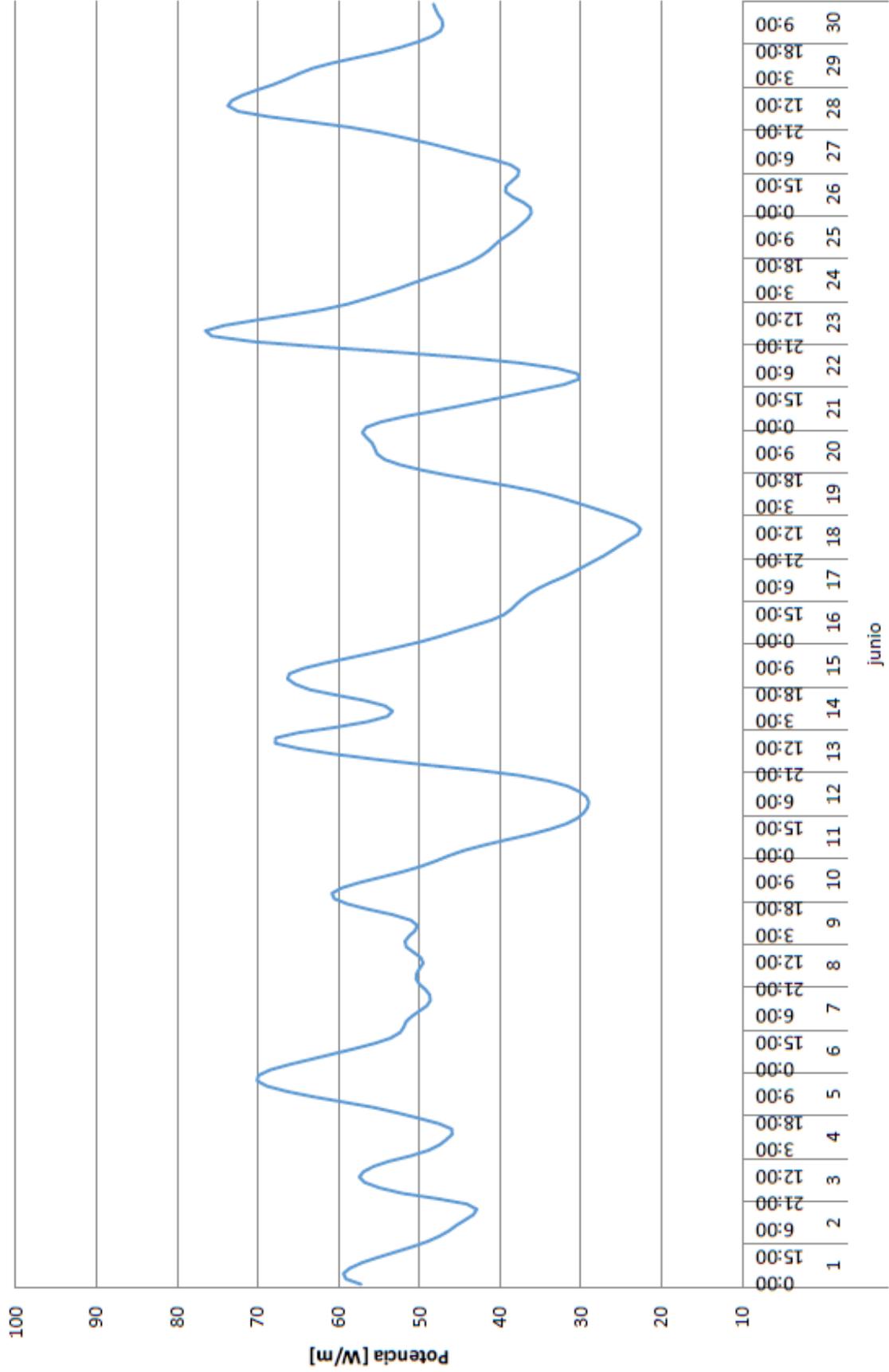
### Potencia por frente de ola abril



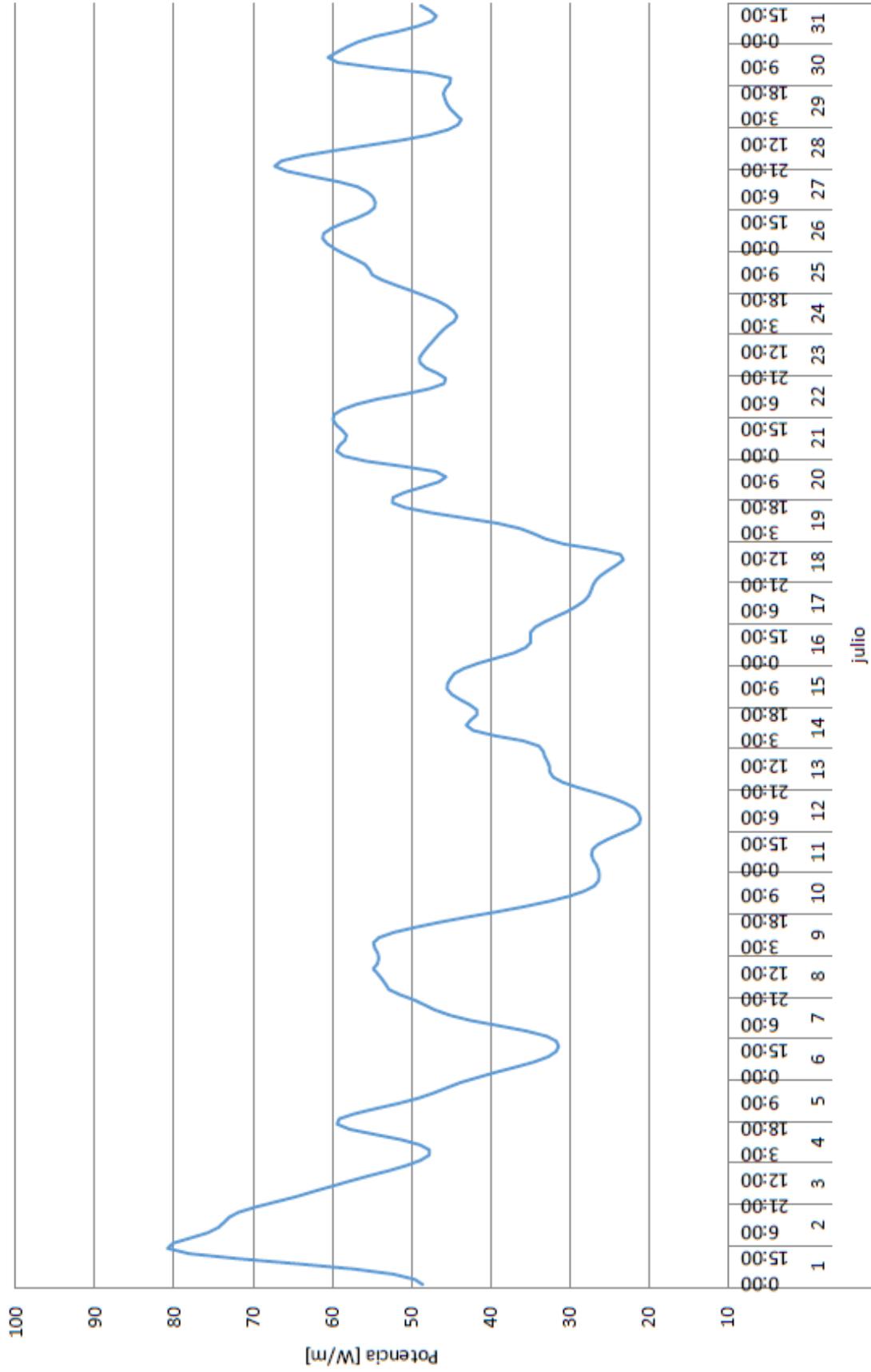
## Potencia por frente de ola mayo



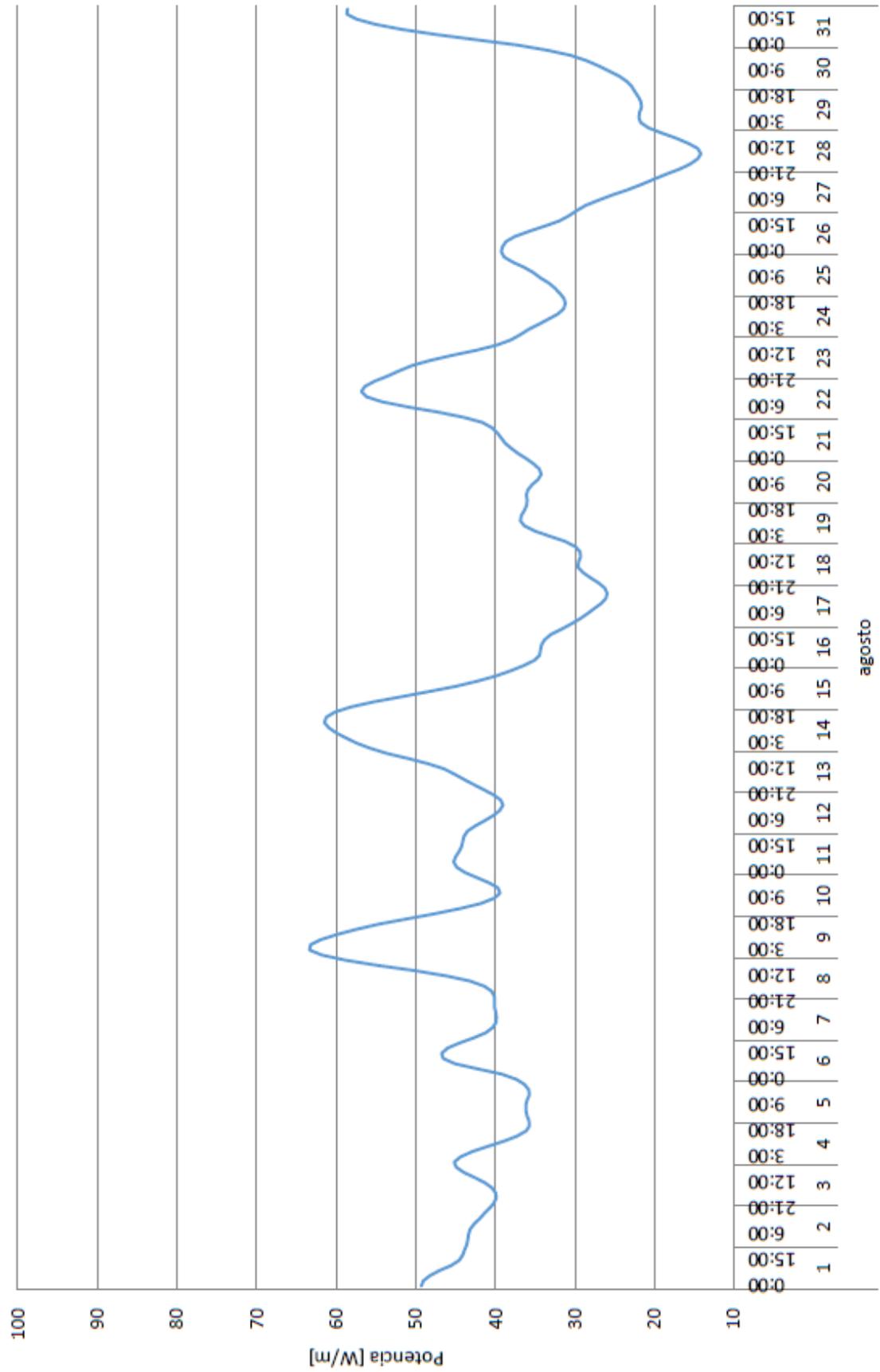
# Potencia por frente de ola junio



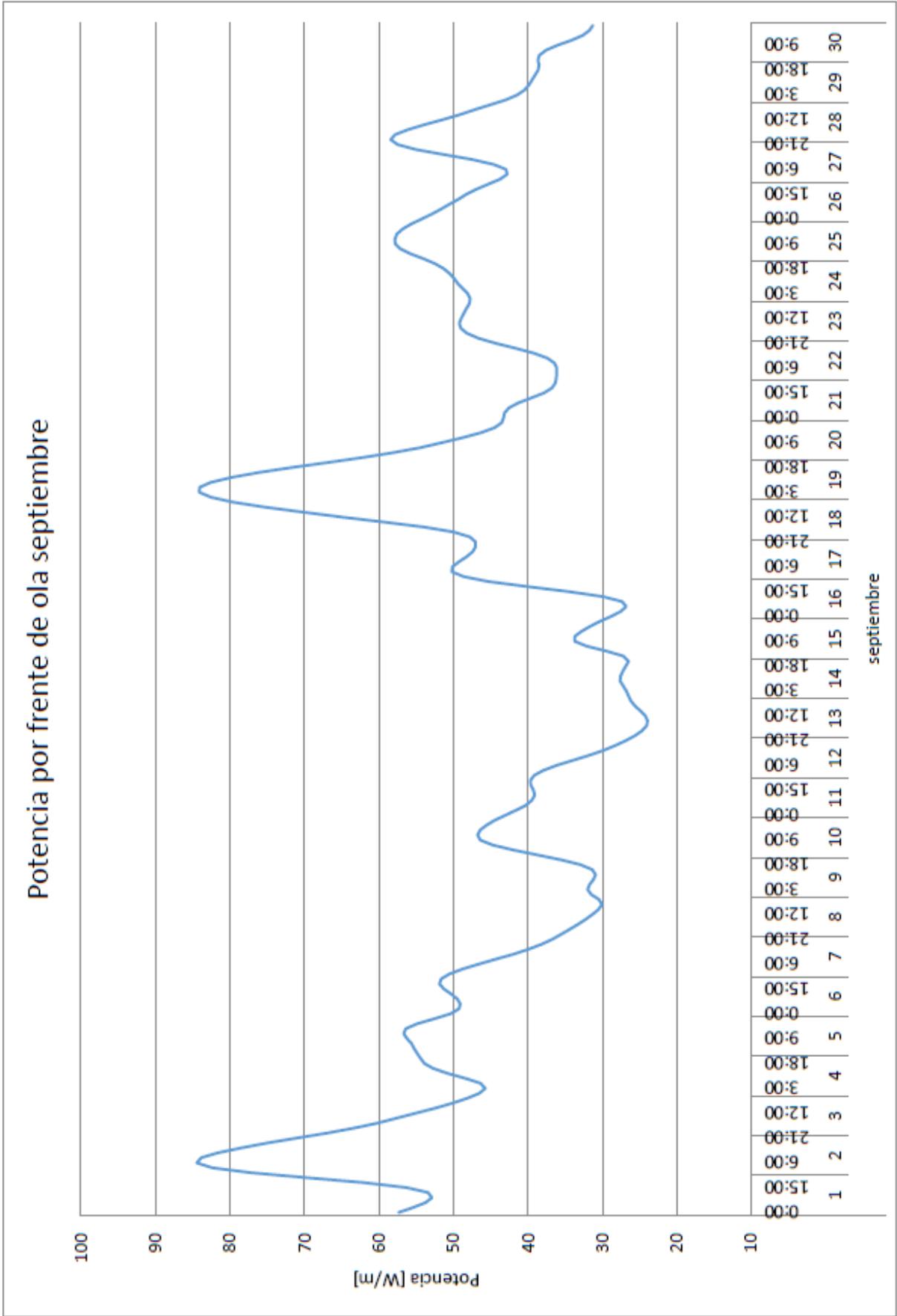
## Potencia por frente de ola julio

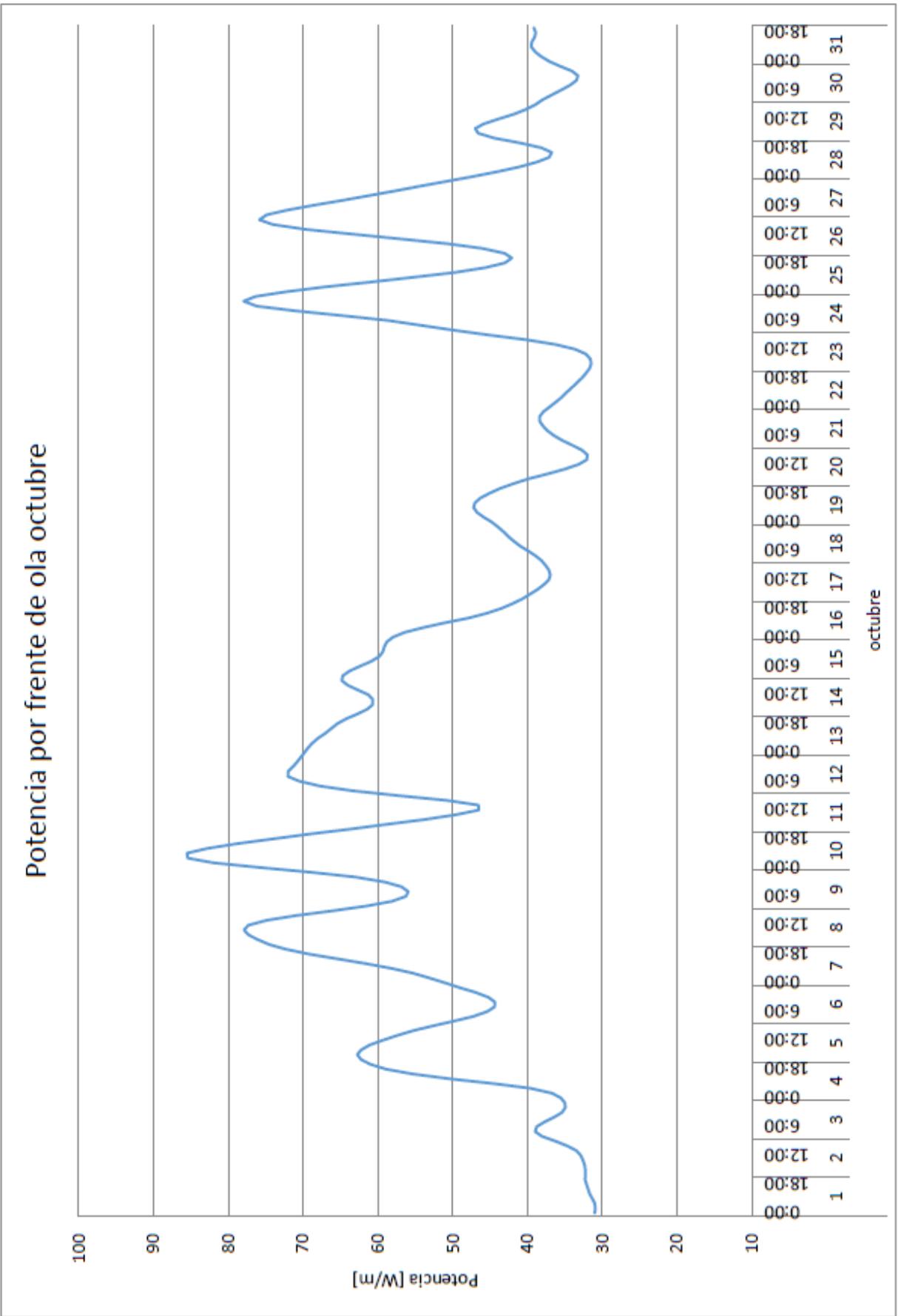


### Potencia por frente de ola agosto

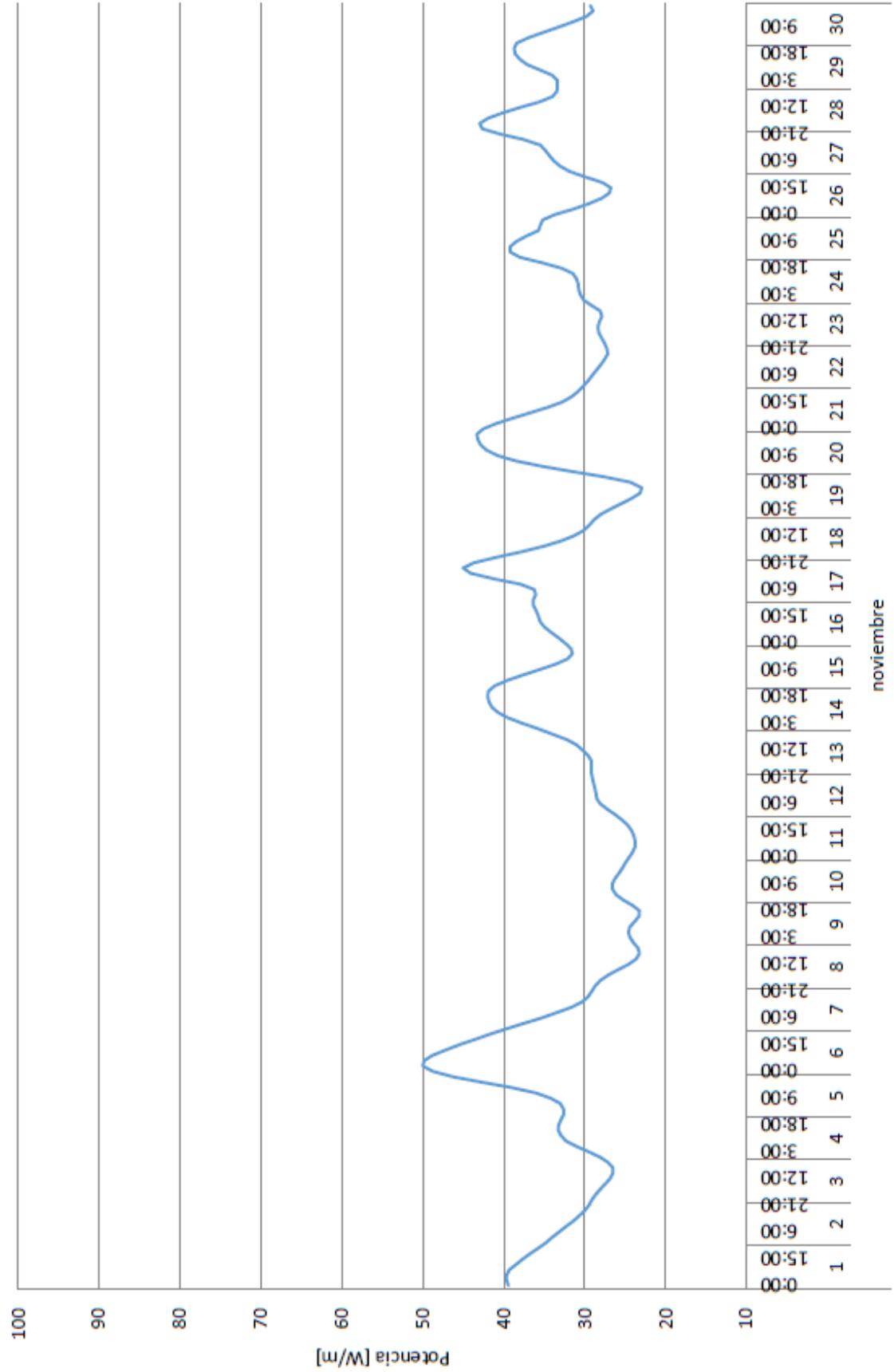


# Potencia por frente de ola septiembre

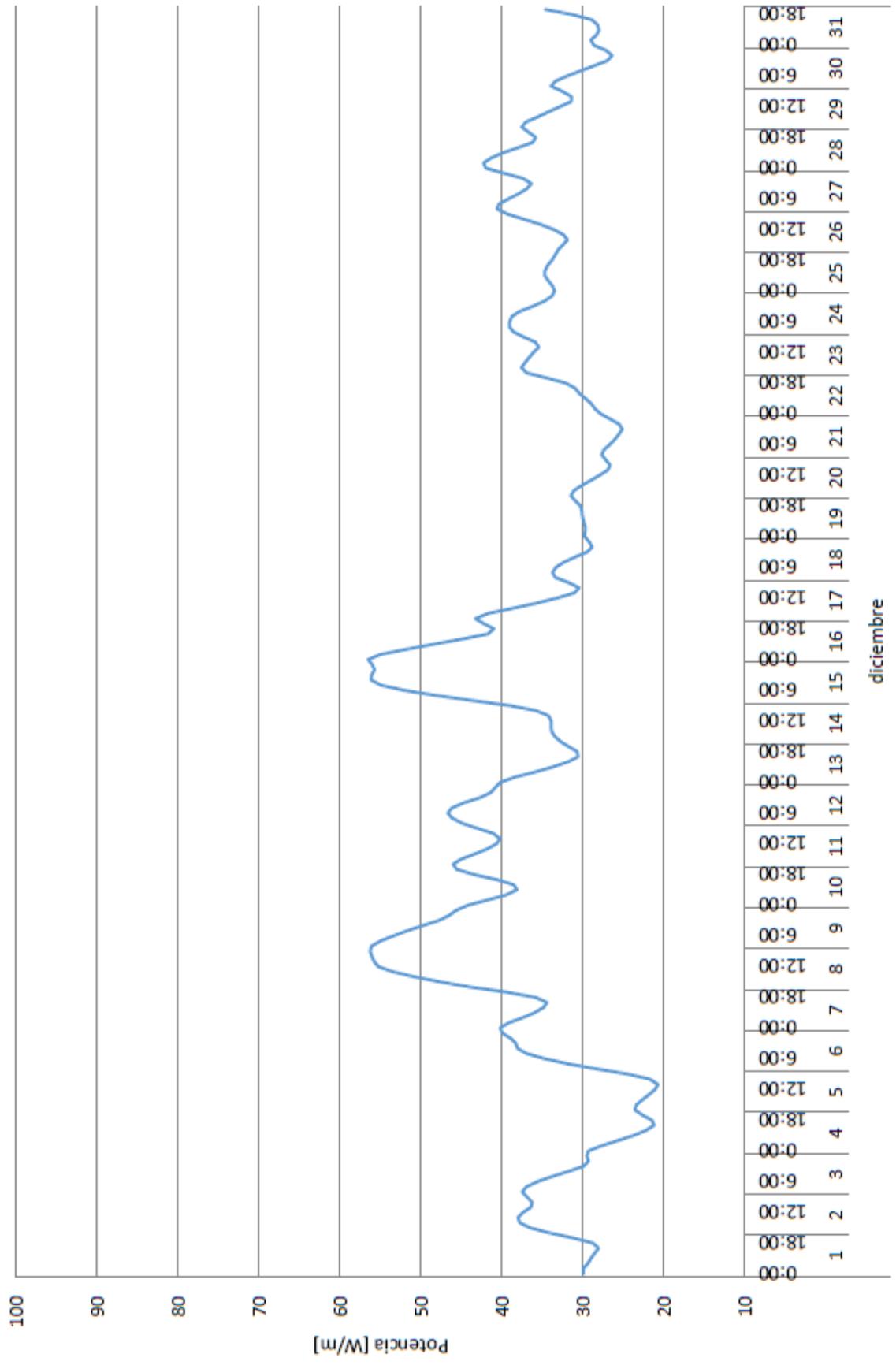




# Potencia por fente de ola noviembre



# Potencia por frente de ola diciembre



## B. Potencia mensual generada por parque undimotriz

