

UNIVERSIDAD DEL BÍO-BÍO
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA



**“ESTUDIO TÉCNICO ECONÓMICO PARA EL APROVECHAMIENTO DE ENERGÍA
UNDIMOTRIZ EN CHILE”.**

Informe de Habilitación Profesional
presentado en conformidad a los requisitos
para optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico.

Profesor Guía:
Sr. Reinaldo Sánchez A.

RODRIGO BIZAMA ZAMORA
CONCEPCIÓN – CHILE
2013

SUMARIO.

Un estudio técnico económico para el aprovechamiento de la energía undimotriz en Chile, se realizó en el marco de la presente habilitación profesional.

Para cumplir este objetivo, se estudiaron las características de las olas, principalmente las generadas por acción del viento y el efecto que ocasionan en la superficie del mar, luego se describieron las formas de captar la energía de las olas y los dispositivos undimotrices, explicando en forma general su funcionamiento, lo que llevó finalmente a la elección de los dispositivos Pelamis P-750 y Aquabuoy 2.0, que se analizaron en mayor profundidad.

Asimismo se estudiaron las zonas en Chile con mayor proyección futura para posibles pruebas o desarrollos de parques undimotrices, siendo las localidades de San Antonio, San Vicente y Corral las elegidas, concentrando el estudio final en Corral, por poseer mayor energía en el oleaje adyacente.

Por otro lado, se determinaron los aspectos legales que influyen en el tema y los aspectos ambientales a considerar.

Finalmente se evaluó la posibilidad de implementar dos parques undimotrices como pequeños medios de generación distribuida en Corral, con una potencia nominal de 4.5MW, dicho parámetro sirvió para determinar la potencia real que se generaría implementando ambos parques, como resultado se obtuvo, un parque Pelamis con 6 dispositivos y generando una potencia media anual de 1.66MW y un parque Aquabuoy de 18 dispositivos generando una potencia media anual de 1.94MW.

Por último la evaluación económica demostró ser concluyente para el parque Pelamis, ya que bajo distintos escenarios en el precio de la energía no logró ser viable económicamente. Por otra parte, el parque undimotriz Aquabuoy, resultó estar cerca de ser un proyecto viable, para este dispositivo se obtuvo un VAN de -3.632.848, un TIR de 7.2% y un PRI de 24 años (en el escenario optimista), lo que para ser tecnología nueva, se presenta como una buena alternativa, llegando a ser rentable para un precio en la venta de la energía de 158US\$/MWh.

ÍNDICE.	Pág.
CAPÍTULO I	
1.- Introducción	1
1.1.- Objetivo general.....	3
1.2.- Objetivos específicos	3
CAPÍTULO II	
2.- Antecedentes generales	4
2.1.- Matriz energética nacional	4
2.2.- Energías renovables no convencionales (ERNC)	6
CAPÍTULO III	
3.- Características de las olas del mar	9
3.1.- Origen de las olas del mar	9
3.2.- Clasificación de las olas del mar	10
3.2.1.- De acuerdo a las fuerzas perturbadoras	11
3.2.2.- De acuerdo al tiempo de aplicación de las fuerzas perturbadoras.....	12
3.2.3.- De acuerdo al periodo de duración	12
3.3.- Comportamiento de las olas generadas por el viento	13
3.4.- Teorías de las olas	16
3.4.1.- Teoría de olas lineal	16
3.4.1.1- Energía de las olas.....	18
3.4.1.2- Potencia de las olas	19
3.4.2.- Teoría de olas no lineal	19
3.4.2.1- Teoría de Stokes	19
3.4.2.2- Teoría de la onda solitaria	20
3.5.- El oleaje real	20
3.5.1.- Descripción geométrico-estadística.....	21
3.6.- Descriptores de ola	21
3.7.- Modificación de la energía de las olas	22

CAPÍTULO IV

4.- Sistemas de aprovechamiento de energía undimotriz	24
4.1.- Clasificación de los sistemas de conversión undimotriz.....	25
4.1.1.- De acuerdo a la posición relativa respecto de la costa	25
4.1.2.- De acuerdo a la posición relativa respecto del oleaje	26
4.1.3.- De acuerdo al principio de captación	27
4.1.4.- De acuerdo al modo de obtener la energía.....	31
4.2.- Conversión energética.....	32
4.3.- Dispositivos existentes.....	35

CAPÍTULO V

5.- Estudio y selección de las zonas de mayor potencial energético undimotriz en Chile	47
5.1.- Metodología para la estimación del potencial de las olas	48
5.2.- Metodología para la elección de la zona	50
5.2.1.- Resultados	54
5.2.1.1.- Resultados V región de Valparaíso.....	54
5.2.1.2.- Resultados VIII región del Bío-Bío	55
5.2.1.3.- Resultados XIV región de los Ríos y X región de los Lagos	56

CAPÍTULO VI

6.- Estudio y selección de los convertidores undimotrices más adecuados	58
6.1.- Selección de los dispositivos.....	58
6.2.- Estudio de los dispositivos	60
6.2.1.- Convertidor Pelamis.....	60
6.2.1.1.- Características del equipo.....	60
6.2.1.2.- Conversión energética	61
6.2.1.3.- Pérdidas y rendimientos	63
6.2.2.- Convertidor Aquabuoy	63
6.2.2.1.- Características del equipo.....	63
6.2.2.2.- Conversión energética	63

CAPÍTULO VII

7.- Aspectos medioambientales	66
--	-----------

CAPÍTULO VIII

8.- Aspectos legales	69
8.1.- Marco regulatorio aplicable a la energía marina en Chile	69
8.2.- Marco regulatorio referente a concesiones marinas	70
8.3.- Marco regulatorio referente a zonificación y uso de borde costero	71
8.4.- Marco regulatorio ambiental	71

CAPÍTULO IX

9.- Análisis de datos, obtención de potencia generada y factor de planta asociado	72
9.1.- Cálculo de potencia y energía	73
9.2.- Factor de planta o capacidad.....	74
9.3.- Características de la instalación	76

CAPÍTULO X

10.- Estudio y análisis económico	78
10.1.- Flujo de caja.....	78
10.1.1.- Ingresos	78
10.1.1.1.- Venta de energía.....	79
10.1.1.2.- Venta de Potencia.....	79
10.1.1.3.- Venta de bonos carbono.....	80
10.1.2.- Costos	80
10.1.2.1.- Costos de instalación	80
10.1.2.2.- Costos de operación y mantenimiento (O&M)	81
10.1.2.3.- Otros Costos	81
10.1.3.- Depreciación	82
10.1.4.- Capital de trabajo	82
10.2.- Resultados.....	82
10.3.- Análisis de sensibilidad.....	83
10.3.1.- Factor de capacidad.....	83
10.3.2.- Costos de inversión	84
10.3.3.- Tasa de descuento	85

CAPÍTULO XI

11.- Conclusiones	87
--------------------------------	-----------

CAPÍTULO XII

12.- Bibliografía	89
--------------------------------	-----------

CAPÍTULO XIII

13.- Anexos	91
13.1.-Anexo A.Cálculo de depreciación para parque undimotriz Pelamis y Aquabuoy	91
13.2.- Anexo B	92
13.2.1.- Flujos de caja parque PELAMIS, escenario Optimista en US\$	92
13.2.2.- Flujos de caja parque PELAMIS, escenario Moderado en US\$	94
13.2.3.- Flujos de caja parque PELAMIS, escenario Pesimista en US\$	96
13.2.4.- Flujos de caja parque AQUABUOY, escenario Optimista en US\$	98
13.2.5.- Flujos de caja parque AQUABUOY, escenario Moderado en US\$.....	100
13.2.6.- Flujos de caja parque AQUABUOY, escenario Pesimista en US\$	102

CAPÍTULO I.

1.- Introducción.

Actualmente Chile, como otras naciones emergentes, demanda una alta cantidad de energía eléctrica para su desarrollo, el crecimiento experimentado por los sectores industriales como el sector minero y sumado al aumento de la población urbana, crean la necesidad de contar con nuevas fuentes para la generación de energía eléctrica. Junto con esto, cabe mencionar que nuestro país posee una fuerte dependencia de energía primaria con nuestros vecinos y que gran parte de la energía que se consume actualmente, proviene de recursos no renovables tales como: el petróleo, gas y carbón; lo que provoca no solamente una falta de autonomía energética, sino también una falta de conciencia ambiental por el alto grado de contaminación que producen los recursos fósiles al ser quemados.

En Chile la Comisión Nacional de Energía (CNE), no solo está preocupada por estos temas, sino que también está trabajando por la futura incorporación de Energías Renovables No Convencionales (ERNC), a la matriz energética del país. Es por ello que la promulgación de la Ley 20.257 (publicada en Marzo del 2008), promueve las ERNC; como son las provenientes del viento, hidráulicas de pequeña escala (Hasta 20MW), biomasa, biogás, geotermia, sol y mar; de esta manera se pretende que de aquí al año 2024, el 10% de la oferta energética de las empresas de ese rubro, con una capacidad instalada superior a los 200MW provengan de ERNC.

Hoy en día existen algunas plantas de energía eléctrica basadas en ERNC, pero gran parte de ellas se centra en el desarrollo de energías como la eólica, solar, biomasa e hídrica, dejando de lado una de las energías con mayor presencia y potencial en este país, que es la energía proveniente del mar.

Puede ser por la falta de estudios o porque las tecnologías de aprovechamiento undimotriz están en una etapa temprana de desarrollo, el poco interés en usar este recurso, pero el potencial que posee Chile en sus 4.270km de costa, que están cerca de los 164 GW, no deben ser despreciados, es por eso que el Instituto Nacional de Hidráulica (INH), por medio de proyectos de investigación, pretende generar el conocimiento en cuanto a la disponibilidad y seguridad de este recurso, para poder en un futuro, incluirla dentro del escenario energético que posee este país.

En esta habilitación profesional, se estudiará la energía presente en el mar, enfocándose en la energía que poseen las olas, más conocida como energía Undimotriz u Olamotriz. Al mismo tiempo se estudiarán los dispositivos existentes en el mundo para la captación de energía de las olas y se estimará el potencial energético undimotriz de Chile y las zonas con mayor potencial para implementar estas tecnologías y finalmente se pretende estudiar y evaluar los costos asociados al funcionamiento de parques undimotrices.

1.1.- Objetivo general.

- Realizar un estudio técnico y económico de producir energía eléctrica en Chile, mediante el aprovechamiento de la energía undimotriz.

1.2.- Objetivos específicos.

- Conocer las características que presentan las olas del mar generadas por el viento.
- Identificar los dispositivos de generación eléctrica existentes en el mundo, basadas en la energía de las olas de mar.
- Establecer las zonas en Chile con mayor potencial energético olamotriz, para un posible desarrollo en el aprovechamiento de este recurso.
- Determinar los sistemas más eficientes y de mayor proyección para la generación de electricidad proveniente de la energía undimotriz.
- Evaluar técnicamente el generar energía eléctrica como pequeño medio de generación distribuida.
- Analizar económicamente el costo de generar electricidad a partir de la energía de las olas del mar.

CAPÍTULO II.

2.- Antecedentes generales.

El desarrollo del presente trabajo, comienza con una visión general del escenario energético actual que presenta nuestro país, referente a la capacidad instalada, los sistemas que componen la matriz energética nacional y el desarrollo de las ERNC.

Es necesario conocer la realidad energética nacional, para así poder estimar el verdadero impacto de promover el uso de la energía undimotriz.

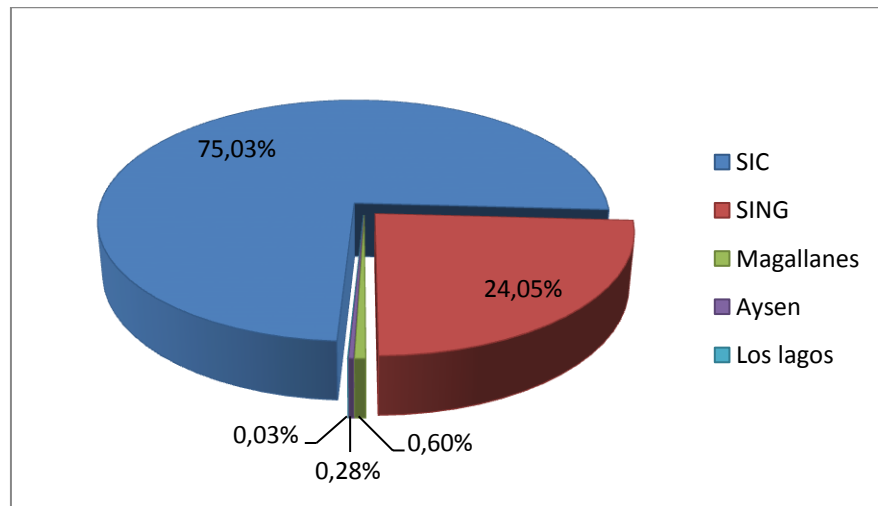
2.1.- Matriz energética nacional.

Chile posee una matriz energética con una capacidad instalada de 16.480 MW a Diciembre de 2011 [1], esta energía es la suma de cinco sistemas: El primero de ellos es el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING), el que abastece los consumos eléctricos ubicados en las regiones I y II del país, el SING posee una capacidad instalada de 3.963,8 MW, donde aproximadamente, el 90% de su consumo está compuesto por grandes clientes, mineros e industriales; el segundo es el Sistema Interconectado Central (SIC), el cual es el principal sistema eléctrico del país, el que entrega suministro eléctrico al 90% de la población nacional: desde Taltal por el norte, hasta Chiloé al sur, su capacidad instalada es de 12.365 MW y al contrario del SING, el SIC entrega un 60% de su energía a clientes regulados¹; el tercer sistema es el Sistema de Aysén que atiende el consumo eléctrico de la XI región, su capacidad instalada es de 46,69 MW y la generación, transmisión y distribución de la energía está en manos de una sola empresa llamada EDELAYSEN S.A. que atiende a 26.000 clientes; el cuarto sistema es el de Magallanes y está constituido por cuatro subsistemas eléctricos: Los sistemas de Punta Arenas, Puerto Natales, Puerto Williams y Puerto Porvenir, en la XII región, su capacidad instalada es 99,6 MW y al igual que el sistema de Aysén, la generación, transmisión y distribución eléctrica está en manos de EDELMAG S.A. que atiende a 50.000 clientes aproximadamente y el quinto sistema es el de Los Lagos, es el más pequeño de todos, con una capacidad instalada de 5.04 MW [2].

¹Clientes regulados: consumidores cuya potencia conectada es igual o inferior a 2 MW y se rigen a una tarifa regulada.

Los aportes de los sistemas mencionados, a la matriz energética nacional, se representan en la figura 2.1.

Figura 2.1.- Capacidad instalada de generación nacional.



Fuente: [1]

El SIC y SING aportan con un poco más del 96% de la energía total que se produce en el país, dentro de esa cantidad 10.358 MW son producidos por centrales termoeléctricas y 5.873 MW por centrales hidroeléctricas, lo que muestra la fuerte dependencia de combustibles fósiles en donde un 72% de los combustibles son importados lo que sumado a la inestabilidad en el suministro del gas Argentino y al alza de precios internacionales, genera un aumento de los costos marginales de generación de electricidad y por ende el aumento del precio de la electricidad, que en Chile se ubica en uno de los valores más altos de Latinoamérica y por sobre el promedio de la OCDE².

Para el 2020 se proyectan en nuestro país tasas de crecimiento del consumo eléctrico en torno al 6 y 7% [3], lo que se traduce en un aumento de la oferta de 8.000 MW a la matriz energética nacional, esto muestra el enorme desafío energético al que se enfrenta nuestra nación, y es ahora el momento de contar con los recursos energéticos suficientes, propios y competitivos para sostener el crecimiento.

²OCDE: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico.

2.2.- Energías renovables no convencionales (ERNC).

Como se ha planteado, nuestro país requerirá en un futuro de mayor energía, para sostener el desarrollo económico, pero esa energía no puede generarse de la manera que se ha hecho hasta ahora, es necesario que la nueva forma de generar energía, sea de manera sustentable, autónoma y con los resguardos para la salud y el medio ambiente, un avance de ello es la ley de control de emisiones para las centrales termoeléctricas, dictada en el 2011.

El concepto de ERNC, proviene de la década de los setenta, debido a crisis por el petróleo en el mundo, pero en ese entonces Chile, sólo se limitó a realizar estudios preliminares, que sirvieran de base para el futuro. Luego con el avance de los años, en la década de los noventa, producto de sequías y racionamiento eléctrico, sumado a los cortes de suministro de gas provenientes de Argentina, durante el 2004, el Gobierno de Chile potenció el interés de las ERNC para aumentar la capacidad de la matriz energética e incrementar la seguridad medioambiental y de salud.

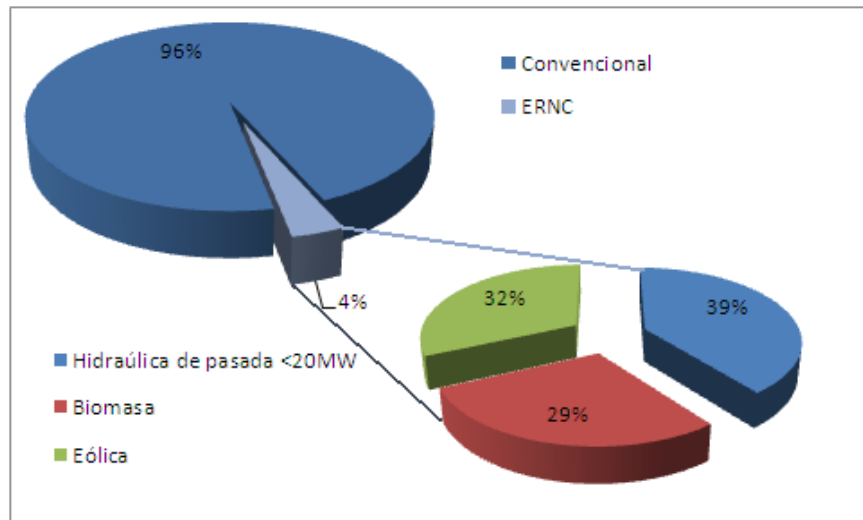
Para incentivar el aumento de las ERNC, en los años 2004 y 2005 se implementaron las leyes cortas I y II, las que promovían la inversión de proyectos tradicionales y no convencionales.

Aunque estas leyes trataban de generar un incentivo en la inversión de ERNC, dejaban barreras de entradas para el ingreso de las ERNC al sistema eléctrico nacional, alguna de las barreras era determinar los costos reales operación e inversión, precios bajos en la compra de energía en comparación con los costos de inversión asociados y dificultad de suministrar energía a las redes de media o baja tensión, por motivos administrativos como legales.

Para eliminar las barreras que resultaron de la promulgación de las leyes cortas I y II, en Marzo del 2008, entra en vigencia la ley 20.257, esta nueva ley exige a las empresas que generan energía eléctrica, con una capacidad instalada superior a 200 MW, que un porcentaje de la energía suministrada a cualquier sistemas, debe provenir en la generación propia o contratos de ERNC, esta exigencia comenzará con un 10% entre el 2010 y 2014, aumentando en un 0.5% anual, hasta llegar a un 10% en 2024.

Hasta el mes de Diciembre del 2011, las centrales para la generación de energía eléctrica, estaban distribuidas como lo muestra la figura 2.2. La matriz energética de hoy, no difiere de la que había hace un año y ese 4% correspondiente a centrales en base a ERNC (hidráulicas de pasada (<20 MW), biomasa y eólicas), busca aumentar su participación en el mercado nacional.

Figura 2.2.- Tipos de centrales generadoras de electricidad en Chile.

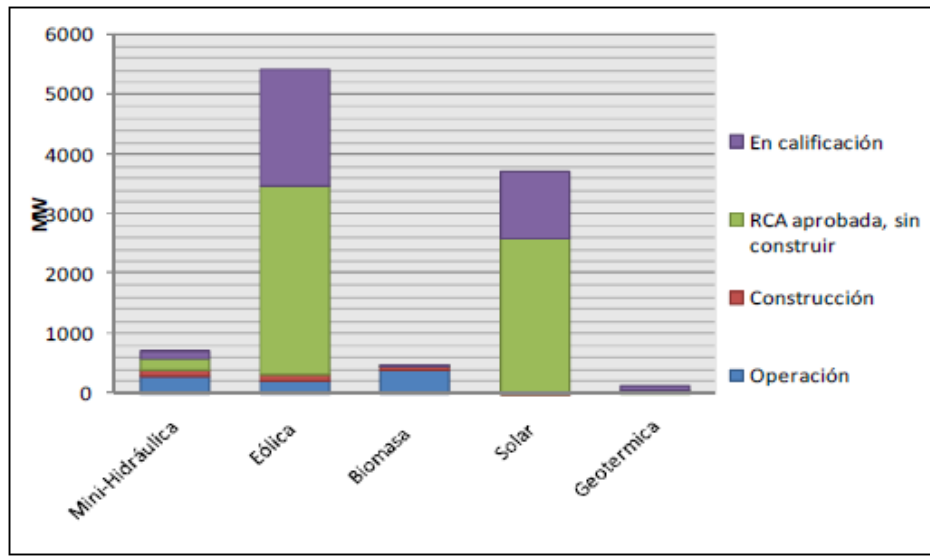


Fuente: [1]

En Octubre del 2012 ingresaron 8 proyectos por un total de 742 MW, correspondientes a dos proyectos mini hidráulicos, dos eólicos y cuatro solares, estos proyectos pretenden aumentar la capacidad instalada en base a ERNC. Por otra parte hoy en día hay en construcción dos proyectos eólicos y cinco solares, que representan una inyección de 840 MW y que se concentraran en la II y III región del país [4].

El boletín del centro de energías renovables (CER), de Noviembre del 2012, entrega la realidad acerca del estado actual de las ERNC, esa realidad queda plasmada en la figura 2.3 y muestra que las centrales solares y geotérmicas, ya están próximas a aportar a la matriz energética de nuestro país y eso es posible debido al avance tecnológico y de estudios referente a esas tecnologías.

Figura 2.3.- Estado global ERNC en Chile (MW).



Fuente: [4]

Actualmente trabajan en cooperación el Ministerio de Energía con la Universidad de Chile, los cuales tratan de determinar con mayor exactitud, el potencial bruto de energías marinas presentes a lo largo de nuestro país. A esto se deben sumar dos proyectos financiados por la empresa HydroChile y cofinanciados, uno por CORFO y otro por Fondef. El primero desarrollado por el Instituto Nacional de Hidráulica (INH), que tiene por objetivo desarrollar un catastro de la energía undimotriz entre la V y la X región de Chile. El segundo, que comenzó a operar en Septiembre del 2011 y es desarrollado por la Pontificia Universidad Católica y su objetivo es cuantificar la energía disponible en las corrientes mareales del Canal del Chacao [5].

Estos antecedentes, sumados al conocimiento que se tiene del potencial energético undimotriz para las costas Chilenas, son la base de esta habilitación profesional.

CAPÍTULO III.

3.- Características de las olas del mar.

3.1.- Origen de las olas del mar.

El mar posee una enorme reserva de energía, Chile dentro de sus 4.270 km de costas, tiene un alto potencial, aun sin explorar. Dentro de las energías que posee el mar, la energía undimotriz posee un gran potencial para la generación de electricidad.

La energía undimotriz u olamotriz, es aquella que se produce por el movimiento de las olas del mar, estas olas son el resultado de múltiples causas, como son: la fuerza de gravedad que ejercen el sol y la luna, los maremotos, tormentas y como principal factor, el viento.

Las olas del mar, son todo tipo de oscilaciones en la superficie del agua, corresponden a un derivado terciario de la energía solar, ya que el viento se origina de la radiación solar incidente sobre la superficie de la Tierra, en donde una fracción se invierte en un calentamiento desigual de la misma, lo que provoca en la atmósfera zonas de altas y bajas presiones, generando desplazamientos del aire (viento) de mayor o menor intensidad. El oleaje es una consecuencia del rozamiento del aire sobre la superficie del mar, el que produce un cierto arrastre, provocando rizaduras o arrugas en la superficie del agua, luego cuando la superficie pierde su lisura, el efecto de fricción se intensifica y crea olas de gran tamaño y al aumentar este proceso, aumenta la energía que adquiere la ola.

Con respecto a la energía que absorbe la ola en el proceso de formación, por acción del viento, gran parte proviene del sol y como el nivel de radiación solar es 375 W/m^2 , aproximadamente 1 W/m^2 se transmite al oleaje, que actúa como un acumulador de energía, por cuanto al tiempo que la recibe, la transporta de un lugar a otro y la almacena; la intensidad del oleaje, depende de la intensidad del viento, de su duración y de la longitud sobre la cual éste transmite energía a la ola [6].

La capacidad que se menciona, al hecho de almacenar energía y trasladarse grandes distancias sin perder prácticamente potencia alguna, se debe a que la densidad del aire es mucho menor que la del agua, por lo que las partículas en la superficie tienen más libertad para trasladarse, de este modo, las olas se propagan por la superficie del mar y no hacia el fondo. Gracias a este fenómeno, la energía que se genera en cualquier lugar del océano, termina en las costas continentales.

Si bien las pérdidas de energía en el trayecto de las olas, desde mar adentro, son mínimas, al llegar a la costa se acentúan debido a la interacción de las olas con el borde costero, sin embargo, esta disipación de energía, se puede compensar con fenómenos naturales como son la reflexión o la refracción, fenómenos que se estudiaron al final de este capítulo.

3.2.- Clasificación de las olas del mar.

Las olas del mar están formadas por muchos tipos de ondas, existen ondas senoidales o compuestas de varias sinusoides, ondas troncooidales y ondas que tienen perfiles insólitos, ondas progresivas y estacionarias, ondas amortiguadas, ondas superficiales, ondas medias, ondas que llegan a la superficie del mar y ondas que se manifiestan en profundidad en contacto con aguas de temperatura y salinidad diferentes. Pero en rasgos generales, destacan dos tipos de ondas, dependiendo del tipo de movimiento: **estacionarias y progresivas o transitorias** [6].

- **Ondas estacionarias:**

Son aquellas ondas que poseen uno o varios puntos (o líneas), en los que el movimiento es cero (puntos nodales) y uno o más puntos donde el movimiento es máximo (puntos ventrales). La distancia entre los nodos y la frecuencia de la oscilación, dependen de las dimensiones geométricas de la cuenca en que se produzcan.

- **Ondas progresivas o transitorias:**

Son aquellas ondas donde todos los puntos pertenecientes a la onda, varían en el tiempo y el espacio; se forman en la superficie (provocadas por el viento), como en el interior de la masa oceánica.

Esta clasificación resulta ser muy generalizada, por lo que para hacer más comprensible su caracterización y facilitar los cálculos posteriores, la clasificación se realizó utilizando otros parámetros físicos, detallados a continuación [7]:

3.2.1.- De acuerdo a las fuerzas perturbadoras:

En esta clasificación, el movimiento de las olas es generado por tres tipos de fuerzas, que se aprecian en la figura 3.1 y que son las siguientes:

- **Ondas generadas por el viento:**

Estas ondas, generadas por el viento, ofrecen el mayor nivel de energía para producir electricidad y están asociadas a períodos de segundos e incluso de minutos.

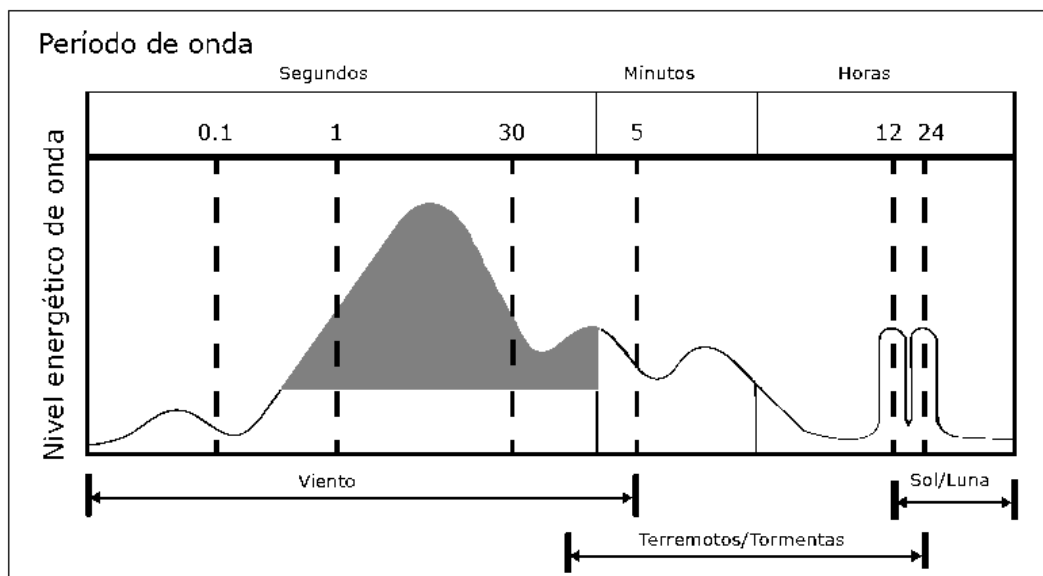
- **Ondas generadas por terremotos y tormentas:**

Estas ondas son de período largo y progresivo, se presentan mar adentro para propagarse hasta la costa.

- **Ondas generadas por atracción del Sol y la Luna:**

A este tipo de onda se le conoce como marea, su período es más largo que las anteriores, generalmente de 12 a 24 horas, son provocadas por fuerzas gravitatorias de los astros con el mar.

Figura 3.1.- Espectro energético del oleaje, según fuerza perturbadora.

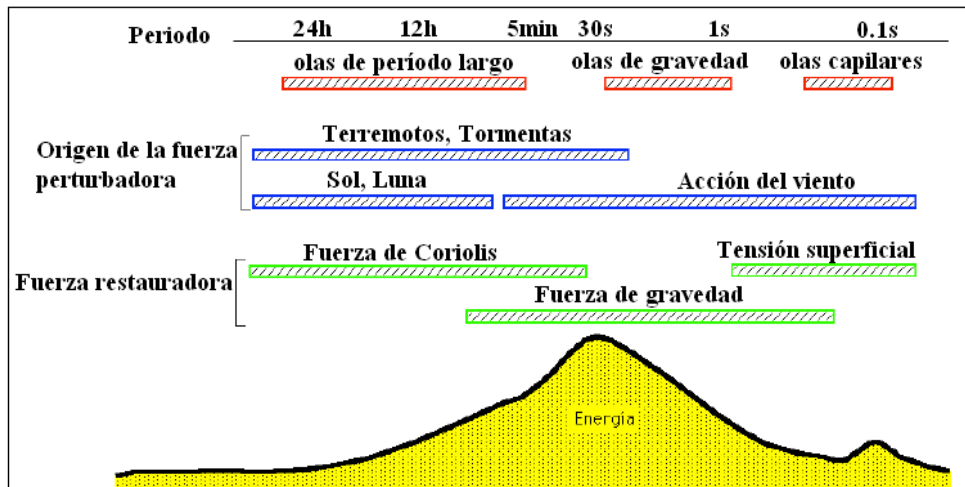


Fuente: [8]

Las ondas que se producen en base a fuerzas perturbadoras, son restringidas por la acción de las fuerzas restauradoras, estas fuerzas se muestran en la figura 3.2 y corresponden a la fuerza de

Coriolis, la fuerza de gravedad y la Tensión superficial. Cada una de estas fuerzas actúa a diferentes períodos y por ende afectan a distintas ondas que se generan por las fuerzas perturbadoras.

Figura 3.2.- Tipos de olas que existen en la superficie del océano y de la energía en ellas contenida.



Fuente: (6)

3.2.2.- De acuerdo al tiempo de aplicación de las fuerzas perturbadoras:

En esta categoría, la clasificación de la onda, va más allá del tipo de fuerza, se concentra el tiempo que actúa las fuerzas previamente descritas; se clasifican en:

- **Ondas libres:**

Son generadas por una aplicación instantánea de la fuerza perturbadora que cesa al momento y deja evolucionar libremente la ola.

- **Ondas forzadas:**

A diferencia de las anteriores, la perturbación se aplica de manera continua, un ejemplo son las olas de marea.

3.2.3.- De acuerdo al período de duración:

En esta categoría, la clasificación de las olas se basa en el conocimiento de las anteriores, se relaciona con las fuerzas perturbadoras y con las fuerzas restauradoras, su relación se representa en la figura 3.2 y la clasificación es la siguiente:

- **Olas de período largo:**

Son las olas de períodos comprendidos entre 5 minutos y 24 horas, en este grupo están las mareas, Tsunamis y otras olas provocadas por terremotos y tormentas.

- **Olas de gravedad:**

A este grupo corresponden las olas cuya fuerza restauradora principal es la gravedad. Ésta provoca una oscilación o movimiento orbital de las partículas de agua. Pueden viajar largas distancias y romper muy lejos de su punto de origen. Son las olas que se estudian para obtener energía eléctrica. Su período está entre 1 segundo y 30 segundos.

- **Olas capilares:**

Tienen un papel importante en la transferencia de energía del aire al agua para formar las corrientes superficiales, sin embargo, no representan una energía significativa dentro del conjunto global. Su período es el más corto y corresponde a menos de 0,1 segundo.

3.2.4.- De acuerdo a la longitud de onda (9):

Esta categoría clasifica a las ondas en dos grupos básicos, que dependen de la distancia consecutiva entre dos alturas de olas. Su clasificación es la siguiente:

- **Ondas largas:**

Principalmente son las ondas solitarias y los tsunamis, ondas típicamente progresivas que son más propias del océano Pacífico. Se generan a partir de terremotos costeros y se propagan desde el epicentro oceánico hasta las costas provocando cuantiosos daños allí por donde pasan.

- **Ondas cortas:**

Son las que normalmente se producen por la acción del viento. Su longitud de onda es considerablemente menor que la profundidad del mar por donde se desplazan.

De esta clasificación se desprende que la mayor energía, es la que se puede obtener de las ondas cortas y con períodos entre 5 minutos y 1 segundo, cuya generación depende de la fuerza del viento.

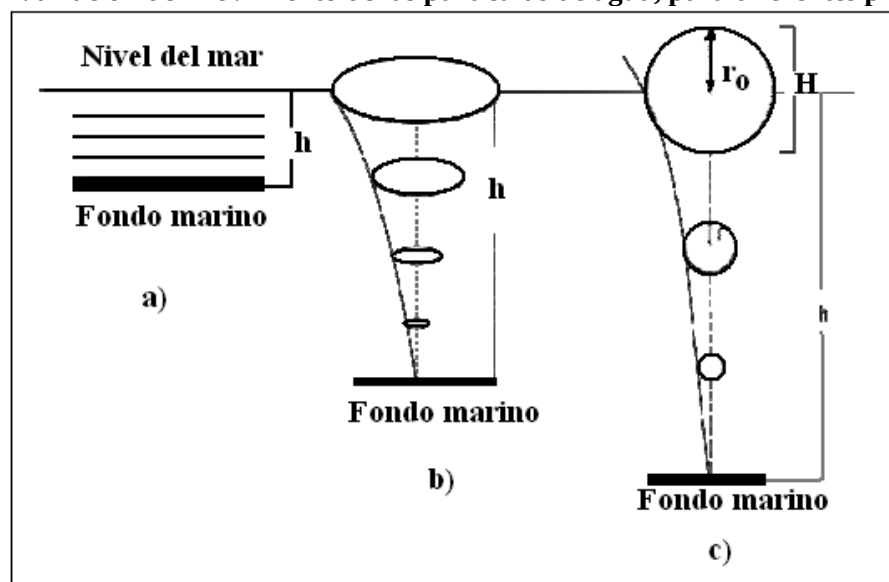
3.3.- Comportamiento de las olas generadas por el viento.

Al clasificar las olas, de acuerdo a las fuerzas que las generan, se estableció, que la mayor concentración de energía, se obtiene de las olas generadas por el viento, ya que es el agente

perturbador que actúa casi de manera constante, por esta razón, se analizó el comportamiento que poseen las olas de este tipo.

Cuando se habla de ola de mar, se refiere a la perturbación que sufre el agua en la superficie, por acción del viento, estas perturbaciones se desplazan en la misma dirección del viento, cabe mencionar, que lo que se traslada es la onda y no las partículas de agua, las que al ser perturbadas, se mueven en patrones lineales, elípticos o circulares, dependiendo de la profundidad del lecho marino a la que se encuentren, como lo muestra la figura 3.3.

Figura 3.3.- Variación del movimiento de las partículas de agua, para diferentes profundidades.



Fuente: [7]

Una clasificación mas detallada del oleaje, en función de la profundidad del lecho marino y la longitud de onda es la siguiente [7]:

a) Aguas someras:

Las partículas de agua notan la existencia próxima del lecho marino. En el caso extremo, el movimiento vertical quedaría totalmente impedido, teniendo una trayectoria recta horizontal. Se cumple que $\frac{1}{25} > \frac{h}{\lambda}$.

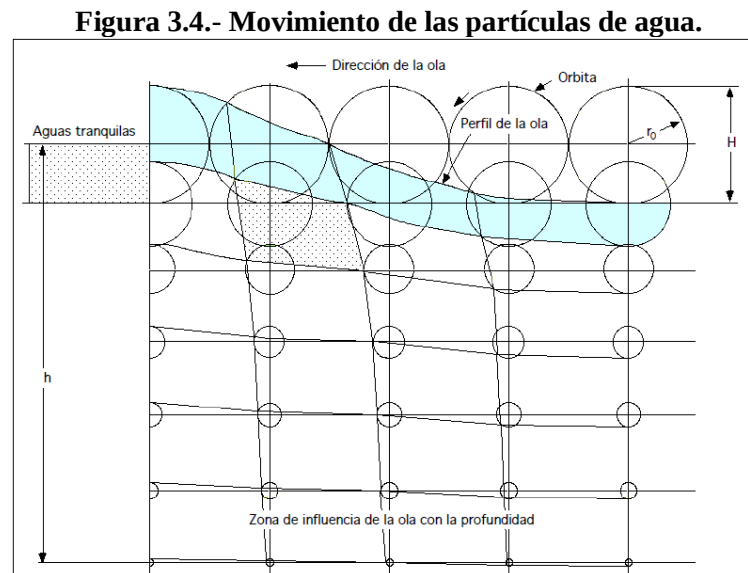
b) Aguas intermedias:

Las olas empiezan a notar el fondo y la velocidad del tren de olas pasa a depender de la profundidad. Ésta zona se encuentra en el intervalo $\frac{1}{25} < \frac{h}{\lambda} < \frac{1}{2}$ de profundidad relativa. La trayectoria de las partículas es elíptica.

c) Aguas profundas:

El oleaje se propaga sin interacción con el fondo, la velocidad del tren de olas (c) es independiente de la profundidad. La órbita que describen las partículas es de tipo circular y cumplen la relación $\frac{h}{\lambda} > \frac{1}{2}$.

Otra manera de clasificar las olas del mar, generadas por la acción del viento, es de acuerdo al perfil que presenta, el cual depende de la altura (H) y longitud de la ola (λ), figura 3.4



Fuente: [6]

Este perfil se caracteriza por la relación $\frac{H}{\lambda}$, y se clasifica de la siguiente manera [6]:

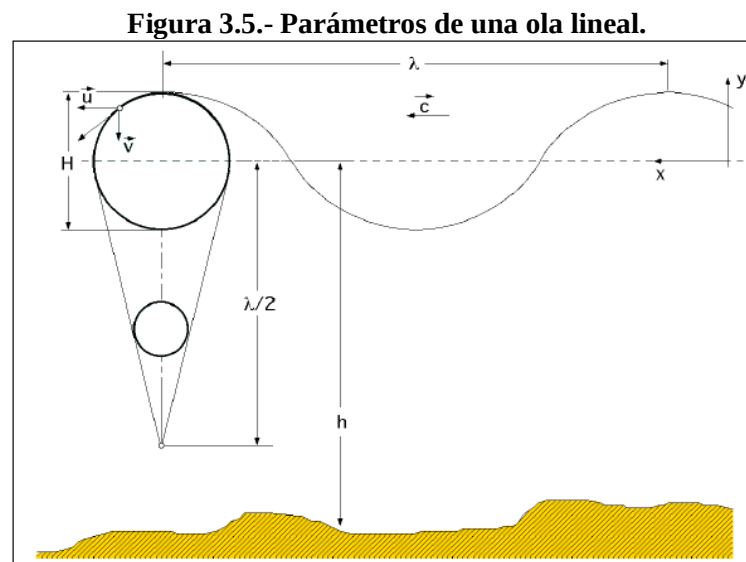
- Cuando la relación $\frac{H}{\lambda}$ es menor a $\frac{1}{50}$, se habla de olas con grandes longitudes de onda ($>1\text{km}$) y pequeñas alturas (0.01 a 1m), cuyo comportamiento se asimila a una onda sinusoidal de periodo (T) largo, este tipo de onda se puede estudiar utilizando la Teoría de ondas lineal, basada en sus características cinemáticas.
- Si la relación $\frac{H}{\lambda}$, es mayor a $\frac{1}{7}$, implica rotura de la ola, y su estudio se determina utilizando la Teoría no lineal.

3.4.- Teorías de las olas.

3.4.1.- Teoría de olas lineal.

Esta teoría se aplica a las denominadas olas cortas, que corresponden a las olas, cuya velocidad (c) es independiente de la profundidad del mar (h), pero que dependen de la longitud de onda (λ) y que se generan por acción del viento, es decir, este estudio analiza las olas en aguas profundas donde no interviene el fondo del lecho marino.

Esta teoría considera el estudio sobre el desplazamiento vertical, período, longitud de onda y velocidad de traslación, parámetros que se muestran en la figura 3.5.



Fuente: [6]

- **Desplazamiento vertical de la ola (y).**

Corresponde al desplazamiento libre de la ola, con coordenadas (x , y) y cuya referencia relativa es el nivel del mar, su movimiento se rige por la siguiente ecuación:

$$y = \frac{H}{2} \cos \left(\frac{2\pi x}{\lambda} - \frac{2\pi t}{T} \right) \quad m \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde:

x Coordenada del desplazamiento horizontal. Se mide en (m).

λ	Longitud de onda. Se mide en (m).
H	Altura de la ola. Se mide en (m).
t	Tiempo. Se mide en (s).
T	Período. Se mide en (s).

- **Período (T).**

El período en una ola, corresponde al tiempo transcurrido entre dos crestas o dos valles consecutivos, se determina de acuerdo a la siguiente expresión matemática:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} (s) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

ω Frecuencia angular. Se mide en $\frac{rad}{s}$.

Para $h > \frac{\lambda}{2}$ el período se puede calcular de la siguiente manera:

$$T = \frac{2\pi c}{g} \quad s \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde:

c Velocidad de traslación. Se mide en $\frac{m}{s}$

- **Longitud de onda (λ).**

Se refiere a la distancia que separa dos crestas consecutivas, Para $h > \frac{\lambda}{2}$ la longitud de onda se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$\lambda = \frac{gT^2}{2\pi} \quad m \quad \text{Ecuación 4}$$

Donde:

g Aceleración de gravedad. Se mide en $\frac{m}{s^2}$.

- **Velocidad de traslación o celeridad (c).**

Es la velocidad a la que se traslada la onda generada por el viento, se expresa de la siguiente manera:

$$c = \frac{\lambda}{T} \quad \frac{m}{s} \quad \text{Ecuación 5}$$

- **Velocidad o celeridad del grupo (c_g).**

Esta velocidad, que está relacionada con la velocidad de propagación de la ola c , es a la que se transmite la energía en un sistema de oleaje. Se puede determinar utilizando la siguiente ecuación:

$$c_g = \frac{c}{2} = \frac{gT}{4\pi} \quad \frac{m}{s} \quad \text{Ecuación 6}$$

3.4.1.1- Energía de las olas.

Todas las partículas de agua poseen energía potencial y energía cinética, para poder establecer una expresión matemática que pueda establecer la energía que posee una ola, es necesario caracterizarla como una onda regular, donde los valores de la longitud de onda y el período permanecen constantes. El valor de la energía se puede obtener mediante la ecuación 7.

$$E = E_p + E_c = \frac{\rho g \lambda b H^2}{8} \quad J \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde:

ρ Densidad del agua. Se mide en $\frac{kg}{m^3}$.

H Altura de la ola (Distancia entre la cresta y el valle). Se mide en (m).

b Frente o ancho de ola. Se mide en (m).

3.4.1.2- Potencia de las olas.

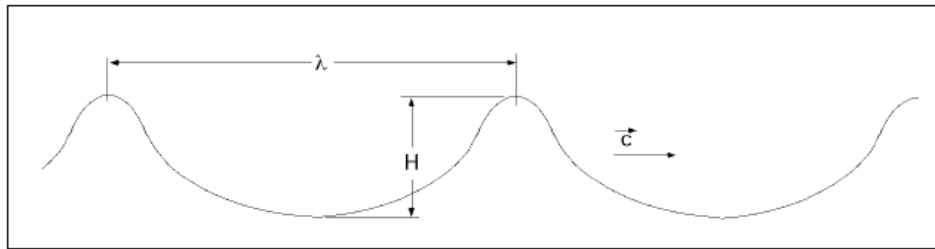
La potencia idealizada de una ola, presente en aguas poco profundas, se calcula mediante la siguiente ecuación, considerando un metro, como ancho de la ola:

$$N_l = \frac{\rho g H^2 c_g}{8} \frac{W}{m} \quad \text{Ecuación 8}$$

3.4.2.- Teoría de olas no lineal.

En esta teoría, las olas se estudian considerando la profundidad del lecho marino (h), que influye en el comportamiento de la ola, se determinarán las expresiones matemáticas para los mismos factores previamente mencionados en la teoría lineal, estas olas poseen forma como la representada en la figura 3.6 y su estudio se basa en dos teorías, la teoría de Stokes y la teoría de la onda solitaria.

Figura 3.5.- Ola no lineal (Stokes).



Fuente: [6]

3.4.2.1- Teoría de Stokes.

Para describir las olas de características no lineales, para aguas poco profundas, Stokes propone ecuaciones para la energía y potencia de la ola, que se detallan de la siguiente manera:

- **Energía de la ola.**

$$E = \frac{\rho g H^2 \lambda b}{8} \left(1 + \frac{9H^2}{64 \frac{2\pi}{\lambda}^4 h^6} \right) J \quad \text{Ecuación 9}$$

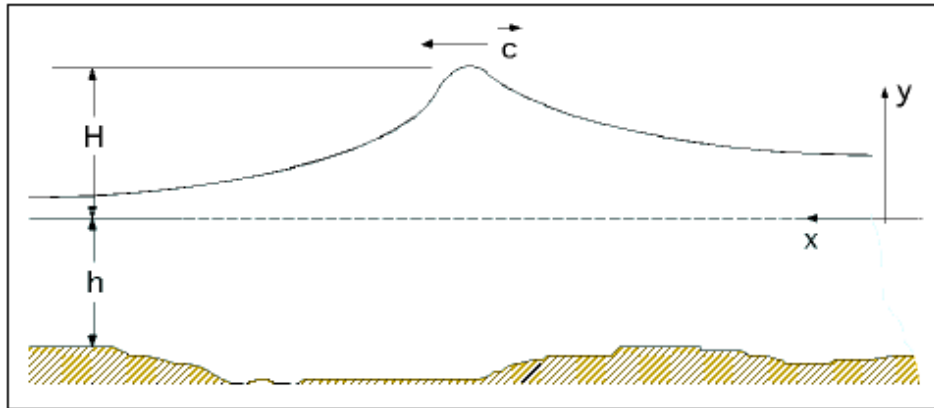
- **Potencia de las olas.**

$$N_l = \frac{\rho g H^2 c_g b}{8} \left(1 + \frac{9H^2}{64 \frac{2\pi}{\lambda} h^6} \right) W \quad \text{Ecuación 10}$$

3.4.2.2- Teoría de la onda solitaria.

La principal característica de esta teoría, es considerar la superficie de la ola, por sobre el nivel del mar en la zona considerada, en todo instante, tal y como se muestra en la figura 3.6.

Figura 3.6.- Onda solitaria.



Fuente: (6)

Esta teoría propone una ecuación para determinar la energía de la ola solitaria, esta energía se puede obtener mediante la siguiente ecuación.

- **Energía de la ola.**

$$E = 1.54 \gamma \overline{Hh^3} b \quad J \quad \text{Ecuación 11}$$

3.5.- El oleaje real.

El oleaje real corresponde a la superposición de diferentes trenes de ola, cada uno con distintos valores de período, altura, dirección, etc. Con esta cantidad de fenómenos es necesario idear modelos de estudio para determinar el potencial energético de las olas, en este trabajo se utilizará el método geométrico-estadístico.

3.5.1.- Descripción geométrico-estadístico.

Este método de estimación del potencial, se basa en registros de boyas situadas en el mar, donde se determinan los valores de alturas, períodos y longitudes de onda. Luego con la base de datos, se calcula la altura significativa y el período energético, conceptos explicados a continuación. La ecuación 12 [6], representa la potencia para olas reales, con un ancho de ola de un metro y para aguas profundas $h > \frac{\lambda}{2}$.

$$N_l = 0.49 H_s^2 T_e \frac{kW}{m} \quad \text{Ecuación 12}$$

Donde:

H_s Altura significativa de la ola. Se mide en (m).

T_e Período energético. Se mide en (s).

3.6.- Descriptores de ola.

Para estimaciones más exactas, en el proceso de cálculo de potencia de olas del mar, es necesario determinar algunos descriptores, que basados en análisis estadísticos, proporcionan valores más reales del oleaje. Dichos parámetros son los representados a continuación [10]:

- **Altura significativa de la ola (H_s).**

Corresponde a la media del tercio de las olas mayores, el registro contiene N olas, ordenadas de mayor a menor y representadas por la siguiente expresión:

$$H_s = \frac{\frac{N}{3}}{i=1} \frac{H_i}{\frac{N}{3}} \quad \text{Ecuación 13}$$

- **Período energético (T_e).**

Período que transcurre al paso de dos olas consecutivas, por una línea imaginaria, situada en la cresta de la ola.

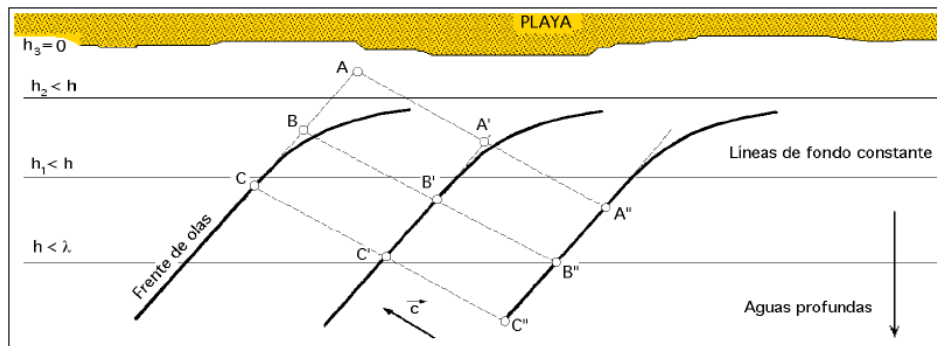
3.7.- Modificación de la energía de las olas.

Cuando las olas llegan a zonas donde existe interacción con el fondo del mar, ocurren ciertos fenómenos que dependiendo de la morfología de la costa y de los lechos marinos, la energía asociada a la ola puede verse modificada, tanto positiva como negativamente. Los efectos que se pueden producir se resumen a continuación:

- **Refracción.**

Corresponde al cambio de dirección que experimenta la ola cuando ésta se acerca a una zona de menor profundidad. Debido a los bancos de arena, el frente de ola cambia su velocidad, la altura disminuye y su dirección de propagación se modifica, orientándose paralelo a la costa, siguiendo la dirección de los bancos de arena, que poseen una forma alargada producto de las corrientes costeras, como lo muestra la figura 3.7. Este fenómeno genera concentración o disipación de la energía del oleaje en ciertos tramos de la costa, aunque este fenómeno solo modifica la altura de la ola y dirección se puede aprovechar dependiendo de la tecnología que se use.

Figura 3.6.- Refracción de un tren de olas.

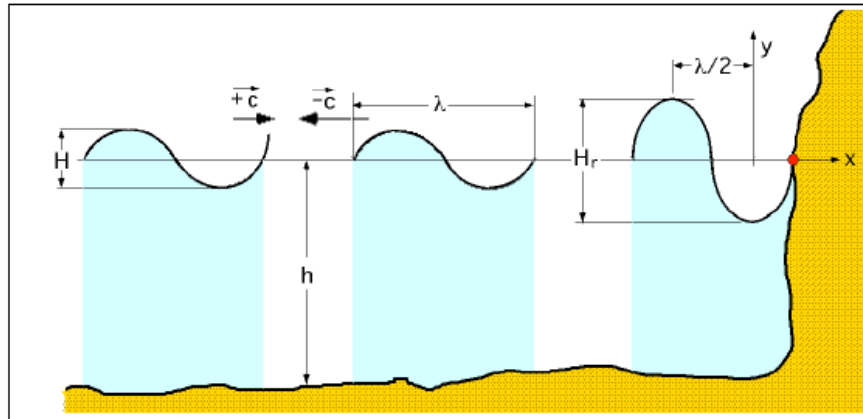


Fuente: [6]

- **Reflexión.**

Se produce cuando la ola choca contra un obstáculo vertical, la ola se refleja con muy poca pérdida de energía. Si el tren de ondas es regular, la suma de la ola incidente y reflejada origina una ola estacionaria, ver figura 3.7, cuya altura y energía resultante, es dos veces la de la ola incidente.

Figura 3.7.- Reflexión de las olas.

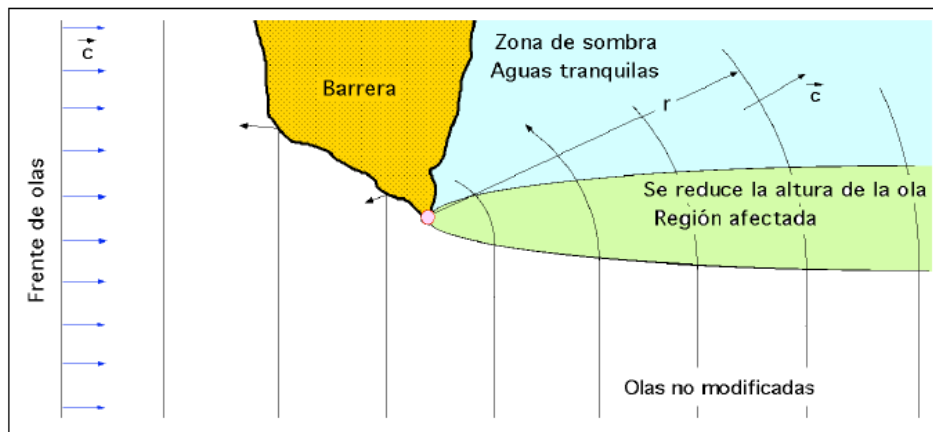


Fuente: [6]

- **Difracción.**

Es la dispersión de la energía del oleaje a sotavento de una barrera, permitiendo la aparición de pequeños sistemas de olas en aguas protegidas por un obstáculo, como se muestra en la figura 3.8. Esta difracción provoca una disminución de la altura de la ola detrás de la barrera, sin afectar a la celeridad y la longitud de onda.

Figura 3.8.- Difracción de las olas al encontrar un saliente marino.



Fuente: [6]

CAPÍTULO IV.

4.- Sistemas de aprovechamiento de energía undimotriz.

Al estudiar el comportamiento de las olas generadas por el viento (que son las que poseen mayor energía acumulada) y estudiar los modelos matemáticos y estadísticos que determinan la energía que poseen las olas de mar con mayor exactitud, fue necesario conocer y estudiar los sistemas o dispositivos que existen en el mundo, para aprovechar esta energía.

En el planeta existen muchos dispositivos que convierten la energía de las olas del mar en energía eléctrica, hasta el año 2009, según la WIPO³, se habían patentado cerca de 1758 dispositivos, muchos de ellos se quedaron en la fase de diseño y no pudieron perdurar. Actualmente hay algunos sistemas que funcionan a nivel mundial, principalmente en Europa y existen otros cuantos que están en etapa experimental.

Cuando se diseña un sistema que aprovecha la energía undimotriz, su finalidad es transformar esa energía presente en las olas del mar, en energía útil. Esta transformación varía dependiendo del sistema que se utilice, pero básicamente lo que se trata de aprovechar son los tres fenómenos principales que se producen en las olas, como son el empuje, la variación de la altura en la superficie y la variación de presión bajo la superficie.

Todos los sistemas undimotrices que operan actualmente, se diseñan dando prioridad a la frecuencia en la que operan o a la potencia máxima que se puede extraer. Es decir, en aquellos lugares donde la variación de la frecuencia de las olas es elevada, el sistema se diseña con un ancho de banda de resonancia amplio pero la potencia máxima que se puede extraer será menor que la disponible en todas las situaciones. En cambio, en aquellos lugares donde la frecuencia sea más constante, el dispositivo se diseña para maximizar la potencia extraíble a esa frecuencia pero resultará poco deficiente para frecuencias distintas.

En definitiva todos los sistemas que aprovechan la energía de las olas, deben funcionar de la manera más eficiente, pensando en las diferentes frecuencias que presenta el oleaje a lo largo del año en ciertos lugares y además, deben resistir las condiciones atmosféricas más adversas que puedan darse en el mar.

³ WIPO: Organización Mundial de la Propiedad Intelectual.

4.1.- Clasificación de los sistemas de conversión undimotriz.

Todos los sistemas de conversión y aprovechamiento de la energía undimotriz, se pueden clasificar y dividir dependiendo de varios factores, en este capítulo se detallaron los tres factores más relevantes que ordenan las tecnologías existentes.

4.1.1.- De acuerdo a la posición relativa respecto de la costa.

Una de las clasificaciones mas fáciles corresponde al lugar donde se instala el sistema de captación de energía de las olas del mar, su posición se divide en: Fijas al borde costero, aguas poco profundas y aguas profundas, como lo muestra la figura 4.1.

- **Fijas al borde costero (Onshore).**

Este tipo de instalaciones están ubicadas en la orilla del mar, de manera aislada o en forma de dique, son de fácil construcción, mantenimiento y bajos costos de operación, además estos sistemas no necesitan amarres al fondo y no hay problema de cableado submarino, por otra parte una desventaja es que al ubicarse en la costa, suelen estar constantemente sometidos al viento y en invierno a fuertes oleajes y/o tormentas. Además este tipo de instalaciones, debido a su emplazamiento, tienen un alto impacto visual y junto con eso, no pueden extraer grandes cantidades de energía, debido a la pérdida del potencial de las olas del mar en la costa, aunque esto se puede compensar con los procesos naturales de la difracción y/o refracción.

Los sistemas más conocidos en la actualidad, ubicados en el borde costero son el de columna de agua oscilante (OWC), tecnología TAPCHAN y el sistema pendular.

- **En aguas poco profundas (Nearshore).**

Estas instalaciones se sitúan a distancias de 500m de la costa o en profundidades de 10 a 40m, pueden ubicarse apoyadas en el fondo o flotando en la superficie del mar. Los sistemas instalados en este lugar comparten casi todas las características positivas que las fijas al borde costero, además están expuestas a mayores cantidades de energía, su principal inconveniente es que su instalación provoca una fuerte modificación en las aguas costeras.

Los sistemas ubicados en la costa y en aguas poco profundas, son denominados como convertidores de primera generación.

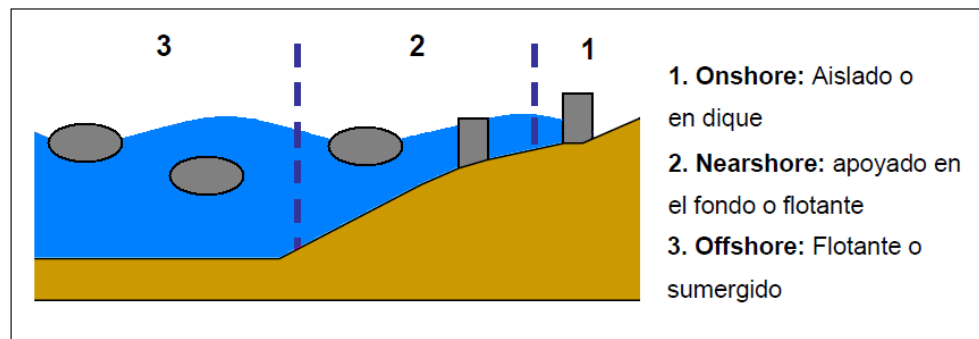
Los sistemas con mayor desarrollo ubicados en esta posición son el Archimedes Wave Swing (AWS), OYSTER, Wave Dragon y Energetech OWC.

- **En aguas profundas (Offshore).**

Estos dispositivos se ubican en profundidades mayores a 50m, generalmente son ubicados en la superficie marina o sumergidos en el mar, a diferencia de los otros dos sistemas, estos disponen de mayor energía, ya que a mayor distancia de la costa, mayor es la densidad energética de las olas. Por otro lado, los principales inconvenientes son la accesibilidad, mantenimiento, cableado submarino, anclaje al fondo marino e interferencia en el tráfico marino, pero a pesar de todas estas desventajas, hasta el año 2008, las instalaciones en mar adentro, agrupaban un 58% del total de instalaciones, dejando con un 34% a las de aguas poco profundas y con un 8% a las ubicadas en la costa [8].

Entre las tecnologías que destacan de este tipo, tenemos al convertidor Pelamis, Aquabuoy, Archimedes Wave Swing (AWS) y Wave Dragon.

Figura 4.1.- Clasificación de sistemas de aprovechamiento undimotriz según posición.



Fuente: [8]

4.1.2.- De acuerdo a la posición relativa respecto del oleaje.

Esta clasificación se basa en la posición del dispositivo respecto de la dirección que trae la ola, se pueden distinguir tres posiciones que se describen a continuación y se muestra en la figura 4.2.

- **Totalizadores o terminadores.**

Son dispositivos alargados que se ubican perpendicularmente a la dirección de la ola de mar (paralelo al frente de ola), su objetivo es captar la mayor cantidad de energía, esto lo logra, debido a que la ola incidente choca de manera frontal, eliminándose y formando una onda radiada, generada por el cuerpo en su oscilación. Actualmente estos son los dispositivos más estudiados.

- **Atenuadores.**

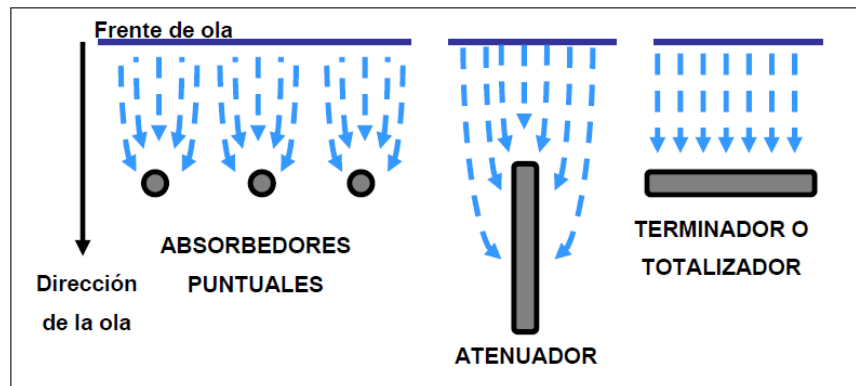
Estos dispositivos también denominados absorbedores lineales, se ubican de manera paralela a la dirección de la ola, su forma alargada, extrae la energía de manera progresiva, no destruye la ola incidente y al tener menos contacto directo, necesitan un sistema de anclaje menos robusto que los totalizadores.

- **Absorbedores puntuales.**

Son estructuras de tamaño reducido en comparación con las olas incidentes, su forma suele ser cilíndrica, por lo que su posición es indiferente de la dirección de la ola, generalmente se ubican agrupados formando una línea.

Estas estructuras tienen una característica, que es concentrar la energía sobre si mismos (Efecto antena), lo que redundaría en la relación energía captada y volumen estructural.

Figura 4.2.- Clasificación de sistemas de aprovechamiento undimotriz según su orientación.



Fuente: [8]

4.1.3.- De acuerdo al principio de captación.

Esta clasificación es la más importante y específica, apunta al funcionamiento de los dispositivos y la forma en la que se puede extraer la energía de las olas, presente en el empuje, diferencia de presión y altura.

- **Diferencias de presión en un fluido.**

Estos dispositivos aprovechan la diferencia de presión que existe en el paso de una ola a otra, esta energía se transfiere a un fluido, generalmente aire, el que se ocupa como fluido de trabajo.

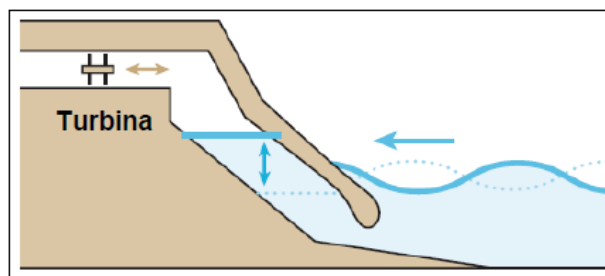
Los dispositivos que aprovechan este fenómeno, se ubican en aguas poco profundas y profundas (Nearshore y Offshore), emplazados en el fondo marino o sumergidos a poco metros de la superficie, lo que los hace mas resistentes a condiciones climáticas adversas, pero peligrosos para el tráfico marino al encontrarse poco visibles en altamar. Destacan dos dispositivos de este tipo:

a) Columna de agua oscilante (OWC):

Los dispositivos OWC, se fabrican con una estructura hueca, abierta por debajo de la superficie del mar, donde el movimiento alternativo de las olas, hace subir y bajar el nivel del agua, desplazando el volumen de aire hacia su interior, tal y como se muestra en la figura 4.3. Al chocar la ola con esta estructura, el aire interior se comprime dentro de la cámara y sale al exterior a través de una turbina. De manera inversa, cuando la ola se retira, el aire ingresa nuevamente a la cámara, accionando la turbina. Para este dispositivo, es necesario contar con una turbina bidireccional que no cambie de sentido de giro, generalmente se utiliza una turbina Wells, que cumple con ese requisito.

Existen dispositivos OWC ubicados en la costa, aguas poco profundas e incluso aguas profundas, aunque la mayoría está en la costa.

Figura 4.3.- Columna de agua oscilante (OWC).



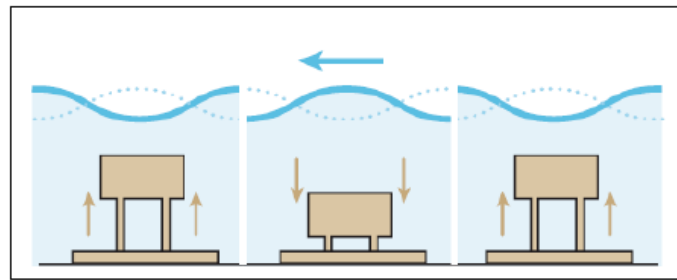
Fuente: [11]

b) Efecto Arquímedes:

Estos sistemas se encuentran generalmente sumergidos entre 40 y 100m, por lo que su impacto visual es menor al de otros dispositivos. Su funcionamiento se basa en la variación de presión estática que se origina por el paso de la ola, que acciona la parte móvil cilíndrica que posee el equipo, generando un movimiento vertical que se utiliza para la generación de electricidad, básicamente cuando la ola pasa sobre el flotador, este se contrae o expande, según si pasa la

cresta o el valle de la ola, para tratar de equilibrar las presiones entre el interior y exterior. El movimiento relativo entre el flotador y la parte inferior fija, se transforma en electricidad mediante un sistema hidráulico y un conjunto motor-generator. La parte fija se encuentra anclada al fondo por un bloque de hormigón.

Figura 4.4.- Efecto Arquímedes.



Fuente: [11]

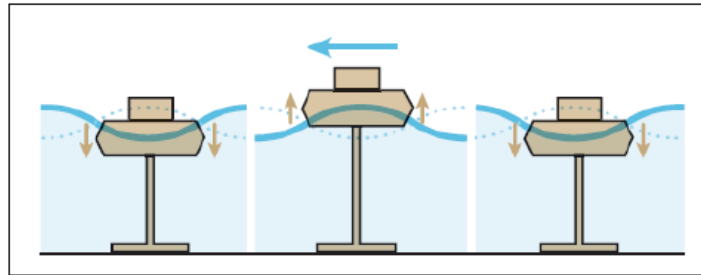
- **Cuerpos boyantes activados por las olas.**

Estos dispositivos se ubican mayoritariamente en aguas profundas (Offshore), constan de una parte flotante, que se mueve con el paso de las olas, extrayendo la energía de diferentes maneras. El movimiento oscilatorio que se aprovecha puede ser vertical, horizontal, entorno a un eje o una combinación de estos. Estos cuerpos de boyas pueden clasificarse en dos tipos:

a) Cuerpo boyante con movimiento absoluto:

Corresponde al cuerpo boyante, cuyo movimiento inducido por las olas, es absoluto con respecto a una referencia fija externa (anclaje al fondo o lastre). Estos dispositivos son los más abundantes y aprovechan mejor la energía undimotriz al ubicarse varios dispositivos agrupados en una línea. Por otra parte, los esfuerzos de los amarres son considerables y su instalación y mantenimiento son algo complejo.

Figura 4.5.- Cuerpo boyante con movimiento absoluto.

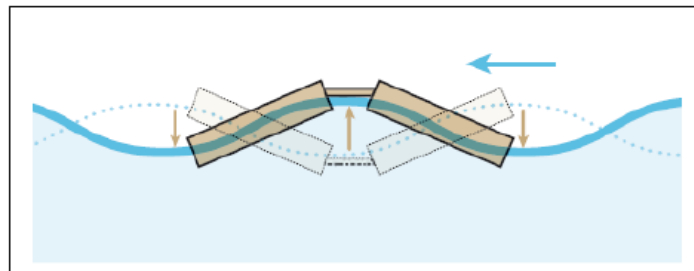


Fuente: [11]

b) Cuerpo boyante con movimiento relativo:

El movimiento de estos cuerpos es relativo entre dos o más cuerpos, es decir, la energía se extrae del movimiento relativo de las diferentes partes de la estructura, aunque generalmente se trata de ubicar una referencia fija interna para minimizar las pérdidas en el rendimiento.

Figura 4.6.- Cuerpo boyante con movimiento relativo.



Fuente: [11]

- **Sistemas de rebosamiento y/o impacto.**

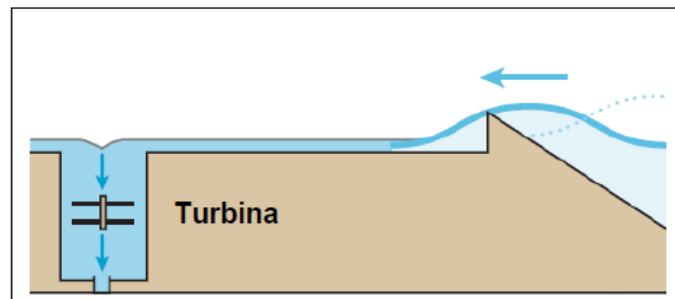
En estos dispositivos, la ola incide sobre la estructura, lo cual consigue aumentar la energía potencial, cinética o ambas. Estos sistemas pueden ser ubicados en la costa como alta mar dependiendo de como aprovechar las olas, se distinguen dos casos que se explican a continuación:

a) Sistemas de rebosamiento:

En estos dispositivos lo que se hace, es forzar al agua a pasar por sobre la estructura para aprovechar la diferencia de altura entre la estructura y la superficie del mar, algunos dispositivos cuentan con depósitos para almacenar el agua de las olas en altura e incluso utilizan algunos tipos de concentradores (Canal en forma de cuña o parábola) para aumentar en forma artificial la

altura de la ola que impacta en ellos. Luego esa agua se pasa por una turbina hidráulica de baja presión para producir energía. Estos sistemas se ubican en la costa y aguas profundas, los primeros son muy poco frecuentes debido a que para ser instalados se necesitan varias características naturales en el emplazamiento y los costos de construcción son mas elevados.

Figura 4.7.- Sistema de rebosamiento.

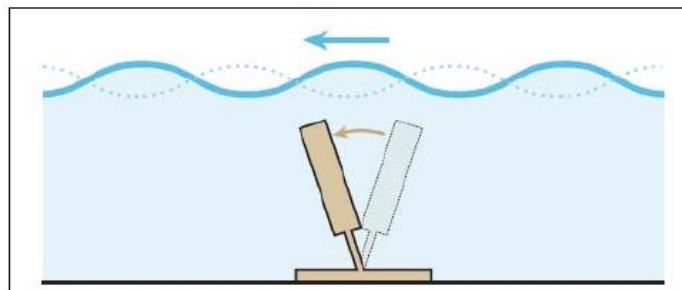


Fuente: [11]

b) Sistemas de impacto:

Estos sistemas aprovechan la parte de la energía horizontal que traen las olas del mar. Son dispositivos articulados o flexibles que actúan como medios de transferencia. Se ubican en zonas cercanas a la costa.

Figura 4.8.- Sistema de impacto.



Fuente: [11]

4.1.4.- De acuerdo al modo de obtener la energía.

Esta clasificación es muy general y engloba todas las anteriores, se divide en dos sistemas.

- **Sistemas estáticos:**

El dispositivo permanece inmóvil durante todo el proceso de conversión, su rendimiento depende de la capacidad de aprovechar el movimiento de las partículas de agua sobre el sistema.

- **Sistemas oscilantes:**

La energía que aprovecha este sistema proviene del movimiento relativo entre las partes fijas y móviles de los elementos. Estos sistemas se subdividen en dos tipos, el primero donde el oleaje actúa de manera directa sobre las partes móviles y el segundo utiliza un intermedio de agua-aire, el que desplaza la parte móvil.

4.2.- Conversión energética.

Una vez clasificados los sistemas de aprovechamiento undimotriz de acuerdo a los criterios mencionados, fué necesario conocer el método y los sistemas que se utilizan para transformar la energía de las olas en energía eléctrica.

Al igual que en otras tecnologías renovables, como en la energía eólica, la principal dificultad se presenta en las velocidades de intercambio, que suelen ser bajas, por lo que aumentar dichas velocidades es el principal desafío.

En el proceso de conversión energética, se presentan tres tipos: La conversión primaria, secundaria y terciaria, tal y como se muestra en la figura 4.9.

- **Conversión primaria.**

En este proceso, se convierte el movimiento de las olas del mar, en movimiento de un fluido de trabajo (aire, agua o aceite) o un cuerpo, utilizando algún sistema mecánico o neumático, es decir, su principal objetivo es convertir el movimiento ondulatorio de las olas en movimiento rápido unidireccional. Algunos sistemas poseen un acumulador que almacena la energía a corto plazo, para que en períodos de olas irregulares, se pueda canalizar la energía de forma continua.

- **Conversión secundaria.**

La conversión secundaria, transforma la energía del fluido o cuerpo en energía mecánica, necesaria para el funcionamiento de los generadores. La principal función de esta conversión es aumentar las velocidades de rotación.

Los sistemas más importantes de este tipo son, los sistemas hidráulicos, las turbinas de aire y turbinas de agua.

a) Sistemas hidráulicos y oleo hidráulicos:

Su denominación depende del fluido de trabajo que se utilice (aceite o agua). Dentro de los usos, el aceite contribuye a una mayor eficiencia en el sistema, considerando siempre la probabilidad de filtraciones de aceite al exterior, que puede ocasionar contaminación en el ambiente o también, las filtraciones de agua en el aceite, que reducirían notablemente el rendimiento del sistema.

Estos sistemas tienen la ventaja de tener poco volumen, adaptarse a diferentes tipos de movimientos de entrada y permitir almacenar energía en acumuladores hidráulicos. En cambio su principal desventaja es que al utilizar muchas partes móviles, necesitan más mantención y tienen mayor probabilidad de falla.

b) Sistemas con turbinas de aire:

Estos sistemas trabajan con turbinas capaces de funcionar con el fluido en dos direcciones sin cambiar el sentido de rotación de los álabes. De este tipo de turbinas, la de mayor uso es la turbina Wells, a pesar de que rara vez supera el 50% de rendimiento.

c) Sistemas con turbinas de agua:

Estos sistemas trabajan con las mismas turbinas que las centrales hidroeléctricas y al igual que ellas, dependen de la altura, caudal y velocidad de giro. Su mayor uso es con los sistemas que utilizan la diferencia de altura del paso de las olas entre la estructura superior y el nivel del mar, como los sistemas de rebosamiento.

- **Conversión terciaria.**

En este proceso se convierte la energía mecánica de rotación en energía eléctrica, utilizando un generador eléctrico.

Esta conversión, tiene como principal función, corregir las variaciones de velocidades del generador, producto de las variaciones a corto y largo plazo de las olas del mar, por ende es necesario contar con un generador variable. Dentro de las alternativas para este problemas se encuentran las siguientes:

a) Máquina de inducción:

Es el generador mas utilizado, debido al gran rango de velocidades a las que puede trabajar. Estos generadores además se pueden utilizar junto con un control de par y velocidad, que ajusta las cargas de salida a las necesidades de la red en tiempo real.

Los dispositivos que más utilizan estas máquinas son los OWC.

b) Generador síncrono de velocidad variable:

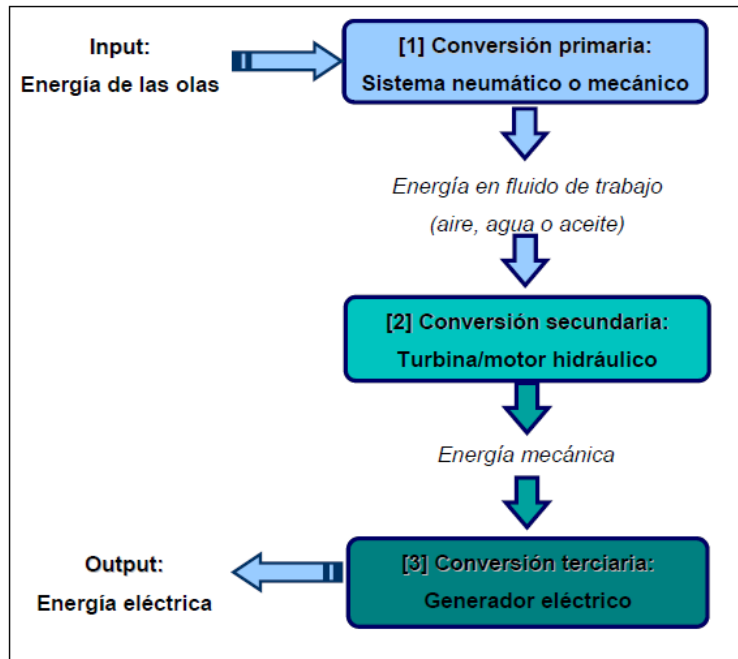
Estos dispositivos generan electricidad con frecuencias y tensión constante, a pesar de la variabilidad en la velocidad de rotación. Su rendimiento es aceptable en rangos de 900 a 1800rpm.

c) Generador eléctrico de corriente alterna:

Para determinados usos se puede emplear un generador convencional de corriente alterna, con posterior rectificación de la misma, que permita la generación a velocidad variable. Para generación en altamar, la energía se puede transportar a tierra como corriente continua, que resulta más económica.

Finalmente cabe mencionar que para la mayoría de los sistemas, es necesario contar con un convertidor de potencia, para así poder acoplar el generador a la red. El único sistema que no necesita acople, es el Pelamis, cuya máquina de inducción gira con una velocidad constante.

Figura 4.9.- Sistemas de conversión energética.



Fuente: [7]

4.3.- Dispositivos existentes.

Existen más de mil dispositivos patentados por todo el mundo, muchos de los cuales, quedan en etapas de diseño y no logran llevar a escalas reales los prototipos diseñados, la tabla 4.1 presenta algunas de las tecnologías existentes y sus principales características técnicas.

Tabla 4.1.- Dispositivos undimotrices.

Nombre del dispositivo	Potencia del dispositivo (kW)	Superficie que ocupa (m ²)	Ratio aprox. Potencia /Superficie	Fluido de trabajo (aire, agua o aceite a presión)	Instalaciones en el mar profundo, medio y costeras
OWC de Unión Fenosa	27	48	559	Agua de mar	Costera
Tapchan	400	7000	57	Agua de mar	Costera
El Pato Salter	2310	4050	570	Aceite a presión	Aguas profundas
OWC Clam	2500	2827	884	Aire	Aguas profundas
Cilindro de Bristol	2000000	1656000	1208	Agua de mar	Aguas profundas
Balsa de Cockerell	2000	5000	400	Aceite a presión	Aguas profundas
Buque Kai mei	2000	960	2083	Aire	Aguas profundas
Bomba de Manguera	110	113	973	Agua de mar	Aguas profundas
Bomba de pistón	45	64	707	Agua de mar	Aguas profundas
OWC NEL	2000000	1552000	1289	Aire	Aguas profundas
Convertidor de Belfast	75	51	1471	Aire	Costera
OWC Kvaerner	500	79	6366	Aire	Costera
OWC Sakata	60	360	167	Aire	Costera
OWC de Kujukuri	30	31	955	Aire	Costera
OWC de Pico	400	96	4167	Aire	Costera
BBDB	200	36	5556	Aire	Poco profundas
OWC Mighty Wale	110	1200	92	Aire	Poco profundas
OWC de China	30	40	750	Aire	Costera
OWC Energetech	500	875	571	Aire	Costera
OWC Limpet	500	84	5952	Aire	Costera
OWC Alda	1000	-	-	Aire	Costera
OWC Nereida	250	700	537	Aire	Costera
OWC Breakwave	750	525	1427	Aire	Costera
FWVP	1500	-	1019	Agua de mar	Aguas profundas
PowerBuoy	20	20	1531	Aceite a presión	Aguas profundas
Pelamis	750	490	118	Aceite a presión	Aguas profundas
Wavedragon	6000	51000	160	Agua de mar	Aguas profundas
SSG	12000	75000	1944	Agua de mar	Todo tipo de ubicación
Plataforma flotante de múltiples convertidores	2520	1296	-	Aceite a presión	Aguas profundas
Wavestar	6000	1440	4167	Aceite a presión	Poco profundas
AWS	1200	90	13296	Aire	Poco profundas
Searev	500	375	1333	Aceite a presión	Aguas profundas
Wavebob	1500	225	6667	Aceite a presión	Aguas profundas
Oyster	500	216	2315	Agua de mar	Poco profundas
Waveroller	13	16	825	Aceite a presión	Poco profundas
Multiwave Plane	30	22	1374	Agua de mar	Poco profundas
Aquabuoy	500	157	3183	Agua de mar	Aguas profundas

Fuente: [12]

Dentro de este abanico de tecnologías, actualmente destacan unas pocas, según WAVEPLAN⁴, existen por lo menos 15 tecnologías que están sobre el resto y que ya se encuentran en fases de modelos a escala en proceso y/o en funcionamiento continuo. La tabla 4.2 muestra los principales sistemas undimotrices de los últimos años.

Tabla 4.2.- Dispositivos undimotrices lideres (2010).

Country	Company	Device	Type	Prototype Rating
UK	Wavegen	Limpet	Fixed OWC	500kW
UK	Pelamis	Pelamis	Inertia	750kW
UK	AWS Ocean Energy	Wave Swing	Inertia	2MW
UK	Aquamarine Power	Oyster	Inertia	500kW
Denmark	Wave Dragon	Wave Dragon	Floating Overtopping	7MW
Denmark	Waveplane	Waveplane	Floating Overtopping	500kW
Denmark	Wavestar	Wavestar	Inertia	5MW
Australia	Oceanlinx	Oceanlinx	Floating OWC	2MW
Australia	Seapower Pacific	CETO	Inertia	180kW
Ireland	Ocean Energy	OE buoy	Floating OWC	2MW
Ireland	Wavebob	Wavebob	Inertia	2MW
Norway	WAVEnergy	SSG	Fixed Overtopping	150kW
Norway	Fred Olsen	FO3	Inertia	2.5MW
Canada	Finavera	Aquabuooy	Inertia	250kW
USA	OPT	Powerbuoy	Inertia	150kW

Fuente: [13]

Como se puede apreciar de la tabla anterior, los dispositivos más importantes están ubicados en Europa y son los que en este instante tiene mayor proyección, por lo que es necesario conocer algo más de ellos. A continuación se presentaron de manera resumida, los 15 dispositivos previamente mencionados.

⁴ WAVEPLAM: Planificación y comercialización energética de las olas.

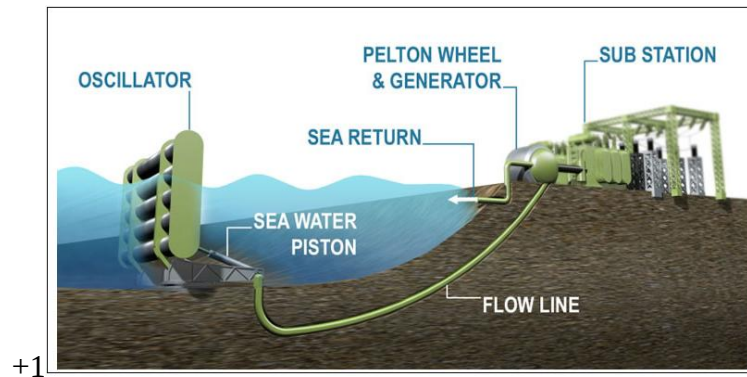
- **Tecnología undimotriz Reino Unido.**

Actualmente el Reino Unido (UK) lidera el escenario mundial undimotriz, desde el 2004, sus productos son los que tienen más avances en este campo, una razón de esto, es que sus aguas, gracias a los vientos del oeste, poseen un excelente potencial energético en toda su costa occidental. Dentro de las tecnologías destacan las siguientes:

a) Dispositivo Oyster:

Pertenece a la empresa Aquamarine Power Ltd. Su funcionamiento consta en un módulo anclado en el fondo marino, el que con el movimiento vertical por el paso de las olas, actúa en unos pistones, los que entregan agua a presión a la unidad transformadora de energía eléctrica. Este prototipo se instaló el año 2009 en Emec, Escocia, generando una potencia de 0.3MW.

Figura 4.10.- Dispositivo Oyster.



Fuente: [14]

b) Dispositivo Arquímedes Wave Swing:

Pertenece a la empresa AWS Ocean Energy, este dispositivo trabaja totalmente sumergido, aprovechando el movimiento relativo entre el flotador y la parte fija, para así generar electricidad usando un sistema hidráulico. Desde el 2010, está en funcionamiento una unidad de 0.25MW en Emec, Escocia.

Figura 4.11.- Dispositivo Arquímedes Wave Swing.



Fuente: [14]

c) Dispositivo Pelamis:

Desarrollada por la empresa británica Pelamis Wave Power, este sistema se ubica en la superficie del mar, el movimiento relativo de sus partes articuladas, accionadas por el paso de las olas, accionan un sistema hidráulico de cuatro pistones, alimentando un depósito a presión que, a su vez, actúa sobre un generador eléctrico.

Una de las plantas comerciales, funciona desde el año 2009 en Agucadoura, Portugal, generando 2.25MW de energía eléctrica.

Figura 4.12.- Dispositivo Pelamis.



Fuente: [14]

d) Convertidor Limpet:

Este convertidor, pertenece a la empresa Wavegen Ltda. Se ubica en la costa (Onshore) y se clasifica como un dispositivo OWC, utiliza dos turbinas Wells para funcionar. En el año 2008, se instalaron 8 dispositivos, equivalentes a 16 turbinas de 18.5kW en las costas de Mutriku, España.

Figura 4.13.- Dispositivo Limpet.



Fuente: [14]

- **Tecnología undimotriz Dinamarca.**

Dinamarca es otro de los países importantes en el desarrollo undimotriz, sus costas ubicadas en dirección del Mar del Norte son de un potencial estimado anual de 30TWh, por lo que es necesario aprovechar dicha energía, actualmente existen 3 dispositivos de esta nación que son los más importantes y están en fases adelantadas.

a) Dispositivo Wave Dragon:

Este dispositivo pertenece a la compañía Wave Dragon ApS. Se ubican en altamar y su funcionamiento se basa en concentrar el agua hacia un punto que está sobre 2 o 3 metros de altura, para así aprovechar la energía potencial y generar electricidad por el paso del agua a través de sus turbinas Kaplan de baja presión. El año 2008 se instaló un dispositivo de 20kW en la localidad de Nissum Bredning, Dinamarca.

Figura 4.14.- Dispositivo Wave Dragon.



Fuente: [14]

b) Dispositivo Waveplane:

Este dispositivo pertenece a la empresa Waveplane y su funcionamiento es similar al sistema Wave Dragon. Este dispositivo se instaló en Hanstholm, generando 100kW de potencia.

Figura 4.15.- Dispositivo Waveplane.



Fuente: [14]

c) Dispositivo Wavestar:

Perteneciente a la empresa Wavestar Ltda. Se ubica en aguas poco profundas y su funcionamiento se basa en el movimiento de sus partes móviles y un sistema hidráulico. Este dispositivo se instaló en Nissum Bredning, el año 2007, produciendo 6MW de potencia con 40 turbinas de 150kW.

Figura 4.16.- Dispositivo Wavestar.



Fuente: [14]

- **Tecnología undimotriz Australia.**

Este país dispone de un buen potencial energético, sobre todo en las costas del sur, entre los paralelos 30° y 60° de latitud sur, este país cuenta con 2 tecnologías que están en fases avanzadas de desarrollo y que son las siguientes:

a) Dispositivo OWES:

Este dispositivo pertenece a la empresa Oceanlinx. Su funcionamiento consta de una turbina de aire de palas orientables, cuyo objetivo es transformar el flujo ascendente y descendente en una rotación unidireccional. El año 2008 se instaló un dispositivo en Irlanda.

Figura 4.17.- Dispositivo Owes.



Fuente: [14]

b) Dispositivo CETO:

Este convertidor pertenece a la empresa Seapower Pacific Pty Ltd. Se ubica en aguas poco profundas, su principio de funcionamiento consiste en un flotador y una estructura de anclaje, unidos por una manguera elástica que aprovecha el movimiento vertical del dispositivo para estrecharse y ensancharse, generando presión al agua que alimenta una turbina y un generador. Este sistema pretende instalarse en Fremantle, Australia y generar 100kW.

Figura 4.18.- Dispositivo CETO.



Fuente: [14]

- **Tecnología undimotriz Irlanda.**

Al igual que el Reino Unido, Irlanda presenta un potencial anual en sus costas de 180TWh y condiciones de oleaje muy favorable, entre sus dispositivos mas avanzados podemos encontrar dos modelos, los que se detallan a continuación:

a) Dispositivo OE Buoy:

Desarrollado por la empresa Ocean Energy. Este dispositivo es un OWC flotante y al igual que estos dispositivos, utiliza una turbina Wells para su funcionamiento. En el año 2009 se puso en funcionamiento un dispositivo de 20kW en la bahía de Galway.

Figura 4.19.- Dispositivo OE Buoy.



Fuente: [14]

b) Dispositivo Wavebob:

Diseñado por la empresa Wavebob Ltda. Este dispositivo flotante, transforma los movimientos verticales en energía hidráulica, funcionan en profundidades mayores a 70m, se pueden utilizar de varios a la vez. En el año 2008 se instaló un dispositivo en la bahía Galway, con una potencia de 15kW.

Figura 4.20.- Dispositivo Wavebob.



Fuente: [14]

- **Tecnología undimotriz Noruega.**

Este país cuenta con una potencia anual de 400TWh en sus costas del océano atlántico, de este país destacan dos dispositivos, los que se detallan a continuación:

a) Dispositivo FO3:

Esta tecnología esta en manos de Fred Olsen Renewables. Es un dispositivo flotante, fabricado en fibra de vidrio, diseñado con varias boyas en su interior, las que se los mueven en dos direcciones, luego el movimiento se traslada a unos cilindros terminando en un motor hidráulico. Este dispositivo se instaló en Nissum Bredning, Dinamarca el 2008.

Figura 4.21.- Dispositivo FO3.

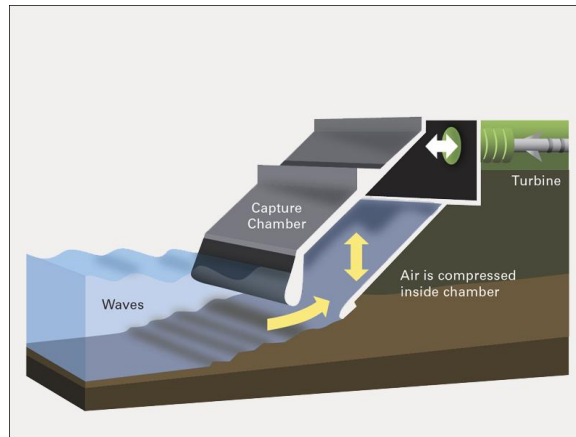


Fuente: [14]

b) Dispositivo SSG:

Este convertidor pertenece a la empresa WAVEnergy. Este dispositivo se ubica en la costa (Onshore) utilizando la presión del agua para mover aire en su interior y activar las turbinas. El año 2006, se instaló este convertidor en NTNU, Noruega, generando unos 20MW.

Figura 4.22.- Dispositivo SSG.



Fuente: [14]

- **Tecnología undimotriz Canadá.**

a) Dispositivo Aquabuoy:

Este dispositivo pertenece a la empresa Finavera Renewables. Este dispositivo es similar al sistema CETO, posee un pistón que trabaja con el movimiento vertical de la boya, al pasar las olas del mar, este trabajo se traslada a dos mangueras flexibles que funcionan como bombas de agua, impulsando el fluido al acumulador en la parte superior del dispositivo. En el interior de la boya está el sistema turbina-generador, el cual produce la electricidad. Este dispositivo está operando desde el año 2007, en Glasgow, Escocia, produciendo 250kW de energía.

Figura 4.23.- Dispositivo Aquabuoy.



Fuente: [14]

- **Tecnología undimotriz Estados Unidos.**

El estudio de energías undimotrices, data de los años 50, pero recién estos últimos años, este país ha impulsado el desarrollo de estas tecnologías, actualmente un dispositivo de esta nación, está en fases avanzadas y es el que se presenta a continuación:

a) Dispositivo Powerbuoy 150:

Este dispositivo pertenece a la empresa Ocean Power Technologies. Su funcionamiento se basa en el aprovechamiento del movimiento vertical por el paso de las olas, donde el movimiento relativo entre la boya y el mástil, acciona el sistema hidráulico presente en el equipo, que luego bombea aceite a alta presión para así accionar el generador eléctrico. Este dispositivo está en fase de pruebas en la localidad de Emec, con una potencia de 150kW, funciona desde el 2009.

Figura 4.24.- Dispositivo Powerbuoy.



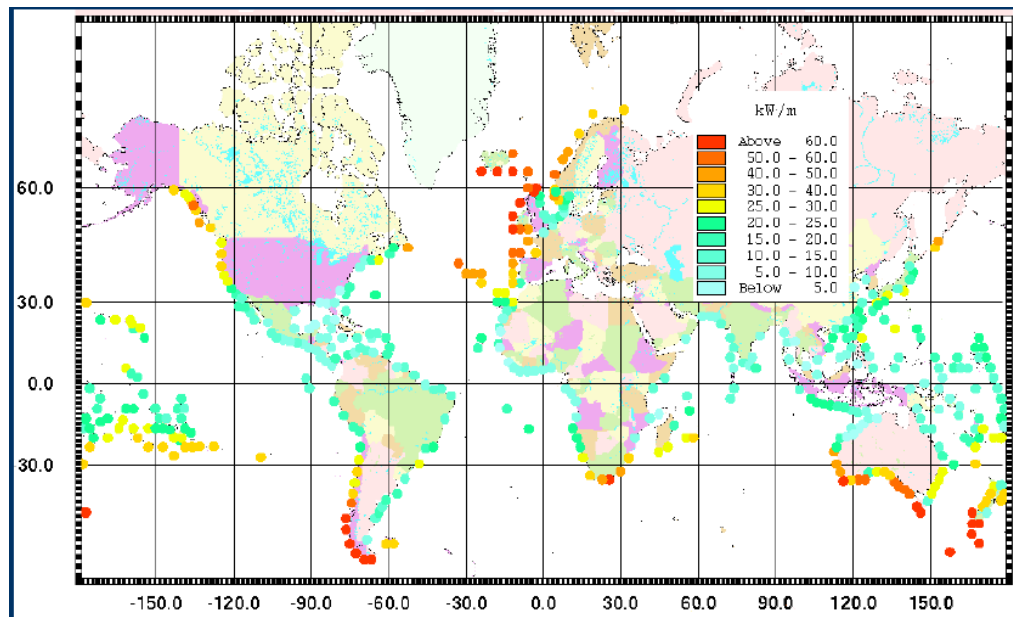
Fuente: [14]

CAPÍTULO V.

5.- Estudio y selección de las zonas de mayor potencial energético undimotriz en Chile.

Chile en sus 4.270km de costas, tiene muchos lugares con excelente potencial energético undimotriz que se puede aprovechar, la figura 5.1, entrega de manera visual los rangos de energía disponibles en nuestras costas.

Figura 5.1.- Estimación de la energía disponible a escala global.



Fuente: [15]

Esta energía se puede aprovechar, pero para eso es necesario identificar el potencial de las olas y las zonas donde se puede aprovechar de mejor manera la energía undimotriz.

En el año 2009 la consultora Garrad Hassan [16], líder en estudio de energías renovables, realizó un informe para el Banco Interamericano de Desarrollo, en el que se estudiaba el potencial de energía de las olas del mar y las zonas que presentaban mayor atractivo para la implementación de tecnologías undimotrices y mareomotrices.

En este capítulo se estudió dicho potencial energético de las olas en Chile y se determinaron las zonas mejores evaluadas para posibles desarrollos de proyectos undimotrices.

5.1.- Metodología para la estimación del potencial de las olas.

El estudio del potencial se basa en la recopilación de antecedentes de climas de olas, para el caso de Chile se utilizaron dos fuentes diferentes, la primera fue la información obtenida del sitio web de NOAA⁵ [17], el cual entregó los valores a largo plazo de las olas y la segunda fuente fue la información obtenida por el SHOA, que facilitó los valores de períodos cortos de las olas.

Ambas fuentes estudian el mar de diferentes maneras, la información del NOAA, proviene de mediciones en mar abierto por las boyas TriAxis ubicadas en el mar de Chile, las mediciones de altímetros hechas por el satélite topex/poseidón y mediciones de viento realizadas por el escaterómetro del satélite QuikSCAT. Todos estos valores son ingresados a un programa de modelado que se llama WaveWatch III, el que entrega valores espectrales de alturas, períodos, frecuencias y dirección de las olas. Por otra parte, la información del SHOA, proviene del monitoreo de distintos tipos de boyas ubicadas a lo largo de nuestro país, boyas tipo TriAxis y boyas WatchKeeper, que se ubican a 100 y 200m de profundidad y registran valores de alturas y períodos de las olas.

La tabla 5.1 muestra los lugares en coordenadas geográficas, de las boyas del SHOA y de las zonas de mediciones del NOAA.

Tabla 5.1.- Lugares de medición (SHOA y NOAA).

No.	Locación	Localización boya SHOA			Punto medición NOAA		
		Latitud	Longitud (W)	Longitud (E)	Latitud	Longitud (W)	Longitud (E)
1	Arica	-18.45	70.37	289.63	-18.00	71.25	288.75
2	Iquique	-20.17	70.02	289.98	-20.00	70.00	290.00
3	Antofagasta	-23.63	70.42	289.58	-24.00	70.00	290.00
4	Caldera	-27.05	70.87	289.13	-27.00	71.25	288.75
5	Isla de Pascua	-27.15	109.45	250.55	-27.00	110.00	250.00
6	Coquimbo	-29.92	71.37	288.63	-30.00	71.25	288.75
7	Valparaíso	-32.98	71.62	288.38	-33.00	71.25	288.75
8	Constitución	-35.28	72.52	287.48	-35.00	72.50	287.5
9	San Vicente	-36.72	73.15	286.85	-37.00	73.75	286.25
10	Golfo Coronados	-41.67	73.93	286.07	-42.00	73.75	286.25
11	Faro Félix	-52.96	74.07	285.93	-53.00	73.75	286.25
12	Diego Ramírez	-56.53	68.63	291.37	-57.00	68.75	291.25

Fuente: [16]

⁵ NOAA: Administración Nacional Atmosférica y Oceánica de los EE.UU.

Con los datos estadísticos y espectrales de las olas, entregados por ambas fuentes, se determinaron las alturas significativas de las 12 localidades y los períodos de energía correspondientes.

Tabla 5.2.- Alturas y períodos de olas para Chile.

No.	Location	Hs (m)	Te (s)
1	Arica	1.94	10.61
2	Iquique	2.10	10.54
3	Antofagasta	2.27	10.41
4	Caldera	2.59	10.06
5	Isla de Pascua	2.65	10.31
6	Coquimbo	2.71	9.81
7	Valparaíso	2.56	10.05
8	Constitucion	2.81	10.00
9	San Vicente	2.96	9.97
10	Golfo Coronados	3.18	9.90
11	Faro Félix	3.71	9.25
12	Diego Ramirez	3.83	9.17

Fuente: [16]

Utilizando la ecuación 12, del capítulo 3 y los valores de las alturas y períodos, podemos estimar la potencia por metro de ola para las costas de Chile. La tabla 5.3 entrega el resultado de las potencias obtenidas por metro de frente de ola.

Tabla 5.3.- Potencia undimotriz para zonas de Chile.

No.	Location	Hs (m)	Te (s)	P (kW/m)
1	Arica	1.94	10.61	19.57
2	Iquique	2.10	10.54	22.72
3	Antofagasta	2.27	10.41	26.33
4	Caldera	2.59	10.06	32.98
5	Isla de Pascua	2.65	10.31	35.38
6	Coquimbo	2.71	9.81	35.32
7	Valparaíso	2.56	10.05	32.30
8	Constitucion	2.81	10.00	38.74
9	San Vicente	2.96	9.97	42.83
10	Golfo Coronados	3.18	9.90	49.08
11	Faro Félix	3.71	9.25	62.21
12	Diego Ramirez	3.83	9.17	66.00

Fuente: [16]

5.2.- Metodología para la elección de la zona.

Para poder determinar las zonas más idóneas en la instalación de un convertidor undimotriz, no basta con conocer las zonas en donde la energía de las olas es la mayor, si no que también es necesario tomar en consideración otros factores, como el estudio de la batimetría (aguas poco profundas se asocian a bajas energías), las zonas protegidas y/o áreas de ejercicios militares, por decir algunos factores, es por estos motivos que una forma de hacerlo, fue utilizar un programa llamado GIS⁶, que es una integración organizada de hardware, software y datos geográficos, el que está diseñado para capturar, recopilar, analizar todos estos antecedentes en una base de datos y mediante valoraciones se pueden resolver problemas complejos de planificación y gestión geográfica. Este procedimiento fue usado en otros países, siendo Portugal el país pionero y con mayor experiencia en este tema.

Para el estudio en Chile, lo primero fué ingresar datos al programa de los factores excluyentes, es decir, factores que restringen las zonas permitidas para la implementación de tecnologías undimotrices. Entre los factores se consideraron los siguientes:

- **Factor por batimetría:**

El análisis se centró en las zonas con profundidades entre los 50 y 200 metros, ya que la mayoría de los dispositivos funcionan en esas distancias. Para dispositivos Onshore, es necesario un análisis más detallado de cada sector en particular.

La información para este punto se obtuvo de la base de datos GEBCO⁷.

- **Factor por áreas especiales de conservación:**

En el estudio se excluyeron las áreas marinas protegidas ambientalmente.

La información de las áreas fue entregada por la CONAMA⁸.

- **Factor por sistemas eléctricos nacionales:**

En el estudio, se excluyeron los sistemas eléctricos del sur del país (Aysén y Magallanes), por contribuir con menos del 1% de la energía eléctrica, por lo que se consideró el sistema interconectado del norte grande y el sistema interconectado central.

La información de las líneas y sus mapas a nivel nacional, fueron entregados por la CNE.

⁶ GIS: Sistema de Información Geográfica.

⁷ GEBCO: Mapa Batimétrico General de los Océanos.

⁸ CONAMA: Comisión Nacional del Medio Ambiente.

- **Factor de áreas protegidas:**

Se excluyeron las zonas marinas de la X región al sur, por tener una gran cantidad de parques y zonas restringidas.

Información entregada por la CONAMA.

Una vez cargado el programa con toda esta información, que sólo entrega las zonas no aptas para la implementación de dispositivos undimotrices, se determinaron a continuación, los factores principales y necesarios en la elección de las zonas idóneas, para esto el programa clasificó con puntuación de 0 a 100 las funciones objetivos determinadas. Estos factores que se consideraron son los siguientes:

- **Distancia a la red eléctrica nacional:**

Se evaluará con valor 100 a la distancia mas corta entre el dispositivo y la red eléctrica, ya que minimizará los costos de transporte de energía.

- **Distancia a los puertos:**

Se evaluará con valor 100 a la distancia mas corta a los puertos, ya que se considera los trabajos de montaje y mantenimiento.

- **Recurso energético de las olas (kW/m):**

Este es un factor muy importante, se evaluará con 100 la zona de mayor recurso energético de las olas.

- **Geología del lecho marino. (gráfico de sedimentos NGDC⁹):**

Se evaluará con 100 a las zonas con capas mas profundas de sedimentos.

Luego de determinar los factores objetivos principales, fué imperativo darles un peso o ponderación dentro del sistema, de tal manera que priorice los más importantes, para eso se asignaron porcentajes de importancia que se detallan a continuación:

- **Distancia a la red eléctrica nacional: 25%**
- **Distancia a los puertos: 25%**
- **Recurso energético de las olas (kW/m): 40%**
- **Geología del lecho marino. (gráfico de sedimentos NGDC): 10%**

⁹ NGDC: Centro Nacional de Datos Geofísicos.

Junto a estos factores, existen 2 que pueden incluirse dependiendo del estudio en particular.

a) Distancia a la costa:

Este parámetro se considera, dependiendo del lugar del emplazamiento undimotriz, en este caso se utilizó una distancia de 50m a la costa. Este factor se puede considerar pensando en que un dispositivo cerca de la costa, trae beneficios económicos y que un dispositivo lejos de la costa trae beneficios visuales y medioambientales.

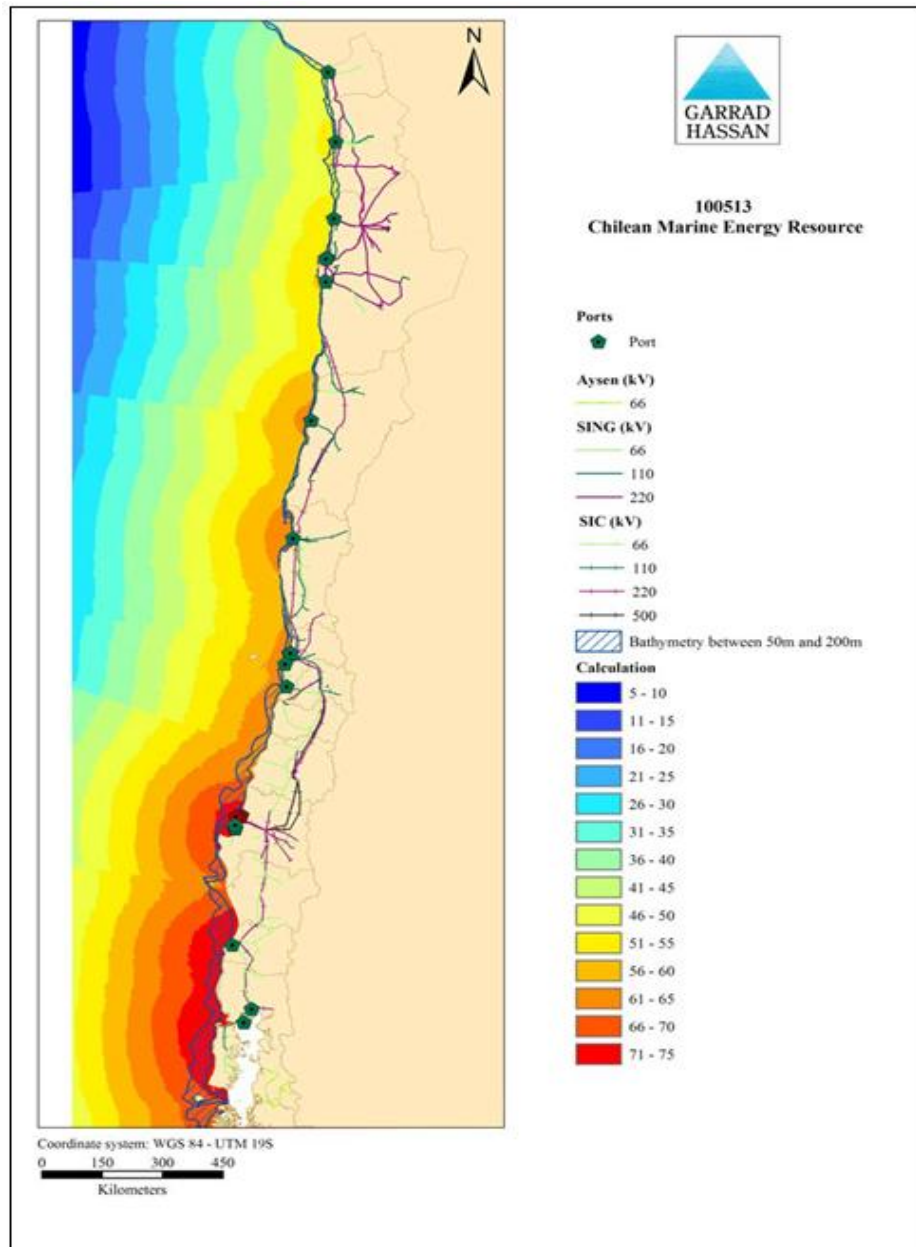
b) Evaluar el recurso estacional por separado de los parámetros espectrales (H_s , T_e):

La evaluación del recurso estacional puede ser beneficiosa y más exacta que el promedio anual, por lo que se podría evaluar el recurso energético de las olas por estaciones. Otro punto es considerar el recurso energético (kW/m) y los parámetros espectrales de las olas por separados, para verificar si los dispositivos trabajan con valores máximos y si en ciertas épocas se pueden realizar trabajos de operación y mantenimiento (O&M).

Con la información anterior, el programa GIS, entregó una primera aproximación indicando los lugares con mayor puntuación, la figura 5.2 muestra en colores las zonas de mayor potencial, la escala indica en azul los lugares no aptos y rojo las zonas mas adecuadas, aunque es una aproximación bastante buena, es necesario profundizar, para realizar una localización más exacta, para esto el programa se cargó con información nueva y más específica, para discriminar aún más, estos factores fueron:

- Concesiones de pesca (áreas de manejo bentónico).
- Sitios de especial interés científico.
- Áreas protegidas en la zona costera.
- Humedales.
- Sitios arqueológicos.
- Zonas de suelo contaminado.
- Otras áreas de interés económico (por ejemplo, turismo, denominación de origen).

Figura 5.2.- Clasificación General, Promedio Ponderado GIS.



Fuente: [16]

Finalmente, cabe mencionar que no se incluyeron por falta de información, factores como:

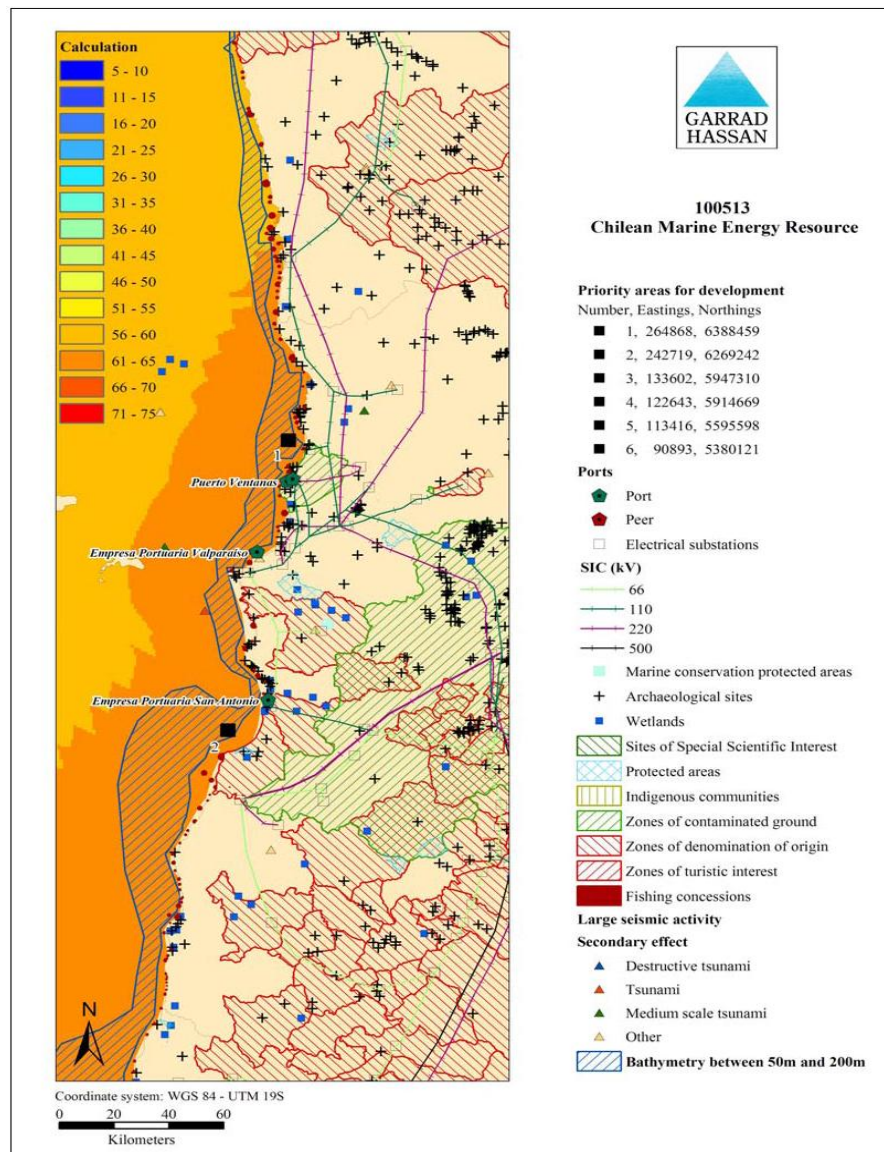
- Concesiones marítimas.
- Áreas de ejercicios militares.
- Rutas de entrada a los puertos.
- Principales rutas marítimas.

5.2.1- Resultados.

Luego de reunir todos los datos relevantes, más los datos extras previamente mencionados y las restricciones, el programa GIS recalculó los valores y entregó de manera definitiva, las mejores zonas para futuros proyectos undimotrices. Estas zonas, debido a que la energía de las olas crece a medida que se acercan al sur del país, se encuentran de la V a la X región, los resultados fueron expresados en mapas y explicados a continuación.

5.2.1.1.- Resultados V región de Valparaíso.

Figura 5.3.- Detalle y análisis mapa V región.

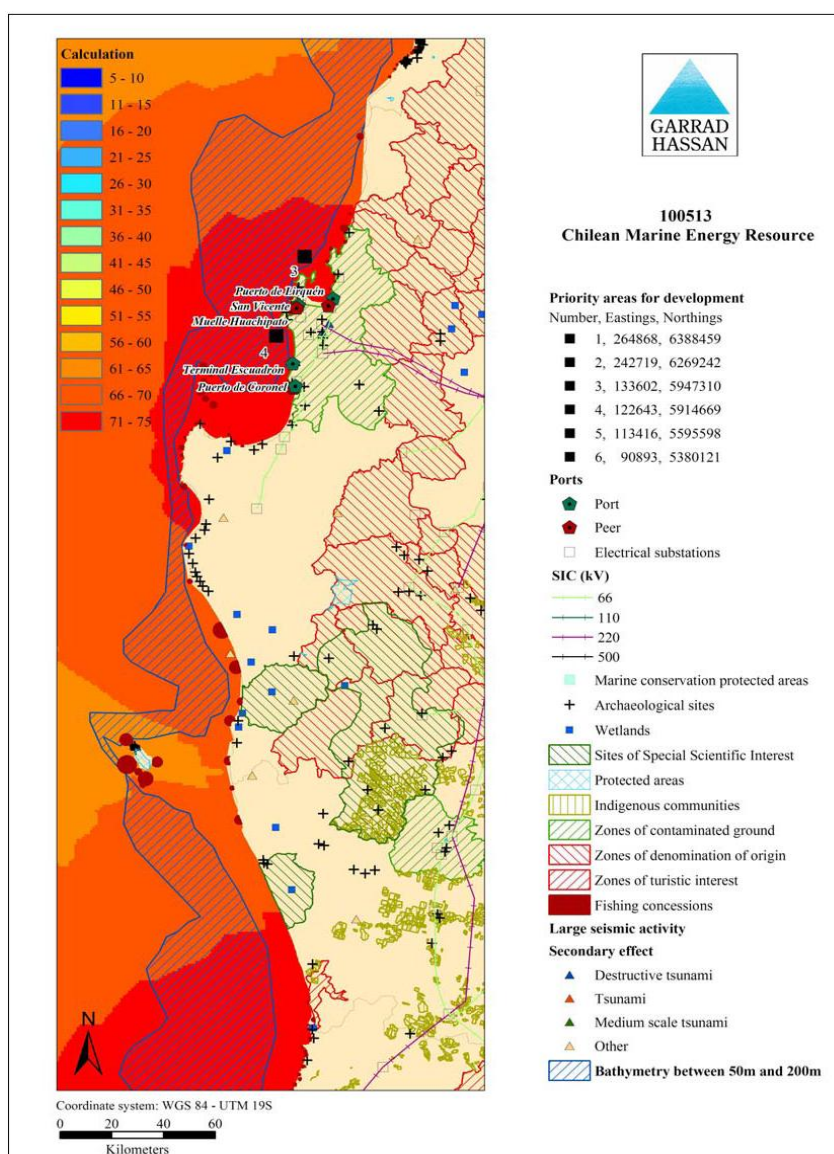


Fuente: [16]

Los resultados para la V región (figura 5.3), mostraron una zona de interés, desde el norte, por el puerto de Ventanas, pasando por el puerto de Valparaíso, hasta el sur por el puerto de San Antonio. Dejando a este último punto como la mejor zona de esta región, ya que el puerto de Valparaíso posee mucho tráfico marino y de los otros dos puertos, el de Ventana es privado de uso público y San Antonio es estatal, por lo que si existe subvención del gobierno, es una buena plataforma para trabajos de O&M.

5.2.1.2.- Resultados VIII región del Bío-Bío.

Figura 5.4.- Detalle y análisis mapa VIII región.

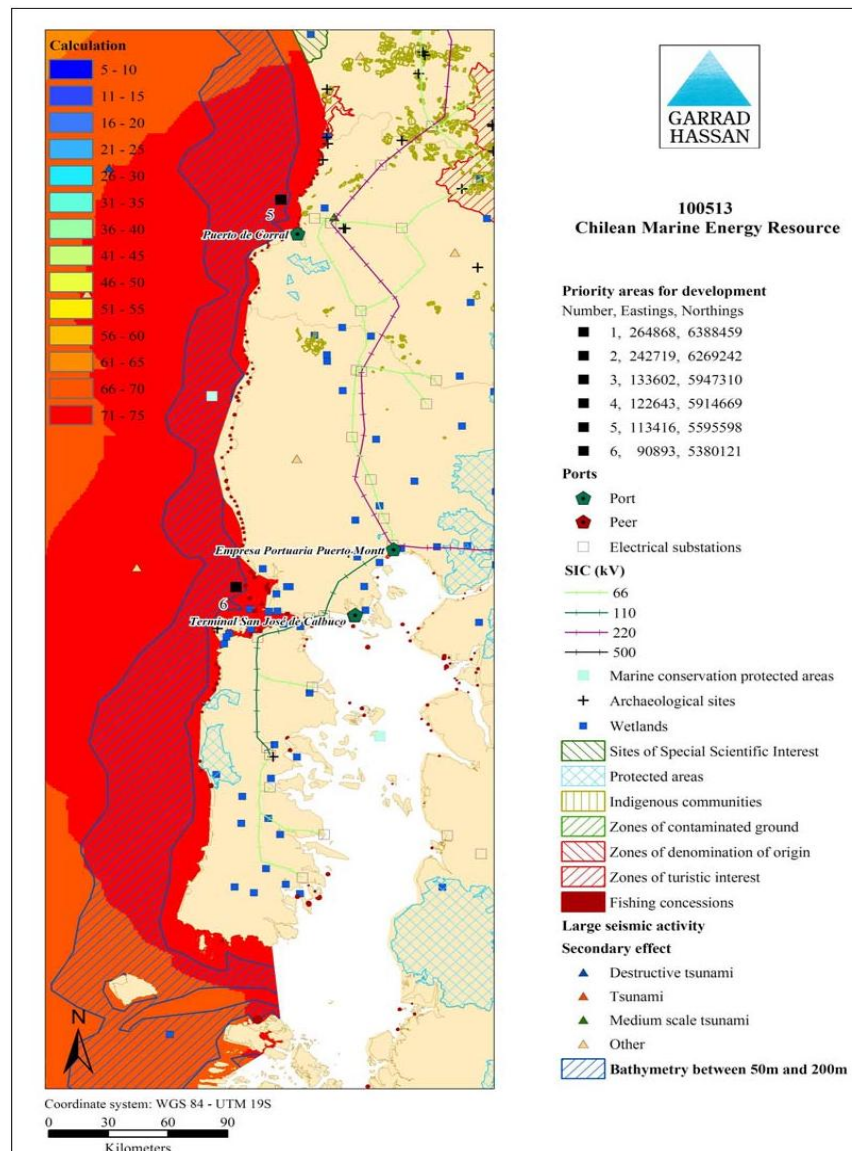


Fuente: [16]

En la VIII región los resultados arrojaron que la zona mas prometedora se encuentra entre el puerto de Lirquén al norte hasta el puerto de Coronel al sur, siendo la zona del puerto de San Vicente la mejor evaluada, por el buen nivel energético de las olas, su cercanía a los sistemas eléctricos y la posibilidad de instalar una base de O&M.

5.2.1.3.- Resultados XIV región de los Ríos y X región de los Lagos.

Figura 5.5.- Detalle y análisis mapa XIV y X región.



Fuente: [16]

La región de los Ríos presentó como lugar de interés, la zona del puerto de Corral, mientras que la región de los Lagos presentó las zonas cercanas a Puerto Montt y terminal San José de Calbuco. Dentro de estas alternativas, la zona cercana al puerto de Corral es una buena alternativa, ya que no existe mucho tráfico marítimo, se encuentra cerca de las líneas del SIC y posee un buen potencial energético. Con respecto a las zonas de la X región, no es una buena opción a pesar de tener buen nivel energético, ya que en el canal del Chacao existe un fuerte tráfico marítimo y la zona está siendo evaluada para futuros proyectos mareomotrices.

Finalmente las zonas que se escogieron para estudiar la implementación de tecnologías son; San Antonio, San Vicente y Corral.

CAPÍTULO VI.

6.- Estudio y selección de los convertidores undimotrices más adecuados.

6.1.- Selección de los dispositivos.

Determinadas las localidades de mayor proyección para el desarrollo undimotriz, fué necesario conocer, los dispositivos que pueden ser implementados en dichos lugares, para ello se evaluaron las alternativas disponibles, mencionadas en el capítulo IV, utilizando un factor económico, factor técnico y factor medioambiental, como discriminantes.

- **Factor económico.**

Los dispositivos undimotrices tienen un elevado costo de inversión, actualmente están por sobre otras tecnologías, pero se espera que en el largo plazo, esta situación cambie, tal y como se muestra en la tabla 6.1, que de acuerdo a pronósticos de SustentaBIT, esta situación en el largo plazo tendrá que cambiar.

Tabla 6.1.- Comparación de costos con distintas energías.

Tecnología	2008		2030	
	Inversión US\$/KW	Generación US\$/MWh	Inversión US\$/KW	Generación US\$/MWh
Biomasa	2.960-3.670	40-50	2.550-3.150	35-120
Hidráulica	1.970-2.600	45-105	1.940-2.570	40-100
Geotermia	3.470-4.060	65-80	3.020-3.540	55-70
Eólica-Onshore	1.770-1.960	90-105	1.440-1.600	70-85
Energía solar térmica por concentración	3.470-4.500	135-370	1.730-2.160	70-220
Eólica-Offshore	2.890-3.200	100-120	2.280-2.530	80-95
Mareas y olas	5.150-5.420	195-220	2.240-2.390	100-115
Solar fotovoltaico	5.730-6.800	360-755	2.010-2.400	140-305

Fuente: [5]

Dada la situación actual de los dispositivos, se pudo establecer que cualquier tecnología a implementar, tendrá un alto costo de inversión, y que si bien es un factor a considerar, se necesitan

estudios individuales de las tecnologías existentes. Cabe considerar que los costos de inversión se pueden en parte amortizar con la energía que se pueda producir y vender, por lo que las tecnologías que se escogerán, se ubicarán en zonas con potenciales de olas de 30kW/m a 50kW/m, que son valores muy buenos para generar electricidad.

Finalmente se debe considerar evaluar el dispositivo con otras tecnologías renovables.

- **Factor técnico.**

Este factor es el predominante actualmente en la elección del dispositivo, en este trabajo no se consideran los dispositivos Onshore, ya que en el capítulo V, el estudio se basó en las zonas comprendidas entre los 50m y 200m de profundidad, lejos de la costa.

Dado lo nuevo de las tecnologías, es necesario conocer el estado actual de los dispositivos mencionados en capítulo IV, los que ya superaron la fase de prueba en laboratorios, los más importantes se detallan en la tabla 6.2.

Tabla 6.2.- Estado de desarrollo de las tecnologías undimotrices.

Dispositivo undimotriz	Tipo de dispositivo	Estado actual de desarrollo
Pelamis	Atenuador	Comercialización
Wave Swing	Absorbedor Puntual	Demostración Comercial
Oyster		Demostración de Tecnología
Wave Dragon	Desbordamiento	Demostración Comercial
Wave Star	Absorbedor Puntual	Demostración de Tecnología
CETO	Absorbedor Puntual	Demostración de Tecnología
OE Buoy	OWC	Demostración de Tecnología
Wave Bob	Absorbedor Puntual	Demostración de Tecnología
SSG	Desbordamiento	Demostración de Tecnología
Aquabuoy	Absorbedor Puntual	Comercialización
Powerbuoy	Absorbedor Puntual	Comercialización

Fuente: [18]

Otro aspecto importante a tener en cuenta es que el dispositivo se pueda instalar con la tecnología convencional y que el mantenimiento de la instalación resulte lo más sencillo posible. Con estos antecedentes, se puede determinar el dispositivo, pensando en su localización y estado actual.

- **Factor Medioambiental.**

Este factor considera los impactos que conllevan la instalación de algún dispositivo, esos impactos dependen del sistema y de su ubicación, para el caso de los dispositivos en altamar, los principales factores a considerar son la interrupción del tráfico marino y las consecuencias a la flora y fauna marina, mientras que para los dispositivos costeros, la CONAMA requiere un proceso de licenciamiento ambiental mas detallado.

En resumen, dado que la mayoría de los sistemas undimotrices, tiene un alto costo de inversión, que además de los más avanzados, sólo 3 están en etapa de comercialización y junto con eso, se necesitan sistemas que funcionen en altamar, por los estudios realizados, los dispositivos estudiados a continuación en esta habilitación profesional, son el convertidor **Pelamis P-750** y el convertidor **Aquabuoy 2.0**.

6.2.- Estudio de los dispositivos.

Los convertidores escogidos corresponden a los sistemas que hoy en día lideran el mercado undimotriz y son además, los dispositivos que poseen mayor información para ser estudiados en profundidad.

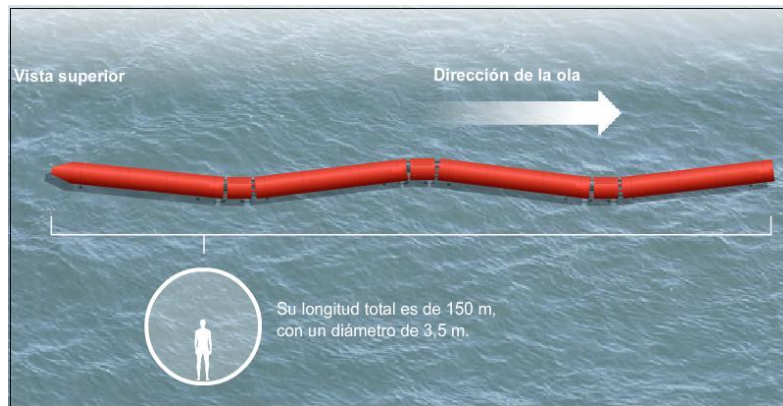
6.2.1.- Convertidor Pelamis.

Pelamis, es el nombre del dispositivo desarrollado por la empresa Pelamis Wave Power Ltd.; cuyo significado en griego es “serpiente marina”, esta empresa de origen Escocesa, es el actual líder del mercado undimotriz y su dispositivo ya se encuentra en etapa de comercialización.

6.2.1.1.- Características del equipo.

Este convertidor trabaja en zonas con profundidades mayores a 50 metros con corrientes de 1 nudo y distancias de 5 a 10 km de la costa, es un dispositivo Offshore, de tipo atenuador y boyante con movimiento relativo. Su ubicación es semi sumergida, paralela al frente de ola y anclada al fondo marino por tres líneas sin tensión. El conjunto posee 3.5 metros de diámetro, unos 140 metros de largo y 700 toneladas de peso [19]. La envergadura se puede apreciar en la figura 6.1.

Figura 6.1.- Características atenuador Pelamis.



Fuente: [20]

6.2.1.2.- Conversión energética.

La figura 6.4 y 6.5, muestran de forma esquemática el interior de uno de los tres cuerpos que componen un dispositivo Pelamis, cada uno de ellos capaz de generar 250kW de potencia de forma independiente, el proceso para convertir el movimiento de las olas en electricidad es el siguiente:

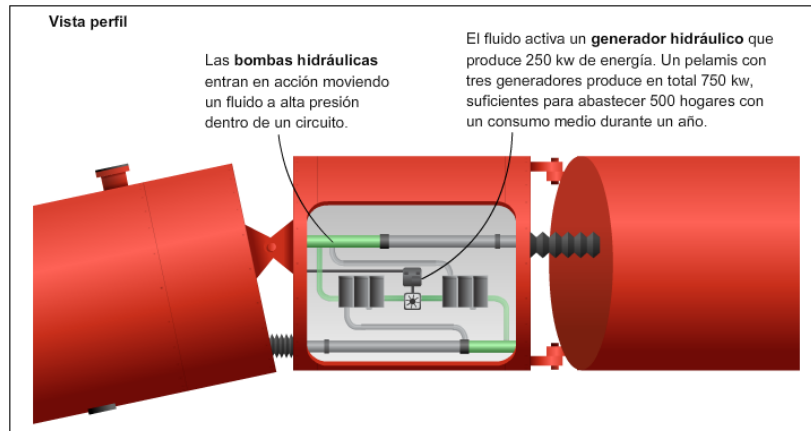
- **Conversión primaria:**

El dispositivo Pelamis utiliza en sus partes móviles, cuatro vástagos o juntas articuladas (dos aprovechan el movimiento vertical y los otros dos el horizontal) que son protegidas mediante manguitos flexibles. Cuando los vástagos se desplazan con el ritmo del oleaje en movimientos verticales u horizontales, provocan un trabajo en el fluido, en este caso aceite, que a su vez es bombeado al acumulador de alta presión, 100 a 350 bar.

El acumulador es el encargado finalmente, de verter el aceite a alta presión al motor hidráulico de manera continua. Además es capaz de absorber energía en intervalos muy variados y entregarla de manera constante.

Por último, luego de accionar el motor, el aceite regresa a un acumulador de baja presión y posteriormente a los cilindros hidráulicos.

Figura 6.2.- Funcionamiento atenuador Pelamis.



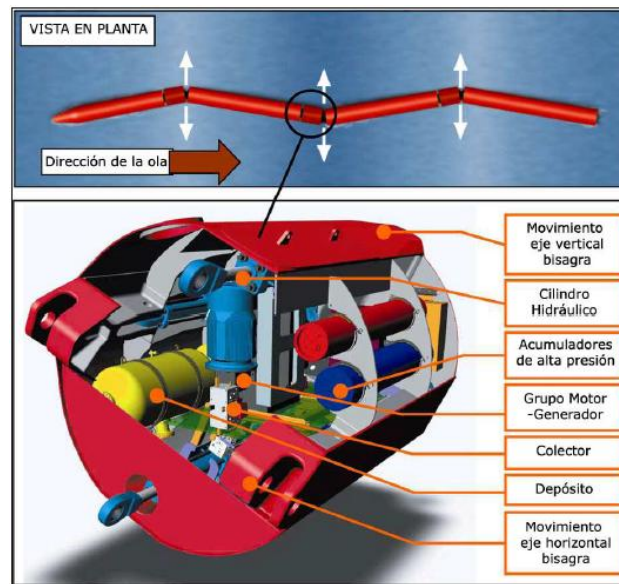
Fuente: [20]

- **Conversión Secundaria-terciaria:**

Es la conversión de energía del fluido en energía eléctrica. Este proceso comienza luego que el acumulador entrega el fluido al motor hidráulico el que activa un generador síncronos de 157kVA a 1.500 rpm.

El generador es una máquina rotativa de inducción que gira a velocidad fija, este genera una potencia de 250kW, Que sumado a las otras dos partes, entregan una potencia total nominal de 750kW.

Figura 6.3.- Módulo de conversión Pelamis.



Fuente: [12]

6.2.1.3.- Pérdidas y rendimientos.

Los estudios realizados a los diferentes dispositivos que actualmente funcionan en el mundo, generan una aproximación a las pérdidas de la potencia total, del orden del 20%, esto se debe principalmente a pérdidas mecánicas producidas por los cojinetes, compresibilidad del fluido, los sistemas de cierre hermético de los arietes hidráulicos y al rozamiento en las válvulas y tuberías.

Por otra parte, los valores de eficiencia, en condiciones de trabajo normal, alcanzan valores de 88% a 94% para el proceso de conversión primaria, dependiendo del valor máximo de la potencia que entra al sistema, de los parámetros de control considerados y de la magnitud de la energía de reacción; mientras que para el proceso de conversión secundaria-terciaria, el rendimiento está por sobre el 80% para diferentes condiciones de trabajo.

6.2.2.- Convertidor Aquabuoy.

Este dispositivo es desarrollado por la empresa Canadiense Finavera Renewables y es la responsable de poseer el primer absorbedor puntual en etapa de comercialización.

6.2.2.1.- Características del equipo.

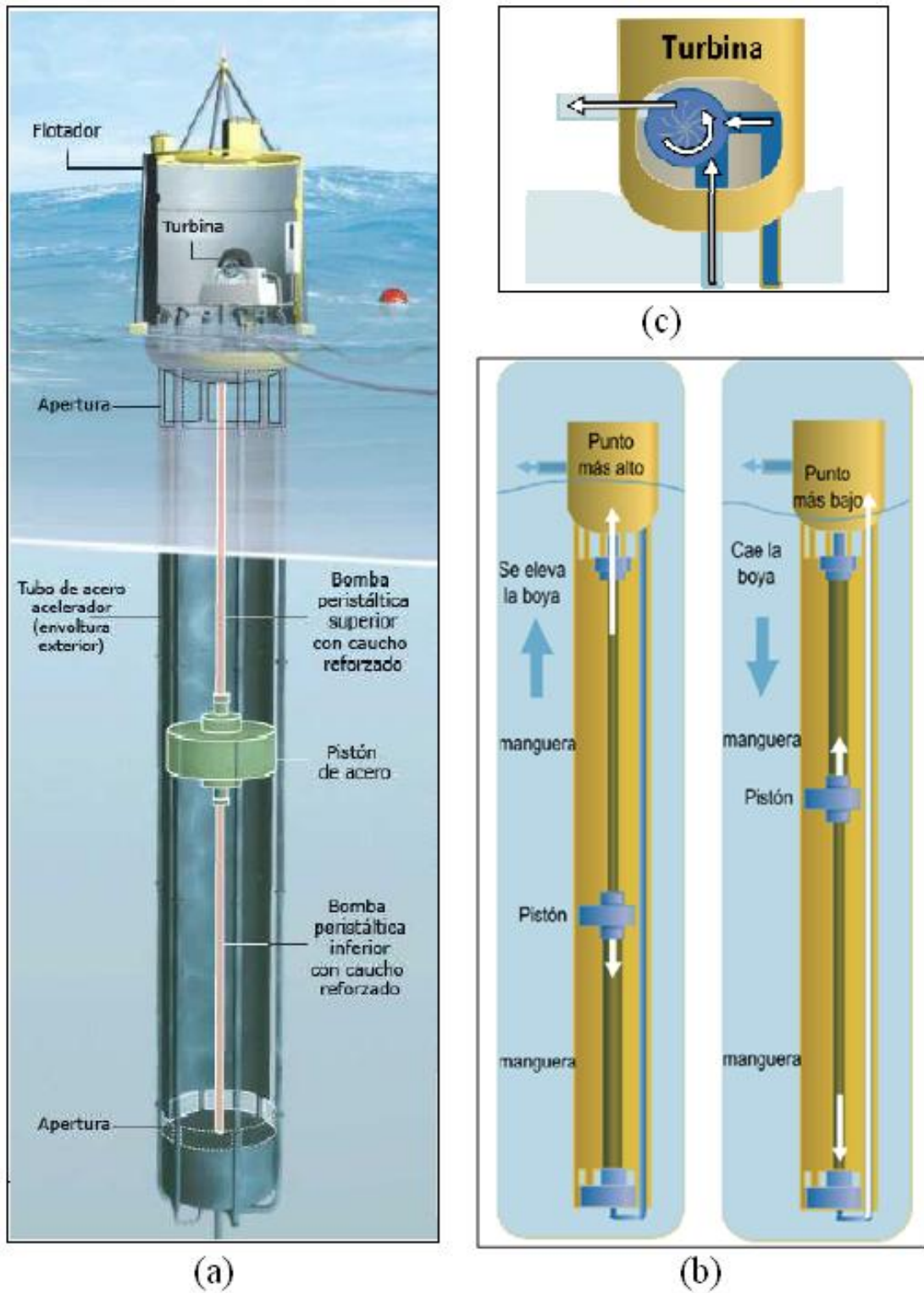
El dispositivo Aquabuoy es un absorbedor puntual que funciona con una boya de libre flotación con movimiento absoluto sobre un cilindro hueco con un pistón en su interior, tal y como se muestra en la figura 6.4(a), se ubica en profundidades mayores a 50m (Offshore), posee dos líneas de amarre flojas, lo que permite el libre movimiento vertical. El dispositivo posee 25 metros de largo y el cuerpo boyante tiene un diámetro de 6 metros.

6.2.2.2.- Conversión energética.

El dispositivo aprovecha el movimiento de las olas, usando una boya que se desplaza en sentido vertical unida a un tubo hueco, cuyo interior posee un pistón y dos bombas de mangueras, las que aprovechan el movimiento ascendente y descendente. En la mitad del pistón hay un disco que flota en un punto neutro que sostiene a la boya en el estado de reposo, el proceso de la obtención de energía eléctrica, se divide en dos etapas, que son las siguientes:

Figura 6.4.- Dispositivo Aquabuoy.

(a) Características dispositivo Aquabuoy; (b) Conversión eléctrica; (c) Turbina.



Fuente: [10]

- **Conversión primaria:**

En este proceso, el dispositivo aprovecha el movimiento de las olas para accionar las bombas hidráulicas elásticas, la figura 6.4 (b) detalla de manera visual el proceso, donde la presión ejercida por el movimiento del cuerpo boyante al elevarse, induce un movimiento en el pistón interno en dirección opuesta, forzando a la bomba peristáltica¹⁰ superior a contraerse y enviar agua a un acumulador y luego a la turbina. Al mismo tiempo la bomba inferior se expande absorbiendo agua, el proceso es el inverso cuando la boya baja, siendo la bomba inferior la que impulsa el agua a la bomba.

Este sistema puede ser cerrado o abierto.

- **Conversión Secundaria-terciaria:**

En esta etapa, el agua bombeada llega por dos ductos, como se muestra en la figura 6(c), dependiendo si el agua es enviada por la bomba superior o inferior, el fluido pasa luego por la turbina, generalmente se utiliza una turbina Pelton, la que es capaz de generar una potencia de 250kW, luego el agua se puede recircular o enviarlo al ambiente.

¹⁰ Bomba peristáltica: Es conocida como “bomba de manguera”, ya que utiliza la compresión y expansión de una manguera para impulsar el fluido.

CAPÍTULO VII.

7.- Aspectos medioambientales.

En Chile existen actualmente varios proyectos y actividades que trabajan con el fondo marino y lo modifican con fines industriales, entre estas actividades destacan las pequeñas operaciones de gas y petróleo, pesqueras o puertos, etc. pero aunque exista todo este trabajo, no existen estudios profundos para determinar los verdaderos impactos de los trabajos marinos.

La energía undimotriz y de otras fuentes renovables, tienen como objetivo el contribuir al crecimiento de las naciones y a la vez, reducir la dependencia de los combustibles fósiles y las emisiones de CO₂ a la atmósfera, que son la causa del efecto invernadero que se relaciona con el calentamiento global.

Considerando la experiencia de otros países y algunos estudios relacionados al fondo marino, se pueden establecer algunos de los factores mas importantes a considerar y se pueden dividir en dos tipos: los factores de estrés o actividades del proyecto que pueden afectar al medioambiente, y los receptores, elementos del medioambiente que pueden sufrir el impacto, los receptores se dividen en entorno biótico (organismos vivos) y entorno físico (variables como temperatura, calidad de agua, altura de olas, etc.). Además, todo proyecto consta de tres etapas: construcción, funcionamiento y desmantelamiento, puntos de partida a la hora de estudiar la ubicación de un dispositivo.

La figura 7.1 muestra la interacción de los dispositivos con el entorno, detallando los más importantes a continuación:

- **Impacto en los ecosistemas bentónicos.**

En los procesos de instalación, utilización y desmantelamiento, se provocan alteraciones en la sedimentación del lecho marino, esto ocurre en los procesos de colocación de cimientos y cables de amarre o transporte de energía, los que provocan la remoción de sedimentos, afectando el hábitat de la zona. La re-suspensión de sedimentos puede generar problemas en las comunidades bentónicas, como el aumento de la turbidez o la reactivación de contaminantes que pueden estar en los sedimentos. Dentro de las alteraciones más importantes en la fauna, producto de la suspensión de partículas del fondo marino, se encuentran alteraciones en la vida de los peces, larvas y

alimentadores de suspensión, además la nueva sedimentación puede ocultar larvas, huevos y organismos bentónicos.

Figura 7.1.- Interacción prevista de los dispositivos con el entorno.

Compatible 		Moderado 		Importante 		No relacionado 					
		Hidrodinámica	Agua	Sedimentos	Bentos	Peces	Aves	Mamíferos	Pesquerías	Paisaje marino	Socioeconomía
Instalación	Convertidores de energía de las olas		X	X	X	X	X	X	X	X	
	Cables		X	X	X	X	X	X	X		X
Funcionamiento	Convertidores de energía de las olas	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	Cables				X	X		X			
Desmantelamiento	Convertidores de energía de las olas		X	X	X	X	X	X	X	X	
	Cables		X	X	X	X	X	X	X		X

Fuente: [21]

- **Impacto mamíferos marinos.**

Los impactos para los mamíferos aun son desconocidos o difíciles de predecir. Dentro de las posibles alteraciones, se pueden destacar, colisiones con los equipos, alteraciones en sus conductas y comunicaciones, debido a los campos electromagnéticos generados.

- **Impacto en los peces.**

En las fases de instalación y desmantelación, ocurren fenómenos en los peces, como huir del lugar por los ruidos y la disminución temporal de la calidad del agua. Durante el funcionamiento del dispositivo, es necesario estudios adicionales, pero se sabe que cuando existen dispositivos flotantes, suelen atraer a los peces y provoca concentraciones de organismos en torno a él.

Un impacto positivo, sería la creación de una reserva de peces y vida marina en torno a los dispositivos y la formación de arrecifes en los amarres y cables submarinos luego de un tiempo de funcionamiento.

- **Impacto en el oleaje.**

Existen dos impactos que se asocian a este factor, el primero es la reducción de la velocidad de las corrientes cerca de los dispositivos, lo que provoca un aumento en la sedimentación, el segundo es la reducción en las alturas de las olas en las zonas del dispositivo y que llegan a la costa. Los cálculos estiman que la altura de la ola puede reducirse un 9% [21] en las proximidades a la instalación. Aunque en ambos casos, los efectos son mejorables en el tiempo y no presentan mayores consecuencias.

- **Impacto en la sedimentación.**

Cuando los dispositivos se encuentran en funcionamiento, la acumulación de estructuras de amarre en el fondo marino pueden alterar su naturaleza, desde los sedimentos arenosos blandos hasta los sedimentos rocosos duros, se generan cambios en los organismos que viven en ellos.

CAPÍTULO VIII.

8.- Aspectos legales.

Todo tipo de proyecto marino necesita un espacio físico para su funcionamiento, la forma de hacer disponible este espacio varía de país en país, dependiendo de las leyes locales y los espacios solicitados. En este capítulo se analizaron los marcos regulatorios de permisos de funcionamiento, permisos ambientales y las leyes de incentivo para la generación de energías limpias.

8.1.- Marco regulatorio aplicable a la energía marina en Chile.

Los proyectos de energía marina son proyectos de generación eléctrica y como tales, se rigen por la normativa del sector eléctrico chileno, en especial por el Decreto con Fuerza de Ley N° 4, La Ley General de Servicios Eléctricos y su Reglamento, además cabe mencionar que la energía undimotriz es considerada como una Energía Renovable No Convencional, contando con algunas regulaciones e incentivos especiales, mayoritariamente introducidos a nuestro ordenamiento jurídico por las Leyes N° 19.940 y N° 20.257.

- **Ley N° 19.940.**

Esta ley incorpora y modifica el Decreto con Fuerza de ley N°1 de 1982, estableciendo mejores condiciones para el desarrollo de centrales pequeñas con generación de energía no convencional. Esto se realiza mediante una exención total o parcial de peajes por el uso de la red de distribución para los PMGD¹¹ y que junto con eso sean MGNC¹², es decir, aquellos que generen una potencia bajo los 9MW quedaran exentos de pago de peaje, por concepto de distribución; sin embargo, aquellos con potencias entre 9MW y 20MW, la exención de peajes se determinará mediante un ajuste proporcional.

- **Ley N° 20.257.**

Esta ley exige que a partir del año 2010 las empresas generadoras de electricidad, con capacidad instalada de 200MW, deban acreditar que una cantidad de energía equivalente al 10% de sus retiros en cada año haya sido inyectada por MGNC, pudiendo ser estos medios propios o contratados. Esta

¹¹ PMGD: Pequeños Medios de Generación Distribuidos.

¹² MGNC: Medios de Generación No Convencionales.

obligación será aplicada de manera gradual siendo de un 5% para los años 2010 a 2014, y aumentándose anualmente un 0,5% a partir del año 2015 para alcanzar así el 10% previsto en el año 2024.

8.2.- Marco regulatorio referente a concesiones marinas.

La normativa aplicable a la tramitación y obtención de una Concesión Marítima está contenida en [22]:

- Decreto con Fuerza de Ley N° 340, de 1960 del Ministerio de Hacienda sobre Concesiones Marítimas (DFL N° 340).
- Decreto Supremo N° 2 de 2005, del Ministerio de defensa, Reglamento sobre Concesiones Marítimas (DS N° 2).
- Decreto Supremo N° 475 de 1994, Política Nacional de uso del Borde Costero (DS N° 475).

Estos decretos conceden al Ministerio de Defensa Nacional, subsecretaría de defensa, a conceder el uso particular en cualquier forma, de las playas y terrenos fiscales dentro de una faja de 80m de ancho medidos desde la línea de más alta marea de la costa del litoral; como asimismo la concesión de rocas, fondos de mar, porciones de agua dentro y fuera de las bahías; y también las concesiones en ríos o lagos que sean también navegables por buques de más de 100 toneladas, o en los que no siéndolo, siempre que se trate de bienes fiscales, en la extensión en que estén afectados por las mareas, de las playas de uno y otros y de los terrenos fiscales riberaños hasta una distancia de 80 metros medidos desde donde comienza la ribera.

Para el caso de dispositivos undimotrices, las concesiones marinas dependen del dispositivo, por ejemplo, para el caso de instalar un elemento flotante, se solicita la concesión marina de porciones de agua; para el caso que el dispositivo se encuentre bajo el fondo marino, se solicita una concesión de fondo de mar y/o una concesión de terreno de playa (Pistón)

Conforme lo establece el art. 24 del DFL N° 340 las Concesiones Marítimas, para los efectos de su otorgamiento y tramitación, se clasificarán, considerando el plazo de duración, el cual no podrá exceder de 50 años, y la cuantía de los capitales a invertir en dichas concesiones, en [22]:

- a) Concesión Marítima Mayor: aquella cuyo plazo de otorgamiento exceda de 10 años o involucre una inversión superior a las 2.500 Unidades Tributarias Mensuales (UTM), de acuerdo a la ponderación que realice el Ministerio de Defensa.

- b) Concesión Marítima Menor: aquella que se otorga por un plazo superior a 1 año y que no excede de 10 años en involucre una inversión igual o inferior a las 2.500 Unidades tributarias Mensuales (UTM).
- c) Permiso o Autorización: aquella concesión marítima de escasa importancia y de carácter transitorio y cuyo plazo no excede de un año.
- d) Destinación: aquella concesión marítima otorgada por el Ministerio a servicios fiscales, para el cumplimiento de un objeto determinado.

8.3.- Marco regulatorio referente a zonificación y uso de borde costero.

Chile ha desarrollado una Política Nacional de Uso del Borde Costero (PNUBC), cuyo objetivo es hacer un manejo sostenible de las áreas costeras y oceánicas, manteniendo al mismo tiempo el equilibrio a largo plazo entre los objetivos medioambientales, económicos, sociales, culturales y recreativos. La evaluación de cualquier proyecto costero, necesita la aprobación de la Comisión Regional de Uso del Borde Costero (CRUBC), que depende de la Comisión Nacional de Uso del Borde Costero (CNUBC) dependiente de la Subsecretaría para las Fuerzas Armadas del Ministerio de Defensa. Si bien existen comisiones que estudian los usos costeros, aun no hay un plan rígido para cada región, por lo que aun quedan estudios por considerar, lo que hace poco probable implementación de dispositivos Onshore en la actualidad.

8.4.- Marco regulatorio ambiental.

El marco regulatorio ambiental chileno se rige por la Ley 19.300 de Bases Generales del Medio Ambiente (LBGMA) dictada en 1994 y reformada por última vez por la ley 20.417 del año 2010. La LBGMA establece nuestra institucionalidad ambiental, donde el Ministerio del Medio Ambiente es el encargado de definir las políticas ambientales y el Servicio de Evaluación Ambiental es el encargado de administrar el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental de proyectos.

El sistema chileno actual contempla dos vías por las cuales los titulares de proyectos deben someterlos al sistema de evaluación de impacto ambiental, a saber, por la vía de una Declaración de Impacto Ambiental (DIA) o por la vía más exigente de un Estudio de Impacto Ambiental (EIA). Ambos instrumentos se diferencian principalmente por el detalle de la información requerida, los plazos de tramitación y las instancias de participación ciudadana.

CAPÍTULO IX.

9.- Análisis de datos, obtención de potencia generada y factor de planta asociado.

Luego de seleccionar las localidades y los dispositivos, se hizo necesario dimensionar las instalaciones, para esto, lo primero fué determinar la potencia que se extraería del mar en cada localidad, usando los dispositivos previamente seleccionados, y una manera de hacerlo fué considerando los datos promedios de alturas significativas y períodos energéticos anuales de los lugares en cuestión, con esta información se obtuvo la potencia media anual para cada localidad, luego se ingresaron los valores de alturas y períodos a las matrices de potencia que poseen las tecnologías Pelamis y Aquabuoy para los modelos P-750 y 2.0 respectivamente. Estas matrices fueron confeccionadas mediante el estudio de los sistemas experimentales a diferentes condiciones (alturas y períodos), además incluyen de manera implícita los rendimientos de las conversiones primarias, secundarias y terciarias, por lo que es mas fácil predecir la potencia que entregará el dispositivo.

Las tablas 9.1 y 9.2 muestran las matrices de potencia Pelamis para el modelo P-750 y Aquabuoy, modelo 2.0.

Tabla 9.1.- Matriz de potencias Pelamis, modelo P-750 (kW).

Hs(m)\Te(s)	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	10,5	11	11,5	12	12,5	13
1		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	57	88	115	163	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	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			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				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					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						750	750	750	750	750	750	750	750	676	613	584	525
7,5							750	750	750	750	750	750	750	750	686	622	593
8								750	750	750	750	750	750	750	750	690	625

Fuente: [7]

Tabla 9.2.- Matriz de potencias Aquabuoy, modelo 2.0 (kW).

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

Fuente: [7]

9.1.- Cálculo de potencia y energía.

Usando las matrices propuestas anteriormente, se pudo determinar la potencia anual que se obtendría en cada zona con los dispositivos Pelamis y Aquabuoy. La información de la tabla 9.3, se utilizó ingresando en las matrices respectivas, para así determinar la potencia que se obtendría, trabajando en las condiciones mencionadas (Hs y Te), además empleando una interpolación de doble entrada, se consiguió determinar la potencia con mayor grado de exactitud, los resultados se presentan en la tabla 9.4 y 9.5.

Tabla 9.3.- Altura y periodos medios anuales para zonas de estudio.

Zonas en estudio.	Hs (m)	Te (s)
San Antonio	2,56	10,05
San Vicente	2,96	9,97
Corral	3,18	9,9

Fuente: [Elaboración propia]

Tabla 9.4.- Potencia media anual convertidor Pelamis.

Zonas en estudio.	Hs (m)	Te (s)	Potencia media anual (kW)
San Antonio	2,56	10,05	186,2
San Vicente	2,96	9,97	236,8
Corral	3,18	9,9	276,9

Fuente: [Elaboración propia]

Tabla 9.5.- Potencia media anual convertidor Aquabuoy.

Zonas en estudio.	Hs (m)	Te (s)	Potencia media anual (kW)
San Antonio	2,56	10,05	76,5
San Vicente	2,96	9,97	100,7
Corral	3,18	9,9	107,8

Fuente: [Elaboración propia]

Para determinar la energía basta con establecer una operación anual de 8.760 h/año de funcionamiento, por lo que la energía anual que se obtuvo con ambos dispositivos fué la siguiente:

Tabla 9.6.- Energía media anual convertidor Pelamis.

Zonas en estudio.	Energía media anual (GWh)
San Antonio	1,63
San Vicente	2,07
Corral	2,43

Fuente: [Elaboración propia]

Tabla 9.7.- Energía media anual convertidor Aquabuoy.

Zonas en estudio.	Energía media anual (GWh)
San Antonio	0,67
San Vicente	0,88
Corral	0,94

Fuente: [Elaboración propia]

Los resultados demuestran la lógica nacional en lo que se refiere a energías de las olas, ya que la energía aumenta hacia el sur del país.

9.2.- Factor de planta o capacidad.

Este factor proporciona una idea de la efectividad de la planta o en este caso dispositivo, si bien este factor no es constante y puede variar dependiendo de las condiciones climáticas u otros factores, aunque los dispositivos tienden a estar, generalmente dentro de un rango. Para los

convertidores undimotrices, el EPRI¹³ estima un factor de capacidad para Pelamis y Aquabuoy de 40% [18].

El factor de capacidad, se determinó de la siguiente manera:

$$FC = \frac{E_a}{E_n} \cdot 100\% \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde:

E_a Energía media anual generada. Se mide en (GWh).

E_n Energía nominal anual generada. Se mide en (GWh).

La energía nominal anual generada, se determinó de la siguiente manera:

$$E_n = P_{\max} \cdot t_o \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

$P_{\max}$ Potencia máxima del dispositivo. 700kW para Pelamis P-750 y 250kW para Aquabuoy 2.0.

t_o Tiempo anual de operación. 8.760 h/año.

Utilizando las ecuaciones 14 y 15, se determinaron los factores de capacidad de cada dispositivo en las diferentes zonas de estudio.

Tabla 9.8.- Factor de capacidad Pelamis.

Zonas en estudio.	Energía media anual (GWh)	Energía nominal anual (GWh)	Factor de capacidad (%)
San Antonio	1,63	6,57	24,8
San Vicente	2,07	6,57	31,5
Corral	2,43	6,57	37,0

Fuente: [Elaboración propia]

Tabla 9.9.- Factor de capacidad Aquabuoy.

Zonas en estudio.	Energía media anual (GWh)	Energía nominal anual (GWh)	Factor de capacidad (%)
San Antonio	0,67	2,19	30,6
San Vicente	0,88	2,19	40,2
Corral	0,94	2,19	42,9

Fuente: [Elaboración propia]

¹³ EPRI: Instituto de investigación de energía eléctrica.

9.3.- Características de la instalación.

Una vez estudiado el potencial energético de cada zona con los dispositivos Pelamis y Aquabuoy, se dimensionaron dos parques de generación eléctrica como pequeño medio de generación distribuida. De acuerdo a lo visto en los antecedentes legales, un PMGD es aquel con una potencia anual menor a 9MW, por lo que el parque debe estar bajo ese valor. Además dado que las zonas elegidas para implementar los dispositivos se encuentran cercanas a puertos, no se puede idear un parque con una superficie muy extensa, debido al tráfico marino, por lo que el ideal es implementar una cantidad adecuada de dispositivos, de manera se analizó un parque undimotriz, con una potencia anual máxima teórica de 4.5MW, en las tablas 9.10 y 9.11, se determinó el número de dispositivos de cada parque, la potencia y energía anual, para cada localidad en estudio.

Tabla 9.10.- Parámetros parque undimotriz Pelamis.

Zonas en estudio.	Nº de dispositivos	Potencia media anual (MW)	Energía anual (GWh)
San Antonio	6	1,12	9,81
San Vicente	6	1,42	12,44
Corral	6	1,66	14,54

Nnn Fuente: [Elaboración propia]

Tabla 9.11.- Parámetros parque undimotriz Aquabuoy.

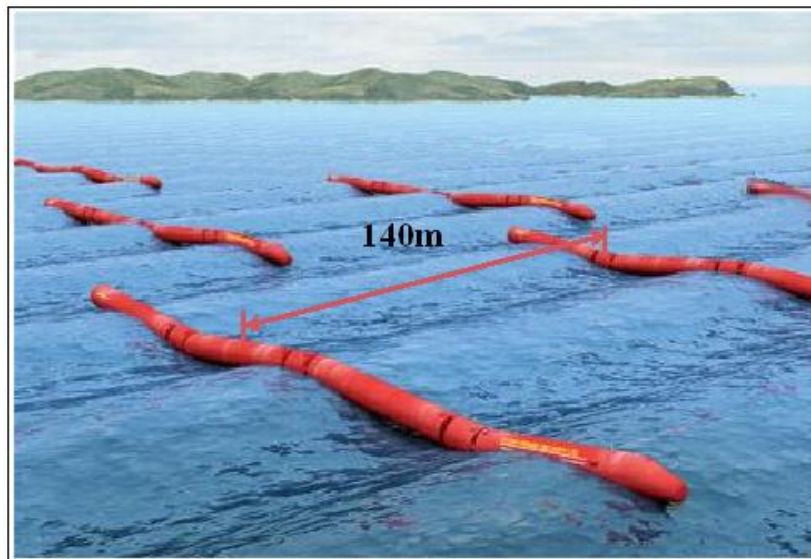
Zonas en estudio.	Nº de dispositivos	Potencia media anual (MW)	Energía anual (GWh)
San Antonio	18	1,34	11,74
San Vicente	18	1,81	15,86
Corral	18	1,94	17

Fuente: [Elaboración propia]

Luego de determinar los parámetros de los respectivos parques undimotrices, fue necesario determinar de manera general el layout de ambos parques, para así poder determinar la superficie que estos ocuparían en alta mar. La figura 9.1 muestra la distribución recomendada por los fabricantes de la tecnología Pelamis, la instalación se realiza en forma de pirámide invertida, donde la separación entre un dispositivo y otro es de 140m [23], espacio destinado a las amarras, mayor captación y trabajos de mantenimiento, dado estos valores se pudo estimar la superficie utilizada, equivalente a 88.200m². Para el caso del parque Aquabuoy, la empresa fabricante recomienda una

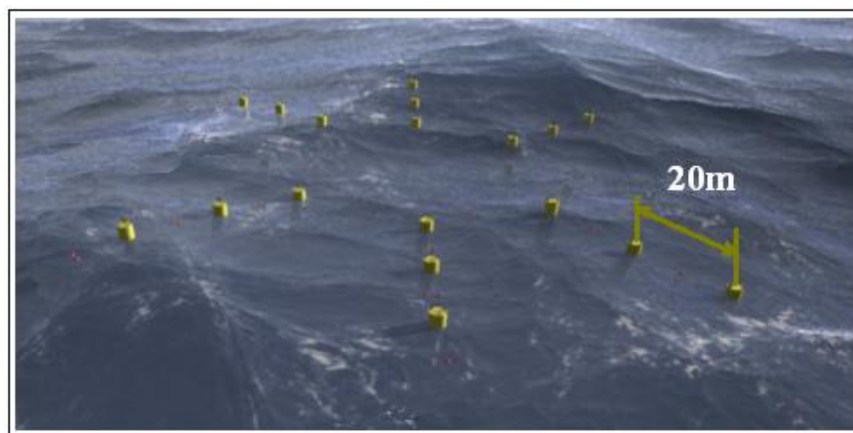
distribución circular, tal y como lo muestra la figura 9.2, donde la separación entre cada una de las boyas es de 20m [24], por lo que se estimó una superficie de 15394 m².

Figura 9.1.- Layout parque undimotriz Pelamis P-750.



Fuente: [Elaboración propia]

Figura 9.2.- Layout parque undimotriz Aquabuoy 2.0.



Fuente: [Elaboración propia]

CAPÍTULO X.

10.- Estudio y análisis económico

En este estudio económico se consideró sólo la zona que posee el mayor potencial de energía undimotriz, que de acuerdo al estudio realizado es la zona de Corral, en la XIV Región de los Ríos, se consideraron además ambos dispositivos, Pelamis y Aquabuoy, con el número de unidades previamente mencionadas. Como consideración técnica, la distancia desde el mar hasta la subestación más cercana será de 17km [16].

Para evaluar de una mejor manera la implementación de dispositivos undimotrices, se estimó un horizonte de 20 años en los cálculos y se estudiaron tres escenarios diferentes económicos, optimista, pesimista y conservador, además se incluyó un análisis de sensibilidad, para ver las variaciones que pueden presentar a futuro algún cambio en la tecnología, en los precios de la energía, etc.

10.1.- Flujo de caja.

Para analizar la conveniencia de un proyecto, fué necesario determinar los costos e ingresos anuales, incluyendo los costos de inversión y determinar la depreciación junto con el capital de trabajo. Para determinar la rentabilidad del proyecto, se consideró una tasa de descuento del 10%.

10.1.1.- Ingresos.

Los ingresos para un proyecto de ERNC, se dividieron en 3 partes, considerando la nueva ley de incentivo 20.257 para precios, estos fueron: los ingresos por la venta de la energía, por venta de potencia y por venta de bonos de carbono.

Los ingresos se determinaron utilizando la siguiente ecuación [25]:

$$I = E_T \cdot Pe_{Lp} + P_{Firme} \cdot P_{Pot} + Bono\ Carbono \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

E_T Energía producida por la central undimotriz. Se mide en (MWh).

Pe_{lp} Precio de la energía en el largo plazo. Se mide en $\frac{US\$}{MWh}$.

P_{firme} Factor que pondera la energía para el cálculo de la potencia firme. Se mide en (MWh).

P_{pot} Precio de la potencia en el largo plazo. Se mide en $\frac{US\$}{MWh}$.

Bono Carbono Precio de los bonos de carbono en el largo plazo. Se mide en (US\$).

10.1.1.1.- Venta de energía.

La venta de energía es la principal fuente de ingresos de una central eléctrica, para nuestro caso se consideraron tres escenarios posibles de los precios, para la venta de la energía bruta y potencia al mercado spot¹⁴, sin contratos de venta, estos escenarios se evaluaron de la siguiente manera [25]:

- **Escenario Pesimista:**

Comprende el precio actual de las energías marinas, que es de 80 US\$/MWh en los estudios de largo plazo, además se estimará un crecimiento anual del -2%

- **Escenario Moderado:**

Se estimará en base al precio de acuerdo a la ley ERNC, donde se aumenta el valor en 0.4UTM¹⁵, por lo que el precio en el largo plazo equivale a 113.8 US\$/MWh, con un crecimiento anual del 1%

- **Escenario Optimista:**

De acuerdo a la ley ERNC, el máximo valor que se puede cobrar por la electricidad es 0.6UTM, por lo que el precio de la energía quedaría en 130.7 US\$/MWh, con un crecimiento anual del 2%.

Los precios de los escenarios se basan en el valor de la UTM de marzo 2013.

10.1.1.2.- Venta de Potencia.

El concepto de venta por potencia, es un incentivo que premia al generador por poner capacidad a disposición del sistema. Esta potencia se paga de acuerdo a la potencia firme, que se estima dependiendo del sistema de generación eléctrica, para el caso de la energía undimotriz, este valor se pondera a 0.7 el factor de planta y se paga a 3.1 US\$/MWh [25] desde el año uno, con un aumento del 2% anual.

¹⁴ Mercado spot: Mercado donde se intercambia la energía producida o faltante al costo marginal horario.

¹⁵ UTM: Unidad tributaria mensual.

10.1.1.3.- Venta de bonos carbono.

Los bonos de carbono son un método internacional que busca reducir las emisiones contaminantes al medio ambiente; es uno de los tres mecanismos propuestos en el Protocolo de Kioto para la reducción de emisiones causantes del calentamiento global o efecto invernadero. Las reducciones de emisiones de GEI¹⁶ se miden en toneladas de CO₂ equivalente, y se traducen en Certificados de Emisiones Reducidas (CER). Un CER equivale a una tonelada de CO₂ que se deja de emitir a la atmósfera, y puede ser vendido en el mercado de carbono.

Para determinar los ingresos por venta de carbono, se consideró que el ahorro en la producción de CO₂, debido a la generación de electricidad por un medio limpio es de 0,609 (tCO₂/MWh) y que el precio de los bonos de carbono es de 10 (US\$/tCO₂) [10].

10.1.2.- Costos.

Los costos se determinaron estimando los costos de los dispositivos, de la instalación y por operación y mantenimiento, todos estos costos se detallan a continuación:

10.1.2.1.- Costos de instalación.

Corresponde a todos los costos necesarios para dejar los equipos del parque en funcionamiento, dado que los costos asociados a la instalación dependen de la inversión de los equipos, es necesario determinar el precio unitario de los dispositivos, la tabla 10.1 muestra los valores unitarios de inversión de los dispositivos Pelamis y Aquabuoy,

Tabla 10.1.- Inversión requerida distintos dispositivos de olas.

	Inversión	Potencia total
Aquabuoy 2.0	0.6MMUS\$	0.25MW
Pelamis P-750	2.4MMUS\$	0.75MW

Fuente: [13]

La tabla 10.2, muestra en detalle los aspectos más relevantes en la etapa de instalación, muestra además los valores porcentuales referentes a la inversión, es necesario destacar, que los costes de

¹⁶ GEI: Gases de Efecto Invernadero.

amarres de dispositivos se encuentran en el ítem, obras civiles, y los costes de instalación de líneas eléctricas y sistemas de protección en obras eléctricas.

Tabla 10.2.- Composición de costos de la instalación.

Aspecto	Porcentaje de costo de la inversión
Ingeniería y proyectos	5%
Estudios Terrestres	2%
Estudios Marinos y Batimetría	3%
DIA-EIA ¹⁷	1%
Legales y Concesiones	2%
Fletes	1%
Seguros Locales	1%
Obras Eléctricas y de casa de máquina	30%
Obras Civiles y Montaje	20%

Fuente: [10]

Utilizando el contenido de las tablas anteriores, se pudo determinar la inversión total para un parque undimotriz Pelamis y Aquabuoy, los resultados se expresan en la tabla 10.3.

Tabla 10.3.- Inversión parques undimotrices.

Tecnologías Undimotrices	Pelamis	Aquabuoy
Costo unitario (US\$)	2.400.000	600.000
Nº de dispositivos	6	18
Costo total Inversión equipos. (US\$)	14.400.000	10.800.000

Fuente: [Elaboración Propia]

10.1.2.2.- Costos de operación y mantenimiento (O&M).

Los costos de operación y mantenimiento de un dispositivo undimotriz, equivalen al 3% de la inversión [21].

10.1.2.3.- Otros Costos.

Otros costos que se consideraron, fueron los costos administrativos, que equivalen a 0.5% de los ingresos anuales [10].

¹⁷ DIA-EIA: Declaración de Impacto Ambiental- Estudio de Impacto Ambiental.

10.1.3.- Depreciación.

La depreciación es la disminución anual del valor de un activo, debido al uso o deterioro de este. Para el caso de este trabajo, se determinó una depreciación lineal a 20 años. (Ver anexo A).

10.1.4.- Capital de trabajo.

El capital de trabajo corresponde a los recursos que son necesarios para que la planta opere, es decir, es la diferencia entre los activos corrientes y los pasivos corrientes. Dado que no existe información de referencia, se estimó un valor de 750.000US\$, que son lo necesario para mantener funcionando la planta un año calendario.

10.2.- Resultados.

Una vez realizados los flujos de caja (ver anexo B), se determinó el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y el Período de Recuperación de la Inversión (PRI), para ambos parques en la zona de Corral.

Tabla 10.4.-Resultados evaluación económica. Parque Pelamis.

Escenarios de evaluación.	VAN (US\$)	TIR (%)	PRI (Años)
Optimista	-13.577.768	0,93	44
Moderado	-16.373.655	-2.13	59
Pesimista	-23.603.361	-74.4	482

Fuente: [Elaboración Propia]

Tabla 10.5.-Resultados evaluación económica. Parque Aquabuoy.

Escenarios de evaluación.	VAN (US\$)	TIR (%)	PRI (Años)
Optimista	-3.632.848	7,2	24
Moderado	-6.845.784	4,15	31
Pesimista	-13.072.139	-6	68

Fuente: [Elaboración Propia]

El análisis y estudio económico de ambos proyectos, demostró que implementar un proyecto de aprovechamiento undimotriz, usando dispositivos Pelamis aún no es rentables, pero a la vez se puede observar que el dispositivos Aquabuoy arroja mejores resultados en el escenario optimista, donde la TIR es aceptable para la inversión privada, por lo que se puede considerar en un plazo

futuro. Unas de las causas de esta diferencia entre ambos parques es que este dispositivo posee un mejor factor de planta, por lo que genera más energía eléctrica.

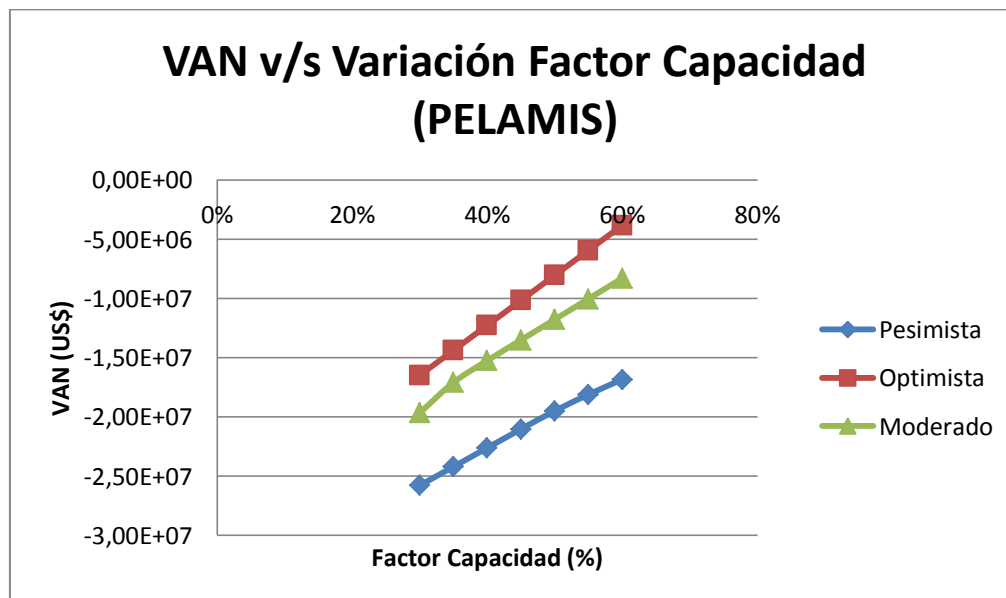
10.3.- Análisis de sensibilidad.

El estudio económico demostró que es posible aprovechar la energía undimotriz que presenta el mar de Chile, mediante uno de los dos dispositivos con mayor experiencia y desarrollo en el ámbito energético marino. Si bien los resultados presentan valores negativos, al realizar el análisis de sensibilidad para ambas propuestas, comparando el VAN con la variación del factor de capacidad, los costos de inversión y la tasa de descuento, se obtuvieron las siguientes conclusiones.

10.3.1.- Factor de capacidad.

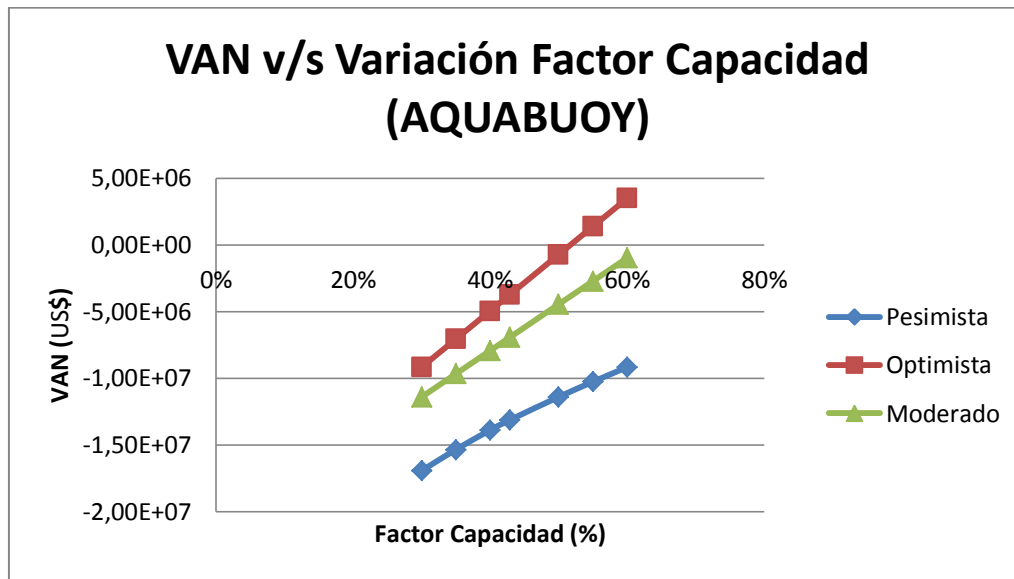
Las tecnologías undimotrices se encuentran en un desarrollo temprano, por lo que esperar un aumento en su capacidad de generar energía, debido a perfeccionamientos y avances tecnológicos es un factor importante a considerar. Las figuras 10.1 y 10.2, muestran las variaciones en el VAN de ambos parques en estudio y se puede apreciar que el parque Aquabuoy necesita un factor de capacidad superior al 50% para hacer el proyecto aceptable en el escenario optimista y un poco más del 60% para hacerlo viable, en un escenario normal (VAN > 0).

Figura 10.1.-Análisis de sensibilidad por factor de capacidad.



Fuente: [Elaboración Propia]

Figura 10.2.-Análisis de sensibilidad por factor de capacidad.

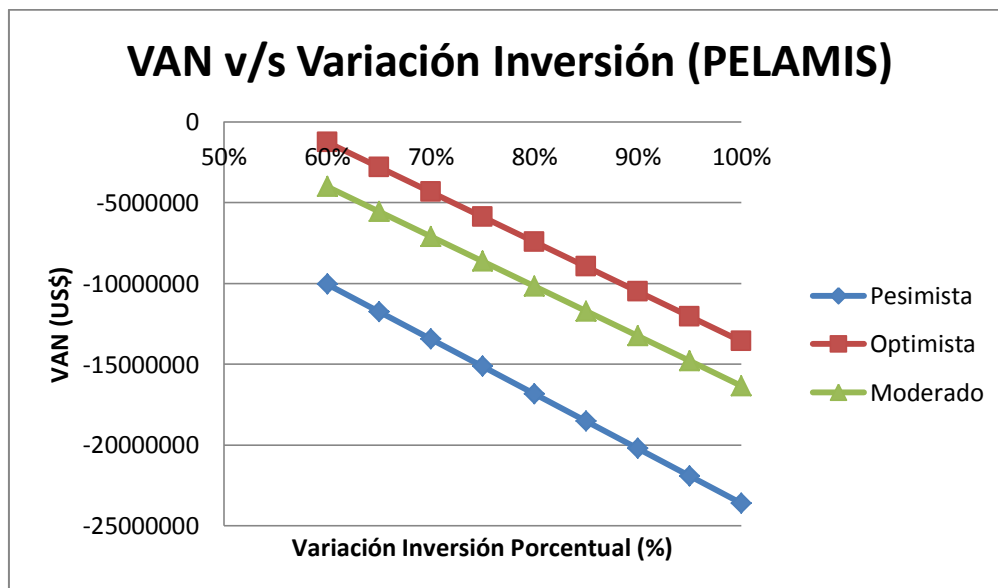


Fuente: [Elaboración Propia]

10.3.2.- Costos de inversión.

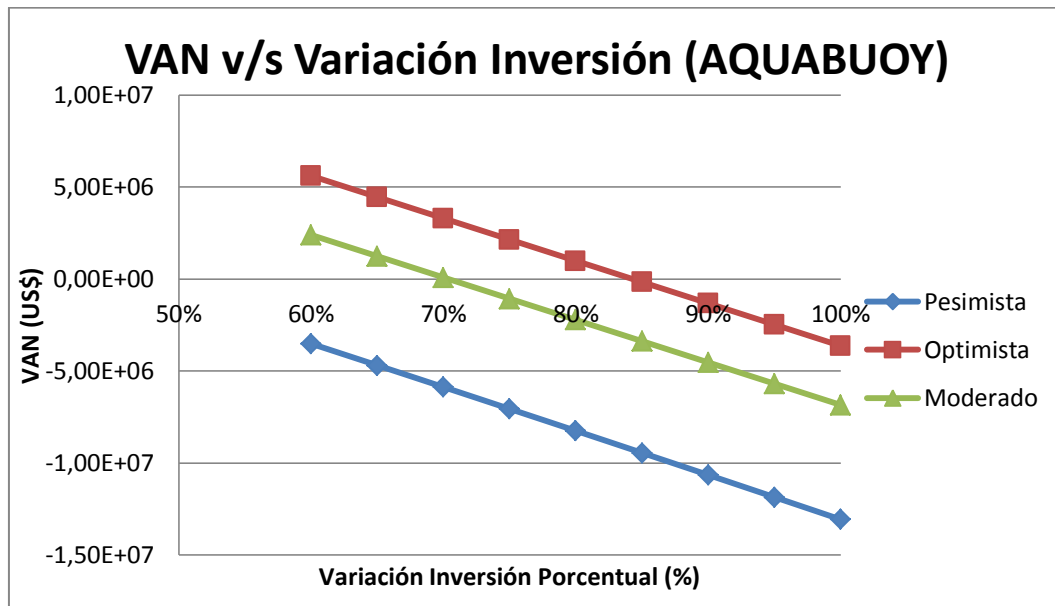
Hoy en día invertir en ERNC es más caro que hacerlo con energías convencionales, pero año a año la brecha disminuye un poco, es por esto que es necesario evaluar el comportamiento de los proyectos de acuerdo a las variaciones en la inversión.

Figura 10.3.-Análisis de sensibilidad por Inversión.



Fuente: [Elaboración Propia]

Figura 10.4.-Análisis de sensibilidad por Inversión.



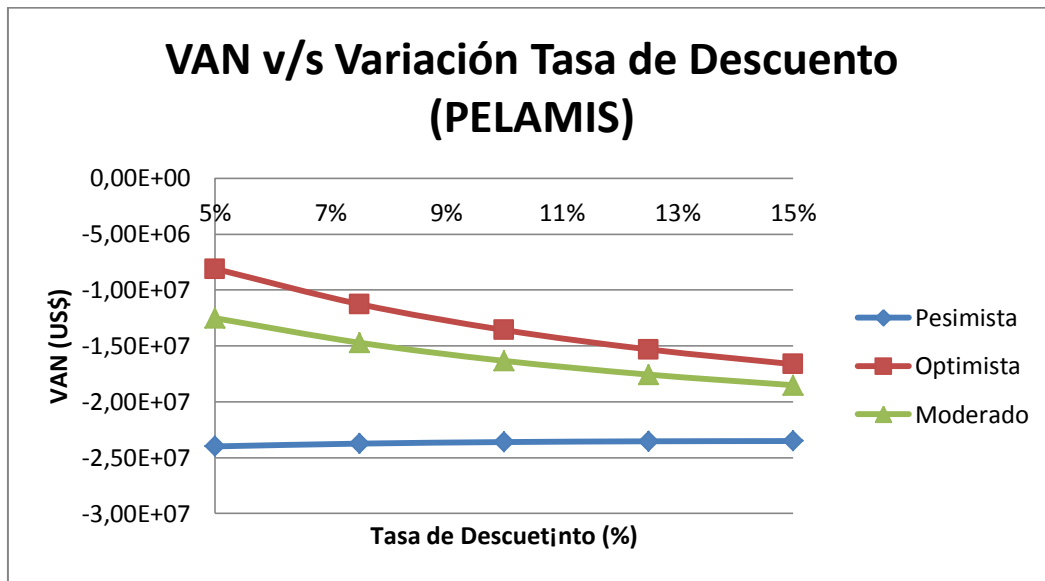
Fuente: [Elaboración Propia]

En las figuras, se puede apreciar que para que el parque Pelamis pueda llegar a ser rentable, necesita de por lo menos una reducción del 50% de la inversión actual, en cambio, el parque Aquabuoy, solo necesita que la inversión se reduzca en un 15% para ser rentable, lo que hace pensar que en un futuro próximo esta tecnología se impondrá por el resto.

10.3.3.- Tasa de descuento.

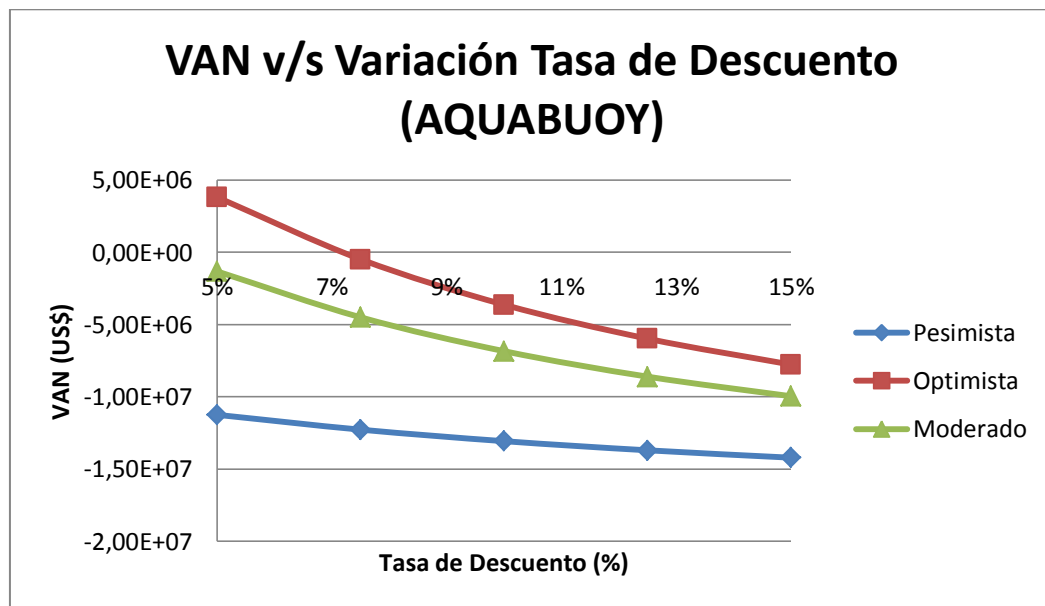
Como sabemos la tasa de descuento corresponde al valor actual de un pago futuro, por lo que es una medida financiera de mucha relevancia en la evaluación de un proyecto. Generalmente los proyectos son evaluados con tasa de descuento del 10%, como es en este caso, pero es necesario conocer la sensibilidad del proyecto a la hora de variar la tasa de descuento. Las figuras 10.5 y 10.6 entregan información importante acerca de esta variación, como se puede apreciar el parque Aquabuoy presenta una variación importante para los escenarios moderado y optimista, siendo este último el que genera una rentabilidad al evaluar el proyecto con una tasa del 7.2% (igual valor que el TIR), lo que demuestra que se encuentra en un rango aceptable y como un proyecto a considerar.

Figura 10.5.-Análisis de sensibilidad de la Tasa de descuento.



Fuente: [Elaboración Propia]

Figura 10.6.-Análisis de sensibilidad en la Tasa de descuento.



Fuente: [Elaboración Propia]

CAPÍTULO XI

11.- Conclusiones.

En esta habilitación profesional se estudió técnica y económicamente la forma de aprovechar la energía undimotriz en Chile. Se desarrolló una metodología de trabajo, que comenzó con considerar la importancia de establecer como objetivo, el desarrollo de ERNC, pensando en la necesidad energética y el cuidado ambiental de nuestro país, para luego finalizar analizando la idea de implementar tecnologías en aguas nacionales.

En relación a los objetivos planteados, se concluye que luego de estudiar las características de las olas del mar y conocer la capacidad que tienen las olas de absorber energía, es necesario aprovechar dicho fenómeno, principalmente aquel que es generado por acción del viento y que se presenta en períodos cortos, pero altamente energéticos.

Con respecto a la forma de aprovechar la energía de las olas presentes en el mar, se pudo comprobar en esta habilitación profesional, que existe una gran cantidad de dispositivos que pueden realizar ese trabajo, cada uno con particularidades y métodos de captación diferentes, pero que aún están en etapas de desarrollo e investigación.

Otro objetivo fué identificar el potencial existente en Chile y definir las zonas que pueden ser elegidas para implementar futuros parques olamotrices, el estudio reveló que nuestras costas poseen un potencial en sus olas que van desde los 22kW/m por el norte hasta los 66kW/m en el sur, descartándose el territorio al sur de Puerto Montt, por tener una gran cantidad de reservas naturales e inaccesibilidad cercana de puertos para instalaciones y operaciones de mantenimiento. Utilizando el sistema GIS, que analizó distintos factores excluyentes e importantes, se definió como lugares estratégicos y de estudio, las zonas cercanas al Puerto de San Antonio, Puerto de San Vicente y del Puerto de Corral.

Determinadas las localidades, el objetivo fué seleccionar el dispositivo de captación que pudiese ser implementado, esto se logró en base a tres criterios de selección, de acuerdo a la inversión, a los aspectos tecnológicos y el factor medioambiental; siendo el atenuador Pelamis y el absorbedor puntual Aquabuoy los seleccionados.

La evaluación técnica demostró que ambos poseen capacidades de generación eléctrica que varían por la zona en la que se implemente, el dispositivo Pelamis genera más potencia que Aquabuoy,

pero posee un factor de capacidad 5% menor, también se estudió la potencia que generan estos dispositivos en cada una de las zonas en cuestión, siendo la localidad de Corral, la que contribuye a una extracción mayor de energía por parte de los convertidores, siendo algo lógico considerando que la energía del oleaje aumenta hacia el sur del país, finalmente se calculó la implementación de un parque como un pequeño medio de generación distribuida, con una potencia nominal anual de 4.5MW, lo que resultó en un parque de 6 dispositivos Pelamis con una superficie de uso de 88.200m² y una potencia media anual de 1.66MW, y un parque Aquabuoy de 18 dispositivos con una potencia media anual de 1.94MW y una superficie de 15.394m².

Por ultimo, la evaluación económica demostró que actualmente la tecnología undimotriz mantiene altos costos de inversión, si bien se evaluaron tres escenarios posibles, basados en la nueva ley de incentivo de ERNC, solo el parque Aquabuoy tiene posibilidades de ser implementado, considerando que en el escenario optimista genera un VAN de -3.632.848 US\$, con una tasa de retorno del 7.26%, que se encuentra en los valores aceptables para recibir apoyo externo como proyecto, cabe destacar además, que el proyecto Aquabuoy sería rentable si el precio de venta de la energía estuviera sobre los 158US\$/MWh, lo que en zonas extremas puede presentarse como una alternativa futura, por otra parte, el parque Pelamis sería rentable si el precio de la energía es superior a 251US\$/MWh, valor muy alto e improbable. Finalmente, los análisis de sensibilidad demostraron que en un tiempo más los proyectos serán rentables, ya que se espera una reducción en las inversiones y un aumento en la capacidad de generar energía eléctrica.

En resumen, Chile posee un potencial energético marino muy por encima de otros países, energía que es necesario explotar, pensando en la necesidad de seguir la senda del desarrollo.

CAPÍTULO XII

12.- Bibliografía.

- [1].- **Comisión Nacional de Energía.** *Capacidad instalada por sistema eléctrico nacional.* Santiago : s.n., Diciembre 2011.
- [2].- **Comisión Nacional de Energía.** CNE. [En línea] 2012. [Citado el: 8 de Diciembre de 2012.] <http://www.cne.cl/energias/electricidad/sistemas-electricos>.
- [3].- **Ministerio de Energía.** *Energía para el futuro, Estrategia nacional de energía 2012-2030.* Santiago : a, 2012.
- [4].- **Olivares S, Alfredo y Maldonado G, Paula.** *Reporte CER, Estados de proyectos ERNC en Chile.* Noviembre 2012.
- [5].- *Energía marina en Chile.* **Maldonado P, Daniela.** 11, Santiago : s.n., Diciembre de 2011, Sustenta BIT, págs. 14-19.
- [6].- **Fernandez Díez, Pedro.** Bilioteca sobre "Ingeniería Energética". [En línea] 2000-2009. <http://es.libros.redsauce.net/index.php?pageID=15>.
- [7].- **Cavio del Olmo; Berta.** *Explotación del potencial de energía del oleaje en función del rango de trabajo de prototipos captadores.*
- [8].- **Calero P, Roque, Carta G, José y Padrón H, José.** Programa Educativo Eficiencia Energética. Las Palmas de Gran Canaria : Educación Ambiental, págs. 513-552.
- [9].- **Vates Avilés; Alba.** *Sistema de conversión de la energía de las olas.* s.l. : Università degli studi di Firenze; Facoltà di Ingegneria, 2009.
- [10].- **Medel Caro; Sebastián.** *"Estudio de implantación de tecnologías mareomotrices y undimotrices como pequeños medios de generación distribuida".* Santiago de Chile : Universidad de Chile, 2010.
- [11].- **Rodriguez, R; Ricci, P; Marón, A; Prieto, M.E; Fernández, D; Taboada, M.** *"Diseño y ensayos del sistema de fondeo de un convertidor de energías de las olas".* Madrid : Ministerio de defensa, Octubre 2008. 209.
- [12].- **Fernández Chozas, Julia.** *"Una aproximación al aprovechamiento de la energía de las olas para la generación de electricidad".* Madrid : Universidad Politécnica de Madrid, 2008.

- [13].- **Rodríguez Rivas, Carlos**. *"Análisis de viabilidad económica de una plataforma de energía marítima"*. Madrid : Universidad Pontificia Comillas., 2010
- [14].- *State of the art analysis*. **Dr Lewis, Tony**. Bruselas : WAVEPLAM, 2009. EU Sustainable Energy Week.
- [15].- **CC Enríquez Olavarría, Andrés**. *Información oceanográfica para la aplicación de la generación de energía*. s.l. : Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile. (SHOA), 2008.
- [16].- **Cruz, J; Thomson, M D; Stavroulia E**. *Preliminary site selection- Chilean marine energy resources*. s.l. : Garrad Hassan, 2009. 100513/BR/02.
- [17].- **NOOA, National weather service**. Environmental Modeling Center. [En línea] 2013. <http://polar.ncep.noaa.gov/>.
- [18].- **Bedard, Roger**. *Wave Energy technology Assessment*. s.l. : EPRI, 2009. EPRI-WP-013-OR.
- [19].- **Migueléiz Pose, Fernanda**. *Los otros usos del mar*. La Coruña : Netbiblo. S. L., 2010. ISBN: 978-84-9745-460-5.
- [20].- **Eroski Consumer**. Infografía: Energía Unidimotriz. [En línea] http://www.consumer.es/web/es/medio_ambiente/energia_y_ciencia/2009/02/01/183097.php.
- [21].- **Waveplam**. *Energía de las olas- Guía para inversores y responsables políticos*. 2008.
- [22].- **Errázuriz & Asociados Ingenieros; abogados Guerrero, Olivos, Novoa y Errázuriz**. *ENERGÍA MARINA EN CHILE Avanzando en el desarrollo del recurso Chileno*.
- [23].- **Pelamis Wave Power**. [En línea] <http://www.pelamiswave.com/>.
- [24].- **Finavera Wind Energy**. [En línea] <http://www.finavera.com/>.
- [25].- **Saldías Hernaldo; Ulloa Hernán**. *"Evaluación comparativa de centrales de generación de energías renovables mediante la aplicación de la nueva ley de energías renovables recientemente aprobada en Chile"*. Santiago : Pontificia Universidad Católica de Chile. Escuela de Ingeniería. Dpto Ingeniería Eléctrica., 2008. IE3372 .

CAPÍTULO XIII.

13.- Anexos.

13.1.- Anexo A. Cálculo de depreciación para parque undimotriz Pelamis y Aquabuoy.

Cálculo depreciación Aquabuoy	US\$
Equipo Aquabuoy x18	10.800.000
Obras civiles y montaje.	2.700.000
Total	13.500.000
Años	20
Depreciación Total	675.000

Cálculo depreciación Pelamis.	US\$
Equipo Pelamis x6	14.400.000
Obras civiles y montaje.	3.600.000
Total	18.000.000
Años	20
Depreciación Total	900.000

13.2.- Anexo B.

13.2.1.- Flujos de caja parque PELAMIS, escenario Optimista en US\$.

Ítem	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Energía [MWh/año]		14541,6	14541,6	14541,6	14541,6	14541,6	14541,6	14541,6	14541,6
Potencia firme [MWh]		10249,2	10249,2	10249,2	10249,2	10249,2	10249,2	10249,2	10249,2
Ingresos									
Precio Energía [US\$/MWh]		130,7	133,31	135,98	138,70	141,47	144,30	147,19	150,13
Venta de Energía		1900587	1938599	1977371	2016918	2057257	2098402	2140370	2183177
Precio Potencia [US\$/MWh]		3,1	3,162	3,22524	3,289745	3,35554	3,42265	3,491103	3,560926
Venta de Potencia		31773	32408	33056	33717	34392	35079	35781	36497
Reducción ton de CO ₂		8856	8856	8856	8856	8856	8856	8856	8856
Precio CER [US\$/tCO ₂]		10	10	10	10	10	10	10	10
Venta de CER		88558	88558	88558	88558	88558	88558	88558	88558
Total Ingresos		2020918	2059565	2098985	2139194	2180207	2222040	2264709	2308232
Costos									
Costos Operación y mantenimiento.		-738720	-760882	-783708	-807219	-831436	-856379	-882070	-908532
Costos Administrativos		-10105	-10298	-10495	-10696	-10901	-11110	-11324	-11541
Total Costos		-748825	-771179	-794203	-817915	-842337	-867489	-893394	-920074
Depreciación (-)		-900000	-900000	-900000	-900000	-900000	-900000	-900000	-900000
Utilidad antes impuestos		372093	388386	404782	421279	437870	454550	471315	488159
Impuestos 20%		-74419	-77677	-80956	-84256	-87574	-90910	-94263	-97632
Utilidad después de impuestos		297675	310709	323826	337023	350296	363640	377052	390527
Depreciación (+)		900000	900000	900000	900000	900000	900000	900000	900000
Flujo Operacional		1197675	1210709	1223826	1237023	1250296	1263640	1277052	1290527
Inversión estimada									
Dispositivo Pelamis	-1,4E+07								
Ingeniería y proyectos	-720000								
Estudios Terrestres	-432000								
Estudios Marinos y Batimetría	-432000								
DIA-EIA	-144000								
Legales y Concesiones	-288000								
Fletes 1%	-144000								
Seguros Locales	-144000								
Obras Eléctricas y de casa de máquina	-4320000								
Obras Civiles y Montaje	-3600000								
Total inversión (US\$)	-2,5E+07								
Valor residual									
Capital de trabajo	-750000								
Flujo de capitales									
Flujo de caja	-2,5E+07	1197675	1210709	1223826	1237023	1250296	1263640	1277052	1290527

[illegible]

13.2.2.- Flujos de caja parque PELAMIS, escenario Moderado en US\$.

Ítem	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Energía [MWh/año]		14541,6	14541,6	14541,6	14541,6	14541,6	14541,6	14541,6	14541,6
Potencia firme [MWh]		10249,2	10249,2	10249,2	10249,2	10249,2	10249,2	10249,2	10249,2
Ingresos									
Precio Energía [US\$/MWh]		113,8	114,94	116,09	117,25	118,42	119,60	120,80	122,01
Venta de Energía		1654834	1671382	1688096	1704977	1722027	1739247	1756640	1774206
Precio Potencia [US\$/MWh]		3,1	3,162	3,22524	3,289745	3,35554	3,42265	3,491103	3,560926
Venta de Potencia		31773	32408	33056	33717	34392	35079	35781	36497
Reducción ton de CO ₂		8856	8856	8856	8856	8856	8856	8856	8856
Precio CER [US\$/tCO ₂]		10	10	10	10	10	10	10	10
Venta de CER		88558	88558	88558	88558	88558	88558	88558	88558
Total Ingresos		1775165	1792349	1809711	1827253	1844977	1862885	1880979	1899261
Costos									
Costos Operación y mantenimiento.		-738720	-760882	-783708	-807219	-831436	-856379	-882070	-908532
Costos Administrativos		-8876	-8962	-9049	-9136	-9225	-9314	-9405	-9496
Total Costos		-747596	-769843	-792757	-816356	-840661	-865693	-891475	-918029
Depreciación (-)		-900000	-900000	-900000	-900000	-900000	-900000	-900000	-900000
Utilidad antes impuestos		127569	122505	116954	110897	104316	97192	89504	81232
Impuestos 20%		-25514	-24501	-23391	-22179	-20863	-19438	-17901	-16246
Utilidad después de impuestos		102055	98004	93563	88718	83453	77753	71603	64986
Depreciación (+)		900000	900000	900000	900000	900000	900000	900000	900000
Flujo Operacional		1002055	998004	993563	988718	983453	977753	971603	964986
Inversión estimada									
Dispositivo Pelamis	-1,4E+07								
Ingeniería y proyectos	-720000								
Estudios Terrestres	-432000								
Estudios Marinos y Batimetría	-432000								
DIA-EIA	-144000								
Legales y Concesiones	-288000								
Fletes 1%	-144000								
Seguros Locales	-144000								
Obras Eléctricas y de casa de máquina	-4320000								
Obras Civiles y Montaje	-3600000								
Total inversión (US\$)	-2,5E+07								
Valor residual									
Capital de trabajo	-750000								
Flujo de capitales									
Flujo de caja	-2,5E+07	1002055	998004	993563	988718	983453	977753	971603	964986

[illegible]

13.2.3.- Flujos de caja parque PELAMIS, escenario Pesimista en US\$.

Ítem	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Energía [MWh/año]		14541,6	14541,6	14541,6	14541,6	14541,6	14541,6	14541,6	14541,6
Potencia firme [MWh]		10249,2	10249,2	10249,2	10249,2	10249,2	10249,2	10249,2	10249,2
Ingresos									
Precio Energía [US\$/MWh]		80	78,40	76,83	75,30	73,79	72,31	70,87	69,45
Venta de Energía		1163328	1140061	1117260	1094915	1073017	1051556	1030525	1009915
Precio Potencia [US\$/MWh]		3,1	3,16	3,23	3,29	3,36	3,42	3,49	3,56
Venta de Potencia		31773	32408	33056	33717	34392	35079	35781	36497
Reducción ton de CO ₂		8856	8856	8856	8856	8856	8856	8856	8856
Precio CER [US\$/tCO ₂]		10	10	10	10	10	10	10	10
Venta de CER		88558	88558	88558	88558	88558	88558	88558	88558
Total Ingresos		1283659	1261028	1238875	1217191	1195967	1175194	1154865	1134970
Costos									
Costos Operación y mantenimiento.		-738720	-760882	-783708	-807219	-831436	-856379	-882070	-908532
Costos Administrativos		-6418	-6305	-6194	-6086	-5980	-5876	-5774	-5675
Total Costos		-745138	-767187	-789902	-813305	-837416	-862255	-887845	-914207
Depreciación (-)		-900000	-900000	-900000	-900000	-900000	-900000	-900000	-900000
Utilidad antes impuestos		-361479	-406159	-451028	-496115	-541449	-587061	-632980	-679238
Impuestos 20%		-72296	-81232	-90206	-99223	-108290	-117412	-126596	-135848
Utilidad después de impuestos		-433775	-487391	-541233	-595338	-649739	-704473	-759576	-815085
Depreciación (+)		900000	900000	900000	900000	900000	900000	900000	900000
Flujo Operacional		466225	412609	358767	304662	250261	195527	140424	84915
Inversión estimada									
Dispositivo Pelamis	-1,4E+07								
Ingeniería y proyectos	-720000								
Estudios Terrestres	-432000								
Estudios Marinos y Batimetría	-432000								
DIA-EIA	-144000								
Legales y Concesiones	-288000								
Fletes 1%	-144000								
Seguros Locales	-144000								
Obras Eléctricas y de casa de máquina	-4320000								
Obras Civiles y Montaje	-3600000								
Total inversión (US\$)	-2,5E+07								
Valor residual									
Capital de trabajo	-750000								
Flujo de capitales									
Flujo de caja	-2,5E+07	466225	412609	358767	304662	250261	195527	140424	84915

[illegible]

13.2.4.- Flujos de caja parque AQUABUOY, escenario Optimista en US\$.

Ítem	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Energía [MWh/año]		17000	17000	17000	17000	17000	17000	17000	17000
Potencia firme [MWh]		11826	11826	11826	11826	11826	11826	11826	11826
Ingresos									
Precio Energía [US\$/MWh]		130,7	133,31	135,98	138,70	141,47	144,30	147,19	150,13
Venta de Energía		2221900	2266338	2311665	2357898	2405056	2453157	2502220	2552265
Precio Potencia [US\$/MWh]		3,1	3,16	3,23	3,29	3,36	3,42	3,49	3,56
Venta de Potencia		36661	37394	38142	38905	39683	40476	41286	42112
Reducción ton de CO ₂		10353	10353	10353	10353	10353	10353	10353	10353
Precio CER [US\$/tCO ₂]		10	10	10	10	10	10	10	10
Venta de CER		103530	103530	103530	103530	103530	103530	103530	103530
Total Ingresos		2362091	2407262	2453336	2500333	2548269	2597163	2647036	2697906
Costos									
Costos Operación y mantenimiento.		-554040	-570661	-587781	-605414	-623577	-642284	-661553	-681399
Costos Administrativos		-11810	-12036	-12267	-12502	-12741	-12986	-13235	-13490
Total Costos		-565850	-582698	-600048	-617916	-636318	-655270	-674788	-694889
Depreciación (-)		-675000	-675000	-675000	-675000	-675000	-675000	-675000	-675000
Utilidad antes impuestos		1121240	1149564	1178289	1207416	1236950	1266893	1297248	1328017
Impuestos 20%		-224248	-229913	-235658	-241483	-247390	-253379	-259450	-265603
Utilidad después de impuestos		896992	919651	942631	965933	989560	1013515	1037799	1062414
Depreciación (+)		675000	675000	675000	675000	675000	675000	675000	675000
Flujo Operacional		1571992	1594651	1617631	1640933	1664560	1688515	1712799	1737414
Inversión estimada									
Dispositivo Aquabuoy	-1,1E+07								
Ingeniería y proyectos	-540000								
Estudios Terrestres	-324000								
Estudios Marinos y Batimetría	-324000								
DIA-EIA	-108000								
Legales y Concesiones	-216000								
Fletes 1%	-108000								
Seguros Locales	-108000								
Obras Eléctricas y de casa de máquina	-3240000								
Obras Civiles y Montaje	-2700000								
Total Inversion (US\$)	-1,8E+07								
Valor residual									
Capital de trabajo	-750000								
Flujo de capitales									
Flujo de caja	-1,9E+07	1571992	1594651	1617631	1640933	1664560	1688515	1712799	1737414

[illegible]

13.2.5.- Flujos de caja parque AQUABUOY, escenario Moderado en US\$.

Ítem	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Energía [MWh/año]		17000	17000	17000	17000	17000	17000	17000	17000
Potencia firme [MWh]		11826	11826	11826	11826	11826	11826	11826	11826
Ingresos									
Precio Energía [US\$/MWh]		113,8	114,94	116,09	117,25	118,42	119,60	120,80	122,01
Venta de Energía		1934600	1953946	1973485	1993220	2013153	2033284	2053617	2074153
Precio Potencia [US\$/MWh]		3,1	3,16	3,23	3,29	3,36	3,42	3,49	3,56
Venta de Potencia		36661	37394	38142	38905	39683	40476	41286	42112
Reducción ton de CO ₂		10353	10353	10353	10353	10353	10353	10353	10353
Precio CER [US\$/tCO ₂]		10	10	10	10	10	10	10	10
Venta de CER		103530	103530	103530	103530	103530	103530	103530	103530
Total Ingresos		2074791	2094870	2115157	2135655	2156365	2177290	2198433	2219795
Costos									
Costos Operación y mantenimiento.		-554040	-570661	-587781	-605414	-623577	-642284	-661553	-681399
Costos Administrativos		-10374	-10474	-10576	-10678	-10782	-10886	-10992	-11099
Total Costos		-564414	-581136	-598357	-616093	-634359	-653171	-672545	-692498
Depreciación (-)		-675000	-675000	-675000	-675000	-675000	-675000	-675000	-675000
Utilidad antes impuestos		835377	838734	841800	844562	847006	849120	850888	852296
Impuestos 20%		-167075	-167747	-168360	-168912	-169401	-169824	-170178	-170459
Utilidad después de impuestos		668301	670987	673440	675650	677605	679296	680710	681837
Depreciación (+)		675000	675000	675000	675000	675000	675000	675000	675000
Flujo Operacional		1343301	1345987	1348440	1350650	1352605	1354296	1355710	1356837
Inversión estimada									
Dispositivo Aquabuoy	-1,1E+07								
Ingeniería y proyectos	-540000								
Estudios Terrestres	-324000								
Estudios Marinos y Batimetría	-324000								
DIA-EIA	-108000								
Legales y Concesiones	-216000								
Fletes 1%	-108000								
Seguros Locales	-108000								
Obras Eléctricas y de casa de máquina	-3240000								
Obras Civiles y Montaje	-2700000								
Total inversión (US\$)	-1,8E+07								
Valor residual									
Capital de trabajo	-750000								
Flujo de capitales									
Flujo de caja	-1,9E+07	1343301	1345987	1348440	1350650	1352605	1354296	1355710	1356837

[illegible]

13.2.6.- Flujos de caja parque AQUABUOY, escenario Pesimista en US\$.

Ítem	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Energía [MWh/año]		17000	17000	17000	17000	17000	17000	17000	17000
Potencia firme [MWh]		11826	11826	11826	11826	11826	11826	11826	11826
Ingresos									
Precio Energía [US\$/MWh]		80	78,40	76,83	75,30	73,79	72,31	70,87	69,45
Venta de Energía		1360000	1332800	1306144	1280021	1254421	1229332	1204746	1180651
Precio Potencia [US\$/MWh]		3,1	3,16	3,23	3,29	3,36	3,42	3,49	3,56
Venta de Potencia		36661	37394	38142	38905	39683	40476	41286	42112
Reducción ton de CO ₂		10353	10353	10353	10353	10353	10353	10353	10353
Precio CER [US\$/tCO ₂]		10	10	10	10	10	10	10	10
Venta de CER		103530	103530	103530	103530	103530	103530	103530	103530
Total Ingresos		1500191	1473724	1447816	1422456	1397633	1373339	1349561	1326292
Costos									
Costos Operación y mantenimiento.		-554040	-570661	-587781	-605414	-623577	-642284	-661553	-681399
Costos Administrativos		-7501	-7369	-7239	-7112	-6988	-6867	-6748	-6631
Total Costos		-561541	-578030	-595020	-612527	-630565	-649151	-668301	-688031
Depreciación (-)		-675000	-675000	-675000	-675000	-675000	-675000	-675000	-675000
Utilidad antes impuestos		263650	220694	177796	134929	92068	49188	6261	-36739
Impuestos 20%		-52730	-44139	-35559	-26986	-18414	-9838	-1252	-7348
Utilidad después de impuestos		210920	176555	142236	107943	73655	39350	5009	-44086
Depreciación (+)		675000	675000	675000	675000	675000	675000	675000	675000
Flujo Operacional		885920	851555	817236	782943	748655	714350	680009	630914
Inversión estimada									
Dispositivo Aquabuoy	-1,1E+07								
Ingeniería y proyectos	-540000								
Estudios Terrestres	-324000								
Estudios Marinos y Batimetría	-324000								
DIA-EIA	-108000								
Legales y Concesiones	-216000								
Fletes 1%	-108000								
Seguros Locales	-108000								
Obras Eléctricas y de casa de máquina	-3240000								
Obras Civiles y Montaje	-2700000								
Total inversion (US\$)	-1,8E+07								
Valor residual									
Capital de trabajo	-750000								
Flujo de capitales									
Flujo de caja	-1,9E+07	885920	851555	817236	782943	748655	714350	680009	630914

[illegible]