



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

**ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE UN PUERTO MINERO SUSTENTABLE EN
ENERGIA ELECTRICA EN CHILE**

**TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN
GESTIÓN Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS**

CRISTHIAN POLLARD POLLARD

**PROFESOR GUÍA
LUIS ZAVIEZO SCHWARTZMAN**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN
JUAN PABLO ZANLUNGO MATSUHIRO
IVÁN BRAGA CALDERÓN**

**SANTIAGO DE CHILE
2016**

RESUMEN

Las olas son un recurso energético inagotable y de costo nulo. Se estima que Chile tiene un potencial teórico bruto es de 240 GW según un estudio realizado por Baird & Associates S.A., y la actividad del oleaje es lo suficientemente intensa como para producir energía en toda la costa del Pacífico. Se podría decir que Chile es el mejor lugar del mundo para la generación de energía undimotriz, con más de 4.000 km de costa expuesta a constantes oleajes de alta energía. Esto nos muestra que sea interesante comenzar a estudiar la factibilidad de producir energía eléctrica a partir de las olas del mar, con el fin, de aportar a la diversificación del mix de generación y desincentivar el uso de combustibles fósiles para tal propósito en el país.

El presente trabajo de título tiene por finalidad evaluar la factibilidad de instalar una central undimotriz con tecnología Pelamis o Wilefko en el puerto de Minera Centinela, perteneciente al grupo Minero Chileno Antofagasta Minerals. Ubicado en la localidad de Michilla, 50 Km al Norte de la Ciudad de Mejillones en la segunda región de Antofagasta Chile, lugar privilegiado, ya que posee olas ideal para esta tecnología por su frecuencia, Amplitud y desplazamiento. Para ello, se propone crear un sistema de energías renovables no convencionales (ERNC), capaz de suministrar 2MW continuos, por medio del sistema undimotriz, inyectándolo al Sistema Interconectado del Norte Grande (SING).

Se revisará también el marco legal, tributario y económico que rige a la generación eléctrica a partir de energías renovables no convencionales (ERNC)¹ en Chile. Identificando algunas oportunidades y obligaciones para este proyecto, tomando en cuenta el interés que presenta el estado de Chile en realizar proyectos de este tipo y que se consideran en las siguientes leyes e instrumentos de incentivo tributarios vigentes:

- 1) Ley Corta 1, (ley 19.940) Fecha de publicación 12-2 -2004
- 2) Ley Corta 2, (ley 20.018) Fecha de publicación 19-05 -2005
- 3) Ley ERNC, (ley 20.257) Fecha de publicación 01-04-2008
- 4) Ley 20/25, (ley 20.698) Fecha de publicación 20-10-2013
- 5) Incentivo Tributario a la Inversión privada en Investigación y Desarrollo: La Ley I+D da el derecho a un crédito tributario equivalente a un 35% de los pagos en virtud de Proyectos certificados por Corfo.

Históricamente, Antofagasta Minerals AMSA a través de su división Minera Carolina de Michilla, ha colaborado con la comuna del mismo nombre proporcionándoles energía eléctrica desde su subestación en planta, hoy en día, esta división asumió su cierre definitivo como parte del grupo AMSA y el futuro comprador de la minera no nos asegura que dispondrá el mantener dicho aporte a esta vecina comuna. AMSA tiene un Compromiso Social con nuestros vecinos y este proyecto logra proponer una alternativa de asegurar este compromiso, a través de un proyecto para un puerto sustentable en energía y una alternativa de aporte energético para la comunidad de Michilla.

Dado el cambio climático que ha experimentado el planeta en los últimos tiempos, hoy en día urge generar energía a partir de métodos sustentables. Chile, en particular, atraviesa por una seria crisis energética producida principalmente por el aumento de la demanda nacional y este tipo de proyectos innovadores

¹ Definido por el Gobierno de Chile como excluyente de proyectos hidroeléctricos mayores a 20 MW de potencia instalada.

TABLA DE CONTENIDO

| | | |
|---------|---|----|
| 1 | INTRODUCCIÓN | 1 |
| 2 | OBJETIVO. | 5 |
| 2.1 | Objetivo General | 5 |
| 2.2 | Objetivos Específicos | 5 |
| 3 | ALCANCE. | 6 |
| 3.1 | DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO Y JUSTIFICACIÓN | 7 |
| 3.2 | Red eléctrica | 8 |
| 3.2.1 | Grandes redes eléctricas (SIC y SING) | 9 |
| 3.2.1.1 | Mercado spot | 12 |
| 3.2.1.2 | Mercado de contratos | 12 |
| 3.2.2 | MARCO REGULATORIO | 14 |
| 3.2.2.1 | Arriendos y concesiones | 15 |
| 3.2.2.2 | Permisos y Licencias | 16 |
| 3.2.2.3 | Salud y Seguridad | 18 |
| 3.2.2.4 | Conclusiones - Marco Regulatorio | 19 |
| 3.2.3 | INVESTIGACION, DESARROLLO E INNOVACION (I+D+I) | 20 |
| 3.2.3.1 | Conclusiones - investigación, desarrollo e innovación (I+D+i) | 24 |
| 3.2.4 | FINANCIAMIENTO | 27 |
| 4 | METODOLOGÍA | 34 |
| 4.1 | Esquema de Instalaciones | 37 |
| 4.2 | Capacidades de Diseño | 38 |
| 4.3 | Condiciones marítimas y Clima de Olas en Caleta Michilla | 43 |
| 4.4 | Análisis de datos y definición de equipo Wilefko | 48 |
| 4.5 | Evaluación Económica de la Inversión | 53 |
| 4.6 | Propuesta de Financiamiento | 54 |
| 5 | DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES | 55 |
| 5.1 | RESULTADOS ESPERADOS | 58 |
| 5.2 | DIFICULTADES PREVISIBLES Y ESTRATEGIAS DE SOLUCIÓN | 59 |
| 6 | BIBLIOGRAFIA | 60 |
| 7 | ANEXOS | 61 |

| | |
|--|----|
| 7.1 ANEXO.A: Dispositivos Convertidores de la Energía del Oleaje | 61 |
| 7.1.1 Clasificación según su operación | 61 |
| 7.1.2 Clasificación según su orientación | 63 |
| 7.1.3 Clasificación según su ubicación relativa a la costa | 64 |
| 7.1.4 Dispositivos Undimotrices | 65 |
| 7.1.4.1 Archimedes Wave Swing (AWS) | 65 |
| 7.1.4.2 Energetech | 66 |
| 7.1.4.3 Wave Dragon | 67 |
| 7.2 ANEXO B: Evaluación de Impacto Ambiental | 68 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla n° 1: Principales proyectos de desalación y uso de agua de mar en Chile (período 2013 al 2021) | 23 |
| Tabla n° 2: Información Económicas para las distintas regiones en Chile | 25 |
| Tabla n° 3: Comparación regional de los recursos, infraestructura y mercados energéticos para la energía marina | 26 |
| Tabla n° 4: Factores determinantes en la viabilidad financiera de la energía undimotriz | 27 |
| Tabla n°5 : Relación de altura significativa y la potencia por metro lineal. | 50 |
| Tabla n° 6 : Estadística Descriptiva de las olas operacionales | 51 |
| Tabla a.1: Cuadro Resumen de dispositivos seleccionados ^[7] | 67 |

INDICE DE ILUSTRACIONES

| | |
|--|----|
| Figura n° 1.1: Recursos de energía renovable totales de Chile versus la capacidad de generación actual (fuentes: Centro de Energías Renovables; Baird & Associates S.A.) | 1 |
| Figura n° 1.2: Factores de planta típicos para la energía renovable en Chile | 2 |
| Figura n° 1.3: Precios de mercado spot eléctrico en Chile comparados con los costos nivelados de generación undimotriz, mareomotriz y por diesel | 3 |
| Figura n° 1.4: Layout general de la segunda región de Chile | 4 |
| Figura n° 1.5: Layout general de la segunda región de Chile | 4 |
| Figura n° 2.1: Análisis menor gastos operacionales por energía | 5 |
| Figura n° 3.1: Pilares para la estrategia de energía marina del Ministerio de Energía | 7 |
| Figura n° 3.2: Gráfico de índice de costo de energía | 8 |
| Figura n° 3.2.1: Comparación de la capacidad instalada de generación con los recursos de energía marina (Sing) | 10 |
| Figura n° 3.2.2: Mapa de red eléctrica norte grande Sing | 11 |
| Figura n° 3.2.2.1: Tipos de concesiones marítimas en Chile | 15 |
| Figura n° 3.2.2.2: Tipos de concesiones marítimas en Chile | 17 |
| Figura n° 3.2.3.1: Principales interacciones medioambientales relacionadas con proyectos de energía marina | 22 |
| Figura n° 3.2.4.1: Mecanismos de apoyo financiero disponibles en Chile y aplicables a los proyectos de energía marina | 30 |
| Figura n° 3.2.4.2: Trayecto de la tecnología (basado en Carbon Trust, 2011) | 32 |
| Figura n° 4.1: Dispositivo Pelamis tamaño real | 34 |
| Figura n° 4.2: Dispositivo Pelamis operativo | 34 |
| Figura n° 4.3: Dispositivo Wilefko | 35 |
| Figura n° 4.4: Modelo del proyecto de generación energética undimotriz | 36 |
| Figura n° 4.1.1: Zona asignada para la instalación sistema undimotriz | 37 |
| Figura n° 4.1.2: Esquema de las instalaciones | 38 |

| | |
|--|----|
| Figura n° 4.2.1: Tren de paletas captadores de la energía de olas | 39 |
| Figura n° 4.2.2: Diagrama de movimientos de tren de paletas captadoras de energía de las olas del mar | 39 |
| Figura n°4.2.3: Diagrama de flujo de la planta wilefko, el tren, compresor, acumulador y el generador de 23 kv abb | 41 |
| Figura n°4.2.4: Generador tipo turbina de diseño de abb..... | 42 |
| Figura n° 4.3.1: Modelación global espectral olas del pacifico de junio 2003..... | 44 |
| Figura n° 4.3.2: Grillas para modelar la transformación de olas y punto número 1 | 47 |
| Figura n° 4.4.1: Rosa de altura del punto n1 | 48 |
| Figura n° 4.4.2: Rosa de energía de olas de n1 | 48 |
| Figura n° 4.4.3: Rosa de puntos de olas (hmo) del punto n1 | 49 |
| Figura n°4.4.4: Base teórica de cálculo del periodo y altura de ola..... | 51 |
| Figura n°4.4.5: Cálculo del ángulo y presión de trabajo | 52 |
| Figura 4.4.6: Pruebas de calibración de equipo rotatorio | 52 |
| Figura n° 4.5.1: Evaluación económica del proyecto..... | 53 |
| Figura n° 4.6.1: Propuestas de financiamiento del proyecto | 54 |
| Figura n° 5.1: Arbol de decisiones implementación..... | 58 |
| Figura n° 5.1.1 : Programa implementación proyecto | 58 |
| Figura n° a.1. Columna oscilante de agua ^[13] | 62 |
| Figura n°a.2. Dispositivo de sobrepaso, (fuente: wave dragon 2007) | 62 |
| Figura n°a.3 a) grados de libertad de un cuerpo flotante (fuente sci-tech 20059, b) esquema de un sistema activo (fuente opd 2007)..... | 63 |
| Figura n°a.4 a) parque de absorbedores puntuales, (fuente finavera 2007) b) dispositivo terminador (fuente wave dragon 2007) y c) parque de atenuadores (fuente opd 2007). | 63 |
| C) <i>atenuadores</i> : dispositivos cuyo eje principal se alinea en forma paralela a la dirección de propagación del oleaje. En esencia “atenúa” la acción de la ola, reduciendo su amplitud..... | 64 |

| | |
|---|----|
| Figura n°a.5. A) limpet 500,(fuente wavegen 2007 b) central isla de pico (fuente falcão 2000) | 64 |
| Figura n°a.6. A) esquema y dimensiones aws, b) instalación de planta piloto aws (fuente aws 2007) | 66 |
| Figura n°a.7 a) esquema y dimensiones energetech (fuente previsic 2004) b)planta piloto energetech (fuente energetech 2007)..... | 66 |
| Figura 28 a) vista en planta de wave dragon. B) prototipo de wave dragon. (fuente wave dragon 2007)..... | 67 |

1 INTRODUCCIÓN

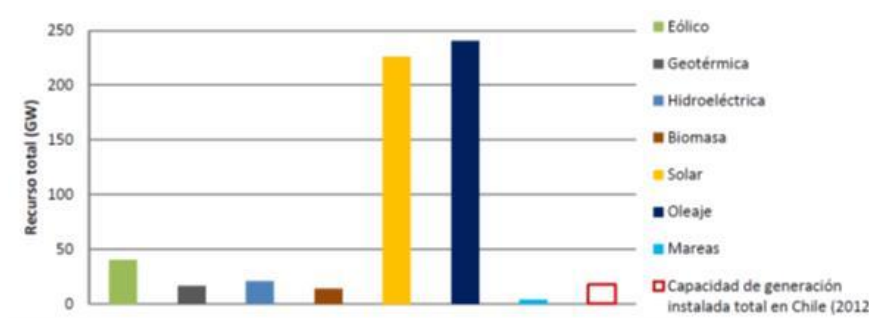
La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático, lo define como el cambio originado en el clima directa o indirectamente por la acción del hombre y que se suma a la variabilidad natural del clima. Es considerado el mayor problema ambiental que enfrenta hoy la humanidad. Su origen está íntimamente relacionado con el uso de combustibles fósiles en el transporte, la producción de electricidad y en los procesos industriales. Existen distintas maneras y tecnologías para extraer energía útil del mar, la cual dependerá de los atributos específicos de los determinados lugares (altura de olas, diferencia de mareas, morfología de la costa, corrientes submarinas, diferencias de temperaturas entre la superficie y el fondo marino, etc), por lo que Chile por su parte es beneficiada por su morfología ya que tiene más de 4.000 km de costa, lo que hace que sea una oportunidad de obtener energía del mar y que disponible, lo hace que sea más interesante.

La energía undimotriz, aprovecha la energía que genera el oleaje a través del movimiento de la ola, las olas son formadas por el arrastre generado por la fricción entre el viento y la superficie del agua. Cuanto más crece la altura de la ola, mayor su capacidad de extraer energía del viento. Las partículas de agua se mueven describiendo círculos, por lo que la ola transporta energía tanto en la superficie como en capas más profundas. Principalmente se pueden aprovechar tres fenómenos:

- a) El Empuje de la Ola
- b) La variación de la altura de la Superficie
- c) La variación de la presión bajo la superficie

Tal como se ha demostrado en estudios anteriores (E&A/UoE, 2012), (Garrad Hassan, 2009), Chile tiene un considerable potencial para generar energía a partir de las olas, y en menor grado, de las mareas. Los recursos de energía renovable de Chile sobrepasan largamente la demanda actual de electricidad (ver Figura 1.1). La energía undimotriz se presenta como una de las renovables y que más peso tendrá durante los próximos años. Se trata de una energía constante y predecible con un impacto mínimo en el entorno y como alternativas sustentables al carbón, diesel y gas, para un suministro energético nacional independiente.

Figura N° 1.1: Recursos de energía renovable totales de Chile versus la capacidad de generación actual (Fuentes: Centro de Energías Renovables; Baird & Associates S.A.)

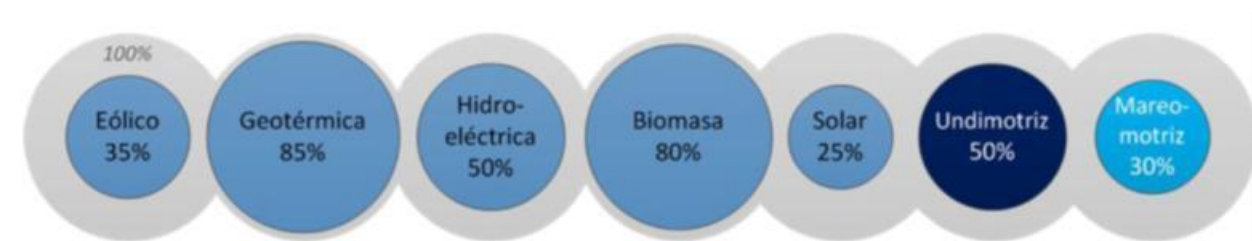


La energía undimotriz es el recurso renovable más importante de Chile. Se estima que el potencial teórico bruto es de 240 GW según un estudio realizado por Baird & Associates S.A., y la actividad del oleaje es lo suficientemente intensa como para producir energía en toda la costa del Pacífico.

Se podría decir que Chile es el mejor lugar del mundo para la generación de energía undimotriz, con más de 4.000 km de costa expuesta a constantes oleajes de alta energía, además de concentrar toda la demanda de energía en la costa o relativamente cerca de ella, debido a la angosta geografía del país. Los niveles de energía promedio varían entre 20 kW/m en el norte de Chile a 50 kW/m en Los Lagos. Más hacia el sur, los niveles de energía en mar adentro son incluso más altos, sin embargo, potenciales proyectos presentarían más dificultades en estas áreas debido a su inaccesibilidad en ambientes extremos.

La variabilidad de producción en el tiempo o disponibilidad es una de las características típicas de las energías renovables, generalmente conocida como factor de planta². A continuación, (ver Figura 1.2) se presentan los valores típicos de factor de planta para las fuentes de energía renovable en Chile.

Figura N° 1.2: Factores de planta típicos para la energía renovable en Chile



Los factores de planta para proyectos de energía undimotriz en Chile se encuentran entre los más altos en el mundo, debido a la alta consistencia de las olas. Sin embargo, esto supondrá un desafío para las operaciones marinas en la instalación y el mantenimiento de dispositivos. Por otra parte, es posible pronosticar el momento y los niveles de energía con que las olas llegan a la costa chilena con días de anticipación y con mayor precisión que, por ejemplo, la velocidad del viento, por lo que se espera que los factores de planta para los generadores de energía mareomotriz alcancen el 30%, debido a los periodos de inactividad (generalmente 4 veces por día) experimentados cuando el flujo se revierte entre mareas altas y bajas.

Las tecnologías de energía undimotriz y mareomotriz se encuentran en una etapa de desarrollo pre comercial, y el costo de la energía producida a partir de estas fuentes es superior a la electricidad en los sistemas de Chile (ver Figura 1.3). La tecnología de energía mareomotriz presenta un mayor desarrollo que la energía undimotriz, y se estima que su costo de generación es menor en la actualidad. Esto se puede entender, en parte, comparando sus principios de funcionamiento.

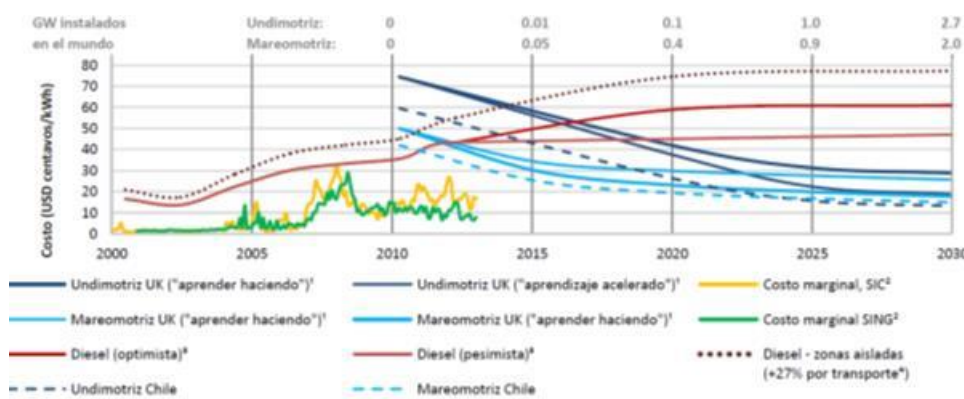
² El factor neto de planta (o capacidad) de una planta generadora de energía corresponde a la proporción entre su producción real y su producción máxima durante un periodo determinado, generalmente de un año. Nótese que los factores de planta para la energía solar (y otras) pueden ser mayores con almacenamiento energético.

Todos los dispositivos de energía mareomotriz exitosos generan electricidad a partir de turbinas giratorias en flujo. En este sentido, son similares a las turbinas eólicas, y por lo tanto la energía mareomotriz se ha favorecido de la transferencia de tecnología desde esa industria. Por otro lado, el desafío de la energía undimotriz es generar electricidad a partir de oscilaciones de baja velocidad y de alta potencia; lo cual es un problema más complejo con una gama más diversa de soluciones de conversión energética.

El hecho de que la energía marina aún no se ha comercializado, significa que Chile tiene la oportunidad de jugar un papel relevante en su desarrollo y establecer una capacidad de fabricación que sería difícil de lograr en industrias más consolidadas, como la energía eólica y solar, donde el equipamiento es principalmente importado. Existen áreas específicas para el desarrollo de la energía marina que han recibido menor atención hasta ahora, y donde Chile podría alcanzar un rol de liderazgo; por ejemplo en la desalinización, el bombeo de agua, o el desarrollo de sistemas pequeños para comunidades aisladas.

El progreso significativo en las tecnologías de energías renovables marinas comenzó hace unos 10 años, y ciertas tecnologías de primera generación tienen un costo de desarrollo asociado de entre USD 50 millones y USD 100 millones. La inversión en este desarrollo contribuye a establecer el costo comercial de las tecnologías, de esta forma, la siguiente generación de dispositivos de energía marina tendrá menores costos e importantes mejoras de rendimiento. Los posibles costos de la energía marina comparados a los precios de la energía en Chile se muestran en la Figura 1.3

Figura N° 1.3: Precios de mercado spot eléctrico en Chile comparados con los costos nivelados de generación undimotriz, mareomotriz y por diesel



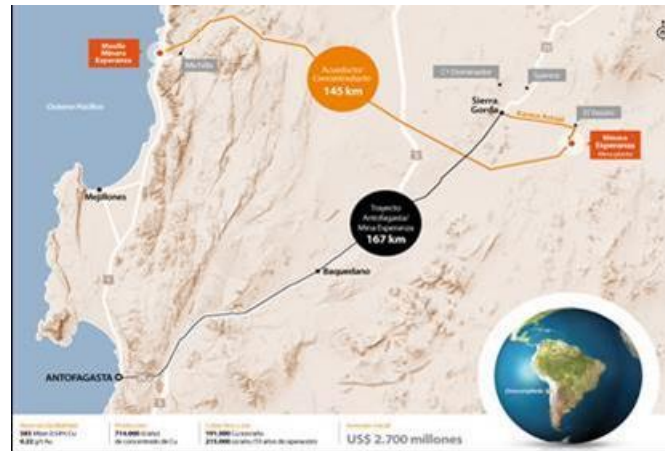
Antofagasta Minerals es el principal grupo minero privado chileno y uno de los diez mayores productores de cobre del mundo. Está posicionado como el cuarto productor de cobre en el país y el noveno a nivel internacional. Minera Carolina de Michilla, Minera Los Pelambres y Minera Centinela, son las operaciones que actualmente posee el Grupo. A ella se sumará este año Minera Antucoya.

Minera Centinela, ubicada en la II región a 30 Km de Sierra gorda, nace en julio de 2014 a partir de la integración de las operaciones de las compañías mineras El Tesoro y Esperanza, posee una planta de SX-EW (29 Ktpd) y una planta concentradora (86 Ktpd) la cual transporta su producto por un concentraducto de largo de 145 km llegando

Puerto Esperanza de Minera Centinela ubicado a 50 Km de la Comuna de Mejillones y 2 Km de Michilla. El Puerto Esperanza Embarca 766K Tmh al año, con una Tasa de Embarque de 870 Tmh/Hr, Filtrando Concentrado al año 745K Tms, lo cual demanda Energía de 2 a 3 Mega Watt, teniendo un Costo Unitario 27 Usd/Tmh Emb. y la energía eléctrica, corresponde al 43% del costo Total.

La costa de la segunda región posee una ola ideal para esta tecnología por su frecuencia, Amplitud y desplazamiento.

Figura N° 1.4: Layout General de la Segunda Región de Chile



Históricamente, Antofagasta Minerals AMSA a través de su división Minera Carolina de Michilla, ha colaborado con la comuna del mismo nombre proporcionándoles energía eléctrica desde su subestación en planta, de acuerdo a un futuro cercano, esta división verá su cierre definitivo como parte del grupo Amsa y el futuro comprador de la minera no nos asegura que dispondrá el mantener dicho aporte a esta vecina comuna. Antofagasta Minerals tiene un Compromiso Social con nuestros vecinos y la idea de este proyecto lograr proponer una alternativa de mantener este compromiso. A través de un proyecto de un Puerto sustentable en energía y una alternativa de aporte energético para la comunidad de Michilla.

Figura N° 1.5: Layout General de la Segunda Región de Chile

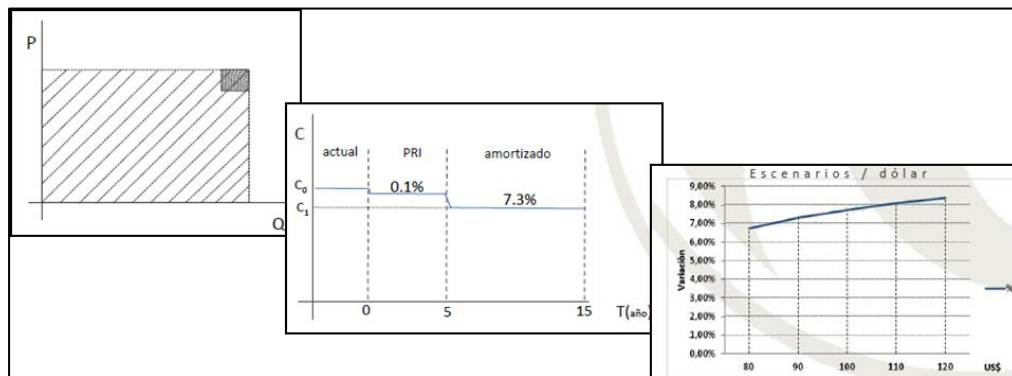


2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GENERAL

Evaluar la factibilidad de instalar una central undimotriz en el Puerto Esperanza de Minera Centinela utilizando Energía Renovable No Convencional (ERNC), dando como resultado autonomía y sustentabilidad, generando 4MWH de electricidad a partir del oleaje en su costa, logrando cumplir el compromiso social de la compañía AMSA con la comunidad vecina de Michilla y bajar los costos operacionales en el largo plazo. Se estima un 7,3% de ahorro en el costo de energía (con supuesto precio MWh : US\$ 90)

Figura N° 2.1: Análisis menor gastos operacionales por energía



2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Reducir los costos operacionales del proceso de Embarque y mitigar un riesgo estratégico de negocio aplicando la tecnología de vanguardia y no depender de la disponibilidad del SING.

Entregar un aporte al medio ambiente a través de la energía Renovable No Convencional (ERNC) y limpia. Identificando algunas oportunidades y obligaciones para este proyecto, tomando en cuenta el interés que presenta el estado de Chile en realizar proyectos de este tipo y que se consideran en las siguientes leyes e instrumentos de incentivo tributarios vigentes:

- 1) Ley Corta 1, (ley 19.940) Fecha de publicación 12-2 -2004
- 2) Ley Corta 2, (ley 20.018) Fecha de publicación 19-05 -2005
- 3) Ley ERNC, (ley 20.257) Fecha de publicación 01-04-2008
- 4) Ley 20/25, (ley 20.698) Fecha de publicación 20-10-2013

Cubrir la demanda energética de la comunidad vecina de Michilla, aporte social a la municipalidad de Mejillones, logrando cumplir con el compromiso y sustentabilidad social de la Compañía AMSA.

Ver la factibilidad de implementar un proyecto innovador, a través de tecnología y logrando generar valor al negocio

3 ALCANCE.

Cabe decir que el impacto de las leyes ha sido absolutamente tangible, y que sus proyecciones a futuro son enormemente auspiciosas. De cumplirse las metas propuestas en el mediano plazo, Chile obtendrá una matriz energética altamente diversa, confiable, eficiente y sustentable.

No obstante la permanente preocupación por la eficiencia en el consumo de energía, el sector minero sólo explica el 33% del consumo nacional. Además, considerando la calidad de los yacimientos, la desalinización y el bombeo de agua de mar, se espera que aumente la demanda de energía. Lo anterior resalta aún más la importancia del sector energético en el plan para una minería sostenible, virtuosa e inclusiva.

En cuanto a los efectos medioambientales este proyecto debe cumplir con la Política de Medio Ambiente de Antofagasta Minerals, identificando y evaluado la influencia de la operación de ENRC en el Puerto de Esperanza de Minera Centinela, dejando como próximo paso KPIs operacionales, sustentabilidad Social, reducción de costos operacionales, verificar el marco legal que rige a la generación eléctrica a partir de energías renovables no convencionales (ERNC) en Chile.

Se identificaron oportunidades y obligaciones para este proyecto, tomando en cuenta el interés que presenta el Estado en realizar Proyectos ENRC considerando las siguientes leyes:

- 1) Ley Corta 1, (ley 19.940) Fecha de publicación 12-2 -2004

“Se libera de los costos de transmisión a las generadores con capacidad menor a 9 MW y que obtengan su energía a partir de fuentes renovables no convencionales”

- 2) Ley ERNC, (ley 20.257) Fecha de publicación 01-04-2008

- a) “Obliga a las empresas generadoras eléctricas con capacidad superior a 200 MW a comercializar un 10 % de ERNC, sean propios o contratados a partir del 01-01-2010”. Los que nos permite suministrar los excedentes energía al sistema eléctrico.

- 3) Ley 20/25, (ley 20.698) Fecha de publicación 20-10-2013

- a) Modifica el art. 150 bis introducido al DFL 4 por ley ERNC I, así como el art. transitorio 1 de esta ley, la obligación define que debe ir aumentándose a 0,5% por año a partir del 2015, hasta alcanzar un 10% el año 2024.
- b) Modifica el DFL n°4 el art. 150 ter, que impone el Ministerio de Energía realiza licitaciones públicas para inyección de ERNC introducida por la ley ERNC I. Para los retiros con contratos posterior al 01/07/2013, la obligación será de ir incrementándose en un 2% el año 2025 hasta llegar al 20%.

- 4) Incentivo Tributario a la Inversión privada en Investigación y Desarrollo: La Ley I+D da el derecho a un crédito tributario equivalente a un 35% de los pagos en virtud de Proyectos certificados por Corfo.

3.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO Y JUSTIFICACIÓN

El sector minero del cobre demanda un consumo de energía, siendo unos de los principales desafíos por lo que debe desarrollar beneficios a largo plazo en la medida que sea sustentable su relación con el medio ambiente.

La matriz energética para la actividad minera representa más de un tercio del consumo total de energía eléctrica de Chile, proyectando un aumento en torno al 44% durante los próximos cinco años, y del 80% hacia el año 2020, según COCHILCO. Esto se debe a los nuevos proyectos que entrarían en producción y a la disminución de las leyes de cobre, endurecimiento del mineral, plantas desalinizadoras y el bombeo de agua de mar hacia la cordillera superando alturas de 2000 m y distancias mayores a 150 km.

Es por esto que los factores más relevantes que han incidido en el incremento de costos en la minería, en los últimos años, son la disminución de las leyes de los minerales, el valor de la energía y el aumento del valor de mano de obra local.

Por otro lado, el Gobierno de Chile ha publicado una Estrategia Nacional de Energía para el periodo 2012-2030. Los pilares fundamentales de esta estrategia son aumentar la contribución de energías renovables no convencionales ERNC y aumentar la eficiencia energética. Este Ministerio se encuentra desarrollando una estrategia de generación de energía marina, en donde se incluye el siguiente bosquejo de la declaración de su visión:

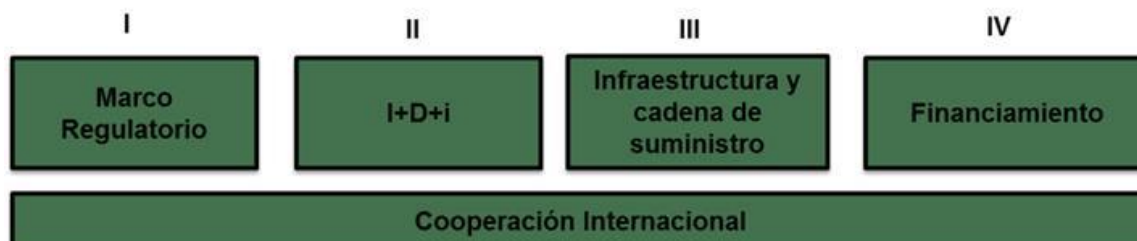
“El Gobierno de Chile reconoce la importancia de desarrollar fuentes de energía renovable provenientes de su extenso recurso marino para mejorar la seguridad del suministro energético y mitigar el impacto en el cambio climático de la matriz energética nacional contribuyendo al desarrollo económico e industrial de la nación.

Para garantizar la maximización de los beneficios económicos asociados a la utilización del recurso energético marino del país, el Gobierno de Chile desea establecer una “Estrategia de Desarrollo para la Energía Renovable Marina”, que le permita al país apoyar el crecimiento del sector y tomar un rol participativo en el desarrollo de las tecnologías de energía marina en sus aguas territoriales.”

(Ministerio de Energía de Chile, 2013)

El anuncio de USD 27 millones para el financiamiento de un centro de excelencia de energía marina y el apoyo de los primeros proyectos pilotos de energía undimotriz y mareomotriz es un gran avance, al igual que diversos estudios relacionados y cambios normativos puestos en práctica o propuestos por el Gobierno de Chile. No obstante, queda mucho por hacer. La estrategia de Energía Marina que está siendo desarrollada por el Ministerio de Energía se muestra en la siguiente figura N°3.1

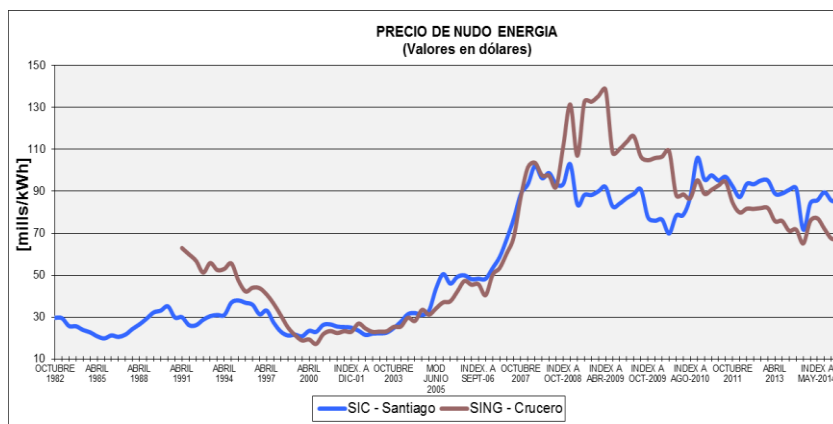
Figura N° 3.1: Pilares para la Estrategia de Energía Marina del Ministerio de Energía



3.2 RED ELÉCTRICA

El mercado de la electricidad en Chile está liberalizado, y opera en base al modelo de menor costo marginal. Existen incentivos y metas para las Energías Renovables No Convencionales (ERNC)¹, que recientemente se han incrementado, sin embargo, son tecnológicamente neutrales y no están dirigidos a apoyar tecnologías pre comerciales como la energía undimotriz y mareomotriz. El valor de la energía eléctrica es el doble en relación a otros países de la región. Este insumo es el más importante en los costos de las empresas mineras que operan en Chile. En efecto, el índice de costos de la energía se ha duplicado entre el año 2006 y 2013. En tanto, en el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING), su valor se incrementó en 113%, mientras que en el Sistema Interconectado Central (SIC) el aumento fue de 148%, tal como se muestra en el gráfico a continuación.

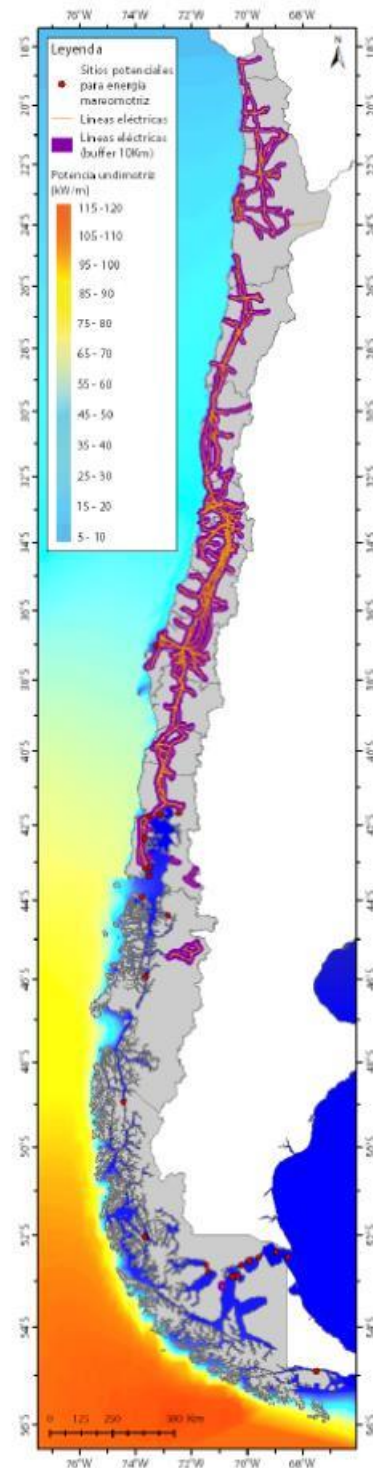
Figura N° 3.2: Gráfico de Índice de costo de energía



El informe Las energías renovables no convencionales en el mercado eléctrico chileno de la Comisión Nacional de Energía de Chile (CNE & GTZ, 2009) entrega una revisión exhaustiva sobre el desarrollo en el mercado eléctrico chileno, y describe las medidas que se están tomando para acelerar la incorporación de proyectos de energía renovable al sistema eléctrico chileno.

Siendo parte del sector energético, las renovables marinas necesitarán infraestructura eléctrica, tal como:

- Conexiones a la red (Cableado submarino)
- Subestaciones
- Red de transmisión (CA y HVDC)
- Conversores CA/CC



- Fuentes de suministro de reserva

En los últimos años se han realizado varios cambios positivos en Chile, ya sea en el mercado eléctrico y en los sistemas regulatorios, para fomentar el desarrollo de energías renovables:

- Actualmente pequeños generadores pueden participar del mercado eléctrico.
- Se implementaron exenciones parciales o totales para los peajes por uso de sistemas de transmisión de proyectos de energía renovable no convencional (ERNC) de menor escala.
- Todas las compañías que venden energía a los usuarios están obligadas a proveer un porcentaje de la energía vendida desde fuentes de ERNC.

Sin embargo, en el mediano y largo plazo el acceso a capacidades adecuadas en la red será un factor crítico, y requerirá inversión en la infraestructura de la red para alcanzar todo el potencial de energía marina en Chile. Si no se logra establecer planes de desarrollo a largo plazo para la industria y no se dispone de capacidad en la red eléctrica se retrasarán los desarrollos, y los mecanismos de peaje inapropiados podrían afectar la viabilidad comercial de los proyectos.

La red eléctrica chilena se compone de cuatro redes separadas con el 99 % de su capacidad instalada de generación ubicada en el Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) y el Sistema Interconectado Central (SIC), mientras que el restante 1 % proviene de Aysén y Magallanes. La generación del SING proviene principalmente de plantas de combustible fósil cerca de la costa y 90 % de su energía es consumida por la minería. El SIC provee energía al 90% de la población de Chile y la generación se reparte entre fuentes hidroeléctricas y de combustible fósil, con cierta contribución de otras renovables tales como viento y biomasa. Sin embargo, el Gobierno de Chile pretende conectar el SIC y el SING para el 2018.

Los proyectos de energía renovable pueden sufrir retrasos debido al acceso inadecuado y de alto costo a la red eléctrica. Sin embargo, la planificación gubernamental de largo plazo puede evitar estos problemas.

Los estudios centrados en los requerimientos específicos de la red eléctrica en relación a las industrias de la energía marina, pueden apoyar un proceso más amplio de desarrollo de una red eléctrica, que sea adecuada para las fuentes de energía del futuro

La generación de energía eléctrica no solo es un desafío de la minería sino del país completo, por cuanto Chile requiere incrementar significativamente su capacidad de generación eléctrica sustentable.

3.2.1 Grandes redes eléctricas (SIC y SING)

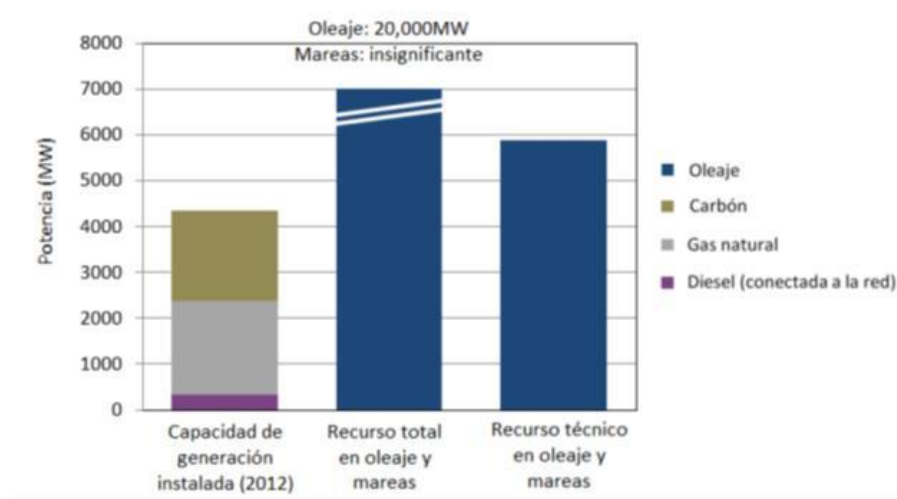
El mercado mayorista de energía en los sistemas interconectados de Chile (SIC y SING) opera bajo un principio de generación competitiva al costo más bajo, con dos mercados: un mercado spot con precios determinados basada en el costo marginal a corto plazo (Short Run Marginal Costs, SRMC) y un mercado de contratos bilaterales.

Los generadores, por lo tanto, cuentan con las siguientes opciones para comercializar su electricidad:

1. Mercado spot (a costo marginal de corto plazo)
2. Contratos de largo plazo con otros generadores o con grandes clientes finales a precios no regulados
3. Contratos a largo plazo con las distribuidoras, establecidos por medio de licitaciones públicas.

Referente a los mercados energéticos, la Figura 5.1 compara la capacidad instalada de generación actual en la red eléctrica SING (Central Energía, 2012) con una estimación de los recursos undimotrices totales y técnicos. Cabe señalar que no existen recursos mareomotrices significativos en esta región, sin embargo, el recurso undimotriz total supera con creces a la demanda de electricidad actual.

Figura N° 3.2.1: Comparación de la capacidad instalada de generación con los recursos de energía marina (SING)



Asimismo, como se muestra en el mapa de Norte Grande proporcionado a continuación, existe un gran número de subestaciones costeras robustas con conexiones a la red eléctrica. Queda en evidencia que el potencial de energía undimotriz para suministrar la red eléctrica en Norte Grande es alto.

La minería es la principal actividad de la región, y consume una inmensa cantidad de agua dulce. En algunos casos, esta se obtiene de manera local, pero cada vez más agua marina sin tratar o desalinizada se bombea hacia el interior. Con el fin de conservar agua para la agricultura y el consumo de la comunidad, el Gobierno Regional de Arica y Parinacota aprobó una restricción en 2012, que solicita a las compañías mineras que satisfagan sus demandas de agua dulce solamente mediante desalinización.

Las plantas de desalinización que obtienen energía a partir de la energía undimotriz podrían abastecer con agua dulce o desalinizada a la industria minera según la

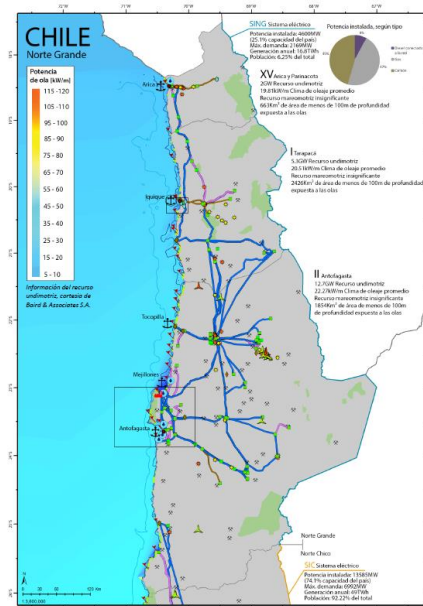
disponibilidad de abastecimiento de agua dulce en la región de Chile. Ya se han puesto en marcha planes en Australia Occidental para desarrollar la primera planta de desalinización en el mundo a partir de energía undimotriz con cero emisión de dióxido de carbono, mediante la tecnología de energía undimotriz hidráulica CETO de Carnegie Wave Energy. La planta no solo desalinizaría el agua marina, sino que también, produciría electricidad que podría utilizarse para bombear agua a lo largo de grandes distancias.

Se están realizando grandes inversiones en plantas de desalinización, estaciones de bombeo y plantas de energía relacionadas para satisfacer las demandas de la industria minera, cuyo crecimiento continuará por mucho tiempo. Ciertos dispositivos de energía undimotriz hidráulicos pueden emplearse directamente para el bombeo de agua. Dada la gran y creciente demanda de la industria minera para satisfacer sus necesidades de energía, también como de agua marina desalinizada y sin tratar, se hace evidente que el mercado potencial para los proyectos de energía marina es bastante amplio.

Aunque los niveles de energía undimotriz en el Norte Grande son menores que en el resto de Chile, el régimen del oleaje es muy constante y es lo suficientemente fuerte para la generación de energía. Además, la instalación y el mantenimiento de equipos puede resultar un poco más sencillo (y, por lo tanto, menos costoso) en estas áreas relativamente favorables.

En el corto plazo, la demanda de agua y energía podría impulsar el desarrollo (posiblemente combinado) de pequeñas plantas de energía undimotriz y desalinización para comunidades aisladas. Este es un nicho de mercado dentro de la energía marina donde Chile podría convertirse en un actor principal y desarrollar un mercado extenso tanto nacional como internacional. En el mediano y largo plazo, se espera que la demanda de electricidad aumente debido al constante crecimiento de la actividad minera. El alto costo de la energía y el agua, en conjunto con beneficios impositivos y un entorno de operación más favorable, podrían anticipar la viabilidad de proyectos de energía undimotriz en el Norte Grande, en relación a las regiones del sur.

Figura N° 3.2.2: Mapa de Red Eléctrica Norte Grande SING



3.2.1.1 Mercado spot

Los precios del mercado spot consisten en:

1. El sistema de costo marginal a corto plazo (SRMC) se establece sobre una base de una hora por el respectivo centro de despacho (CDEC-SING o CDEC-SIC). El SRMC se calcula por cada nodo del sistema. Todas las transacciones entre generadores y el mercado spot se llevan a cabo a este precio.
2. El ente regulador determina el precio de potencia cada 6 meses basándose en costos de capital anualizados más los costos de mantenimiento y operación de una empresa con una planta generadora de gas de ciclo abierto eficiente. Los generadores deben comprar o vender la diferencia entre su potencia firme y la demanda máxima esperada bajo sus obligaciones contractuales al precio de potencia. Se realizan reembolsos por cada discrepancia entre las proyecciones de oferta y demanda y las cifras reales a fin de año.

Los precios en el mercado spot en Chile están entre los más altos de América Latina y muestran un alto nivel de volatilidad, debido a la naturaleza inestable de los recursos hídricos que forman parte del SIC. En períodos de sequía las plantas de energía térmica más costosas como el diésel se utilizan para compensar la falta de agua. Por otra parte, las fluctuaciones en los precios de los commodities tienen un gran impacto en los precios de la electricidad en Chile. Por ejemplo, los precios spot promedios subieron en un 64% entre el primer trimestre del 2010 y el del 2011 (desde 149 a 244 USD/MWh) debido a una combinación de sequía severa y precios altos en los commodities. Las restricciones en el suministro de gas desde Argentina han sido un factor importante que contribuye a la volatilidad y el alto precio spot en Chile. Sus precios llegaron a un máximo de casi 350 USD/MWh en marzo del 2008, en el punto máximo de la crisis del gas. Los precios spot representan del 70 al 80% de los ingresos de los generadores por su participación en el mercado spot; el 20 o 30% restante se percibe por ventas de potencia firme.

3.2.1.2 Mercado de contratos

Antes de la promulgación de la Ley Corta II de mayo del 2005, los contratos con las distribuidoras se fijaban a precios de nudo, los que eran determinados por el ente regulador del mercado eléctrico (CNE) cada 6 meses. El precio de nudo consistía de 2 componentes: precio de energía en el nodo, calculado según el costo marginal a corto plazo anticipado, y precio de potencia por nodo, que corresponde al costo de capital y de operaciones y mantenimiento de una turbina de gas tomada como referencia. El precio calculado en el nodo (potencia más energía) se ajustaba para que coincidiera entre el -5% y el 30% del precio promedio convenido entre los generadores y consumidores en el mercado no regulado.

Desde enero del 2010, el precio de suministro a las distribuidoras debe ser establecido por medio de ofertas en competencia directa, donde cada distribuidora anuncia sus requerimientos de energía y potencia, y los generadores ofrecen su precio más bajo por los contratos que desean. La extensión del contrato es de 15 años. Los precios de los contratos antiguos se calcularon según el precio de nudo.

Además el agua fresca en Chile es escasa, especialmente en la Zona Norte, donde la mayoría de los proyectos mineros predominan. Es por esto que la industria minera tiene que tener una visión hacia el futuro en optimizar sus procesos utilizando agua de mar ya que cada vez se demuestra que es más viable y según informes de COCHILCO se espera que su uso aumente en un 50% para el año 2025, ya que su costo de transporte no supera los 1,5 U\$/m³.

3.2.2 MARCO REGULATORIO

Es importante hacer la distinción entre dos áreas clave en el marco regulatorio para la energía marina:

1. Derechos legales o comerciales para hacer uso del mar/fondo del mar. En la actualidad, en Chile dichos derechos son administrados por un sistema de concesiones marítimas controlado por la Subsecretaría de Marina (SUBSECMAR), aunque existen planes para transferir dichos poderes al Ministerio de Bienes Nacionales, actual administrador de las concesiones terrestres.

Nota: En el Reino Unido, generalmente éstos han sido gestionados por un sistema de arriendo a tarifas comerciales administrado por el Crown Estate.

2. Restantes permisos y licencias necesarias para el desarrollo y trabajo en terreno, incluyendo permisos de obras, estudios de impacto ambiental (EIA), permisos de navegación, concesiones para conexión a la red eléctrica, etc.

Otros aspectos de la energía marina que pueden estar sujetos a influencia y control regulatorio:

- Planificación del espacio marítimo
- Tarifas de generación y estándares de generación
- Salud y seguridad laboral marítima y disposición de preparativos para emergencias.
- Comercio marítimo y navegación

Para las políticas vigentes, entre los puntos clave de la Estrategia de Energía Marina del Ministerio de Energía (Ministerio de Energía de Chile, 2013), se encuentran:

- Se requiere un marco regulatorio transparente que evite poner barreras a la generación de la energía marina. Es necesario transparentar las reglas para la obtención de concesiones marinas para proyectos de energía marina.
- El Ministerio de Energía debiera establecer un grupo de trabajo junto a la Subsecretaría para las Fuerzas Armadas, actual administrador de las concesiones marítimas.
- Un plan para transferir el control sobre las concesiones marítimas desde la Subsecretaría para las Fuerzas Armadas perteneciente al Ministerio de Defensa, hacia el Ministerio de Bienes Nacionales es un cambio regulatorio que, según el Ministerio de Energía, debiera simplificar el proceso y reducir los tiempos asociados esta regularización.

Nota: Según un estudio de Philippi et al (Philippi Abogados, 2012), dicho cambio forma parte de una ley de amplio alcance, que rige la administración de las concesiones marítimas y costeras, el cual podría incluir reformas tales como:

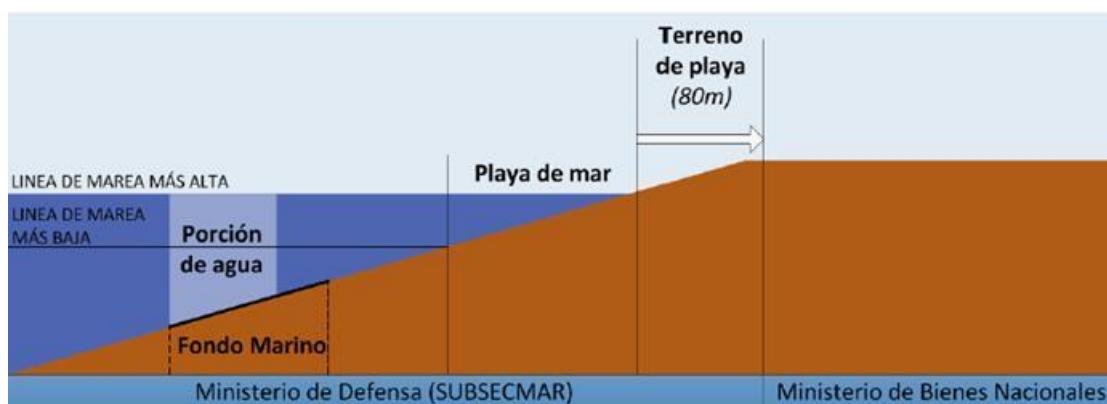
- Permitir dos o más concesiones otorgadas para una misma área (a menudo difícil o imposible en la actualidad; ver discusión y Tabla 3)
- Reducir el plazo máximo de concesión desde 50 a 30 años, pudiendo así liberar áreas de desarrollo o Incrementar la regulación de apelaciones a las solicitudes de concesión, para evaluar las bases de las apelaciones antes de que las solicitudes sean detenidas.
- Se deben evaluar las normativas y los procedimientos con el fin de identificar, designar y proteger áreas con un alto potencial para proyectos de energía marina.
- Se requiere evaluar los impactos medioambientales y sociales de los proyectos de energía marina, para lo cual el Ministerio de Energía trabaja junto al Servicio de Evaluación Ambiental en el desarrollo de una guía de evaluación medioambiental para proyectos de energía marina.
- Se deben clarificar los roles de las distintas instituciones involucradas en el desarrollo de energía marina y establecer mecanismos de coordinación entre los ministerios de Bienes Nacionales, Medio Ambiente, Economía, Obras Públicas y otros.
- La participación del Ministerio de Energía y de los SEREMIS en la Comisión Nacional de Uso del Borde Costero y la Comisión Regional de Uso del Borde Costero.

3.2.2.1 Arriendos y concesiones

En Chile, actualmente las concesiones marítimas (o arriendos) son administradas por la Subsecretaría para las Fuerzas Armadas (SUBSECMAR). Los desarrolladores deben postular para concesiones marítimas por separado, pudiendo tratarse de:

- Porción de agua: columna de agua y superficie
- Fondo de mar
- Playa del mar: área entre las mareas alta y baja
- Terreno de playa: una faja de tierra costera de 80mt de ancho comúnmente considerada un bien nacional (estatal)

Figura N° 3.2.2.1: Tipos de concesiones marítimas en Chile



Según destaca el estudio de la Universidad de Edimburgo/Errázuriz (2012), el marco regulatorio chileno es robusto pero carece de claridad respecto del proceso para otorgar permisos de explotación de sitios de energía marina, pudiendo de esa manera obstaculizar este tipo de proyectos. Sin embargo, algunos desarrolladores de tecnología chilenos ya han instalado y probado dispositivos utilizando concesiones marítimas temporales disponibles (Concesión marítima temporal).

En tanto la propuesta de transferir la responsabilidad por las concesiones marítimas desde la SUBSECMAR al Ministerio de Bienes Nacionales, tiene el potencial de simplificar el sistema, el cambio podría demorar varios años, lo cual crearía un área gris para los primeros proyectos a desarrollar. El establecimiento de criterios transparentes para la evaluación de proyectos de energía marina en el corto plazo, evitaría las consecuentes decisiones discrecionales y la "falta de capacidad técnica" del Ministerio de Bienes Nacionales que se estima como consecuencia del cambio (Philippi Abogados, 2012). La propuesta para capacitar a empleados clave en el tema, también, reduciría el riesgo (E&A/UoE, 2012).

Otro desafío es evitar que las concesiones sean "capturadas" por especuladores, un problema, hasta cierto grado, extendido en las industrias chilenas solar y eólica, dado que se han otorgado concesiones que podrían haber estado bajo un control más riguroso, por ejemplo, con incentivos y multas para asegurar el progreso de los proyectos de acuerdo a los plazos estimados y para limitar el tiempo de concesión, en caso que los proyectos no se desarrollen.

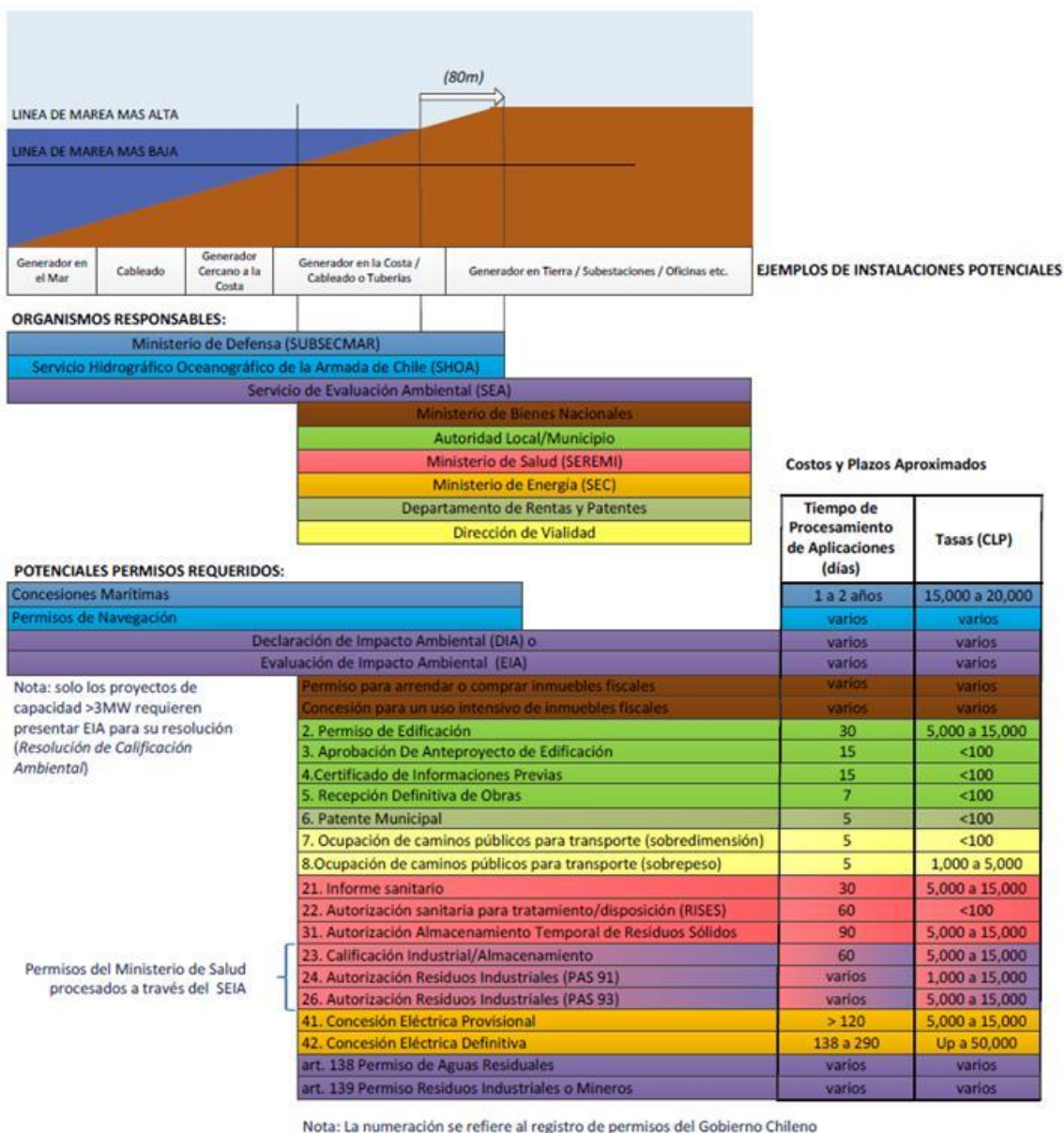
El estudio realizado por Philippi et al. consideró proyectos de energía marina de alrededor de 100 MW, concluyendo que el proceso para asegurar concesiones marítimas para dichos proyectos - que involucran a diversas autoridades - es "lento, complejo e incierto", y podría demorar, por lo menos, uno o dos años en completarse (Philippi Abogados, 2012). Se requiere mayor consideración para los proyectos de menos de 100 MW que se instalarán por primera vez en Chile.

Se ha estudiado la posibilidad de que el Gobierno de Chile establezca autorizaciones especiales para la fase inicial de proyectos de energía marina, lo cual apoyaría el desarrollo de la industria. Esto podría tomar la forma de autorizaciones de exploración/explotación para actividades mineras (administradas por el Ministerio de Minería), o para proyectos de energía geotérmica (administrados por el Ministerio de Energía).

3.2.2.2 Permisos y Licencias

Los permisos y las licencias otorgan un marco referencial para establecer cómo un proyecto debiera ser implementado en un lugar en particular. Se considera el tipo de trabajo que se debe realizar, la legislación aplicable en un sitio en particular, los impactos que puedan existir, los medios para mitigar éstos y las vías para maximizar las externalidades positivas, etc. Lo anterior, en contraste a los arriendos o las concesiones que entregan derechos de acceso a un área marítima o fondo de mar en particular. La Figura 3.2.2.2 presenta los permisos que pueden ser requeridos para implementar un proyecto de energía marina en Chile.

Figura N° 3.2.2.2: Tipos de concesiones marítimas en Chile



Nota: Los costos y plazos pueden variar en gran manera dependiendo del tipo de proyecto

Se debe considerar que proyectos menores a 3 MW no requieren ser evaluados por el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA). De aquellos proyectos que sí necesitan ser evaluados por el SEA, no todos requieren un estudio de impacto ambiental detallado, en algunos casos basta con una declaración de impacto ambiental. La Evaluación de Impacto Ambiental para proyectos de energía marina es elaborada por el Ministerio del Medio Ambiente.

Puede haber una tendencia a un exceso de control sobre nuevas actividades en las que existe incertidumbre, sobre la base de un enfoque precautorio. Esto presenta dificultades para los nuevos proyectos de energías renovables, ya que formas convencionales de generación de energía a menudo no están sometidas a las mismas

restricciones. Es importante que a los proyectos de energía renovable se les exija cumplir con estándares apropiados de control basados en los riesgos reales de estos proyectos. Si se exige a las energías renovables (y a la energía marina en particular) el cumplimiento de estándares más altos que a otras formas de generación de energía, se pondrá en peligro la competitividad de estas fuentes de generación. Las consecuencias de este proceder o la incapacidad de reconocer formalmente los beneficios de los proyectos de energía renovable prolongan la dependencia de formas de generación energética en base al carbón.

Al igual que los riesgos ambientales locales, los EIA deben considerar los beneficios ambientales y socio-económicos generales de los proyectos de energía marina. Por ejemplo, las principales amenazas para muchas (si no la mayoría) de las especies protegidas están relacionados con los efectos del cambio climático. Proyectos de energía renovable son esenciales para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y combatir estos efectos, pero este tipo de impactos positivos a menudo se pasan por alto durante la evaluación del impacto ambiental.

Tal como ocurre con las concesiones marinas actuales, el hecho de que la energía marina generalmente no figure en la legislación que aborda los permisos, podría significar un riesgo de que las decisiones se adopten a discreción. Sin embargo, el sistema chileno de otorgamiento de permisos es robusto, y es posible que los proyectos de energía marina no enfrenten importantes problemas, pero la falta de certidumbre al respecto constituye otro factor de riesgo para los desarrolladores de proyectos de energía marina. La cantidad de distintos organismos que se debe contactar, también, suma tiempo y costos en los presupuestos de los desarrolladores de proyectos.

3.2.2.3 Salud y Seguridad

La seguridad en el mar ha estado presente a través de siglos de actividades y experiencias marítimas. Se han desarrollado nuevos reglamentos y procedimientos de gestión de seguridad para industrias específicas, tales como el sector petrolero y gasífero o para terminales de contenedores. La instalación y operación de tecnologías mareomotrices y undimotrices presentan nuevos y, a veces, grandes desafíos en términos de salud y seguridad, que deben ser abordados.

Mantener una estación fija (manteniendo la posición) en una corriente de mareas es una tarea difícil. Las fuerzas que actúan sobre navíos y equipos son intensas, y un elemento o una persona que cae al mar y flota a la deriva puede alcanzar velocidades peligrosamente altas.

A lo largo de las costas oceánicas expuestas, las olas pueden afectar la estabilidad de las plataformas de trabajo y crear fuerzas excesivas sobre las estructuras. Para proyectos de energía undimotriz, los navíos deberían trabajar en aguas menos profundas que lo normal, quedando más expuestos a olas que normalmente se evitarían, y aquellos que sufran desperfectos pueden tener muy poco espacio para derivar hacia la orilla antes que encallen. En resumen, la naturaleza de alta energía de los sitios de energía undimotriz y mareomotriz, los hace lugares difíciles de llevar a cabo faenas laborales en forma segura.

A pesar de estos riesgos adicionales asociados a la energía marina, existen pocos o nulos ejemplos donde se haya establecido disposiciones reguladoras específicas. La experiencia recogida a la fecha ha demostrado que se manifiestan numerosos accidentes y negligencias en el sector de la energía marina. Aún no se realizan las gestiones de riesgos ni se aplican las medidas de control con el rigor y entendimiento suficiente para que el sector exhiba la seguridad correspondiente.

En Chile, el Ministerio del Trabajo y Previsión Social es responsable de "promover conductas que prevengan accidentes y enfermedades laborales en el puesto de trabajo" (Gobierno de Chile, 2010). La Dirección del Trabajo es la subdivisión del ministerio que se ocupa de supervisar el cumplimiento de las leyes laborales, así como la salud y seguridad en el trabajo.

DIRECTEMAR opera los servicios de guardacostas en Chile y es responsable de supervisar el cumplimiento de todas las leyes nacionales sobre salud y seguridad en los puertos y el mar.

3.2.2.4 Conclusiones - Marco Regulatorio

Es fundamental para el progreso de la industria de energía marina que todas las medidas normativas sean desarrolladas en forma paralela; es improbable que un conjunto de medidas normativas parciales o descoordinadas entreguen el impulso político e industrial necesario para avanzar en el desarrollo de una industria de energía marina exitosa.

A modo de ejemplo, un sistema bien estructurado de autorizaciones y licencias, no asegura el desarrollo de la industria de energía marina al no existir acceso directo a la infraestructura de la red eléctrica. Asimismo, el acceso a la red eléctrica y un adecuado sistema de autorizaciones, no es suficiente para asegurar el éxito de una estrategia de desarrollo, si no existe el apoyo financiero para proyectos pre comerciales.

El hecho de que el Ministerio de Energía esté a pasos de establecer una estrategia de desarrollo para la energía marina es una evolución extremadamente favorable, así como es el plan del Ministerio de Energía para fomentar una coordinación interministerial sobre energía marina, ya que existen muchas políticas donde será necesaria la acción coordinada de los distintos ministerios del Gobierno para apoyar la industria de energía marina con éxito.

En tanto, es necesario que el Ministerio de Energía defina en su estrategia una serie de actividades cuya ejecución es responsabilidad de dicha cartera. Estas pueden incluir la identificación de barreras para el desarrollo de la energía marina y el establecimiento de grupos de trabajo con otros ministerios para enfrentar estas mismas barreras (por ejemplo, concesiones marítimas con el Ministerio de Defensa y el Ministerio de Bienes Nacionales), pero los cambios necesarios deben ser implementados por el ministerio responsable. Asimismo, se desprenden beneficios de la energía marina en términos de creación de empleos e inversiones que son centrales para la energía marina, pero que en el papel aparentan ser de mayor interés para el Ministerio de Economía que para su símil de Energía.

3.2.3 INVESTIGACION, DESARROLLO E INNOVACION (I+D+I)

Históricamente en Chile, el crecimiento económico ha sido impulsado por la exportación de recursos naturales (especialmente los recursos mineros y agropecuarios). Según la OCDE, Chile ostenta “un nivel relativamente bajo de inversiones en investigación y desarrollo, el énfasis excesivo en investigación es comparado a la innovación en el sistema de financiamiento”, y además, muestra “deficiencias en la formación de capital humano” (OCDE, 2009). Sin embargo, en años recientes, el Gobierno de Chile ha dado pasos importantes en este sentido, destacándose los siguientes:

- La creación del Consejo Nacional de Innovación para la Competitividad (CNIC), que asesora al Gobierno en relación con las políticas de innovación y evalúa a los organismos tales como CORFO en materia de innovación.
- La introducción de un impuesto específico (royalty) a la minería, que financia proyectos estratégicos de investigación, desarrollo e innovación.
- La introducción de un crédito fiscal a la inversión en I+D+i (recientemente ampliado) para fomentar la participación del sector privado en este tipo de proyectos.

En relación a la energía marina, el acontecimiento reciente más significativo ha sido el anuncio de que Innova-CORFO y el Ministerio de Energía llamarán a licitación para la creación de un Centro de Excelencia Internacional en Energía de los Mares por USD 20 millones, de los cuales USD 13 millones corresponden a fondos para subvenciones por un período de 8 años. Por medio de la creación de este Centro de Excelencia, el Gobierno de Chile pretende consolidar las capacidades existentes en investigación, atraer a grupos internacionales que cuenten con experiencia y conocimientos relevantes, y promover la creación de redes colaborativas que ofrezcan servicios y productos enfocados directamente en las necesidades industriales locales.

En segundo lugar, el Gobierno de Chile y el Banco Interamericano de Desarrollo han decidido dar financiamiento a los primeros proyectos pilotos a gran escala de energía marina en aguas chilenas. Se estima que los fondos totales que se destinarán a este fin alcanzan aproximadamente a USD 14 millones, aunque aún está por determinarse qué proporción de los fondos será destinada a la energía undimotriz y a la energía mareomotriz. También, existen varias líneas de financiamiento disponibles para proyectos de I+D+i que no son exclusivos para la energía marina

Chile tiene algunas de las universidades y centros de investigación más importantes de Latinoamérica. Muchas de estas instituciones ya realizan investigación en energía marina y, en muchos casos, en colaboración con el sector privado. A continuación se presentan algunos ejemplos:

- Proyecto actualmente en curso, liderado por HydroChile, que evalúa los recursos potenciales existentes en Chile para la generación de energía undimotriz y mareomotriz, y que incluye un estudio ambiental del Canal de Chacao.
- Actividades de la Escuela de Ingeniería Naval de la Universidad Austral, relacionadas con turbinas mareomotrices de bajo caudal, para uso en granjas salmoneras.

- El Departamento de Oceanografía (DOCE) de la Universidad de Concepción actualmente hace investigación del uso de radares de alta frecuencia para la medición de las corrientes de marea o de oleaje.
- Proyecto de la Universidad Técnica Federico Santa María que estudia el desempeño de la turbina de rebosadero de la empresa Wave Dragon, entre otros trabajos acerca de la electrónica de potencia y modelamiento de potencia, que incluye el diseño de convertidores para generadores de energía marina a base de generadores de imanes permanentes.
- Proyecto de sitio web “Explorador de Energía Marina” que mapea los recursos de energía undimotriz y mareomotriz, liderado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile conjuntamente con SHOA y DIPRI10.
- Proyecto de investigación sobre consideraciones medioambientales de la energía marina, de la Universidad de Magallanes y el Centro de Estudios del Cuaternario, Fuego-Patagonia y Antártica (CEQUA).

Existen varias empresas privadas que están desarrollando las primeras etapas de conceptos tecnológicos para la generación de energía undimotriz y mareomotriz, incluyendo:

- Ausind –realizó pruebas a su propio modelo a escala de absorbedor puntual de energía undimotriz, instalado en el mar cerca de Valparaíso.
- Blue Power Projects - realizó pruebas conceptuales de prototipo undimotriz en el Quisco
- ETYMOL – ha realizado pruebas controladas de un prototipo a escala de su dispositivo de energía undimotriz.
- Maestranza Diesel – ha realizado pruebas (a pequeña escala) de varios prototipos de dispositivos que aprovechan la energía undimotriz y mareomotriz, incluyendo una prueba realizada en el Canal de Chacao.
- Undimotriz Chile – está en desarrollo de un nuevo concepto de energía undimotriz.
- Wilefko – recientemente realizó pruebas a un prototipo a pequeña escala de su aleta captadora de energía undimotriz en Concón.

Estas nuevas tecnologías están atrayendo el interés de organizaciones públicas y de grandes empresas industriales, incluyendo Abengoa, Andritz Hydro Hammerfest, DCNS, Endesa, Siemens, Voith, etc. Otros miembros de la cadena de abastecimiento, también, están interesados (Baird, Birchman, Green Elements, Hatch [antiguamente Proconsa]). Por último, existe una serie de organizaciones internacionales de investigación y comerciales que han comenzado a desarrollar vínculos con Chile, y se han involucrado directamente en el emergente sector de la energía marina del país (Aquatera, WAVEC, NNMREC, Edinburgh University, Heriot Watt University y otras).

Algunas personas que fueron entrevistadas en el marco de este informe, expresaron cierta preocupación por la falta de coordinación entre las universidades y las empresas privadas en Chile, ya que podrían verse intimidadas por el nivel de riesgo y resistirse a invertir su propio capital en I+D+i externos. El papel de la industria para ayudar a definir las líneas de investigación de las universidades, puede potenciarse con el fin de permitir una coordinación de las necesidades de las empresas con los objetivos nacionales de

I+D+i. Se está avanzando en este sentido con una serie de nuevas iniciativas por parte de CORFO y especialmente de Innova-CORFO. El ejemplo más evidente es el anuncio de un Centro de Excelencia en Energía de los Mares, cuya finalidad es acortar la brecha entre el mundo académico y el sector privado en este ámbito.

El Ministerio de Energía ha dejado claro que la I+D+i constituye un componente esencial de la estrategia chilena de desarrollo a largo plazo, con un papel clave que desempeñar en el fomento del crecimiento de la industria de la energía marina, incluyendo la investigación básica y aplicada, la innovación, el desarrollo de servicios, y la capacitación laboral.

La implementación de dispositivos modernos de energía marina en grandes cantidades comenzó alrededor del año 2000. Desde entonces, han sido completados unos 50 proyectos de más de 100 kW de capacidad cada uno. Los resultados de estas iniciativas representan información valiosa sobre las problemáticas que probablemente deberán ser enfrentadas en el contexto de la instalación, operación y el eventual retiro de las grandes “granjas” de dispositivos de energía undimotriz y mareomotriz y la infraestructura relacionada.

Hasta el momento se han producido pocos (o quizá ningún) impacto ecológico negativo, pero sí ha habido beneficios importantes, tanto económicos como sociales, especialmente en áreas remotas. En el caso de los proyectos de energía marina y eólica, la presencia visual de los equipos generadores muchas veces ha sido una consideración más importante que los efectos funcionales o ecológicos.

Figura N° 3.2.3.1: Principales interacciones medioambientales relacionadas con proyectos de energía marina



Se desprende de la experiencia hasta la fecha que la investigación de la energía marina aplicada y, particularmente, la investigación del medio ambiente deben ser priorizadas y coordinadas con el objeto de asegurar los mejores resultados para la industria

En Chile, la actividad minera está concentrada en el norte del país, en uno de los desiertos más secos del planeta, en donde, históricamente, el abastecimiento de agua ha sido uno de los principales problemas del sector. En años recientes, el problema se ha agudizado aún más por el aumento de la actividad minera, el crecimiento demográfico y el agotamiento de algunos recursos hídricos debido a la sobreexplotación. Hoy en día, la industria minera tiene sus esperanzas puestas en la fuente de agua más cercana: el océano. Se calcula que los requerimientos del sector, en términos de agua desalinizada, aumentarán en más de 400% en los próximos cuatro o cinco años (BNamericas, 2013). El Gobierno de Chile ha calculado que de aquí a 2020 la minería del cobre podría necesitar 6,3TWh de energía al año solo para fines de desalinización y de bombeo. La Tabla 1 hace referencia a algunas mineras chilenas que están usando agua de mar o agua desalinizada en sus operaciones.

Tabla N° 1: Principales proyectos de desalación y uso de agua de mar en Chile (Periodo 2013 al 2021)

| Operación Minera Relacionada | Capacidad (l/s) | Año Estimado de Puesta en Marcha de Planta / Proyecto Minero | Agua Desalada (D) / Uso Directo de Agua de Mar (M) |
|------------------------------|-----------------|--|--|
| Escondida (Coloso I) | 525 | En Funcionamiento (2006) | D |
| Esperanza | 780-1.500 | En Funcionamiento (2010) | M |
| Candelaria * | 300 | En Funcionamiento (2013) | D |
| Manto Verde * | 120 | En Funcionamiento (2014) | D |
| Sierra Gorda | 1.315 | En Funcionamiento (2014) | M |
| Antucoya | 280 | 2015 | M |
| Escondida (Coloso II) | 2.500 | 2017 | D |
| Diego de Almagro | 315 | 2018 | M |
| Encuentro | 115 | 2018 | M |
| Santo Domingo | 250-290 389 | 2018 | D M |
| Spence | 800-1.600 | 2019 | D |
| Radomiro Tomic | 1.600 | 2019 | D |
| Quebrada Blanca | 1.300 | 2020 | D |

Fuente: Basado en Cochilco (2015). *: Destinado a compensación a comunidades.

Para satisfacer las necesidades de las ciudades y de la minería en el norte de Chile, se han construido grandes plantas de desalinización. Los costos involucrados son altos, y

las autoridades locales y el sector privado están activamente explorando las alternativas ofrecidas por las energías renovables, incluyendo la energía marina.

El potencial undimotriz en el norte de Chile es más bajo que en el sur, pero con un promedio energético de 20 – 25 kW/m es suficiente para la generación eléctrica, y además, presenta una alta regularidad (ver Figura 37). Identificar y desarrollar las mejores soluciones de generación undimotriz para fines de bombeo o de desalinización, podrían permitir que Chile se convierta en el líder de este mercado. En cuanto a los recursos mareomotrices en el norte de Chile, éstos son mínimos.

Evidentemente, además del agua, la minería necesita enormes cantidades de energía para otros usos: la minería del cobre por sí sola representa el 30% de todo el consumo eléctrico en Chile (Ministerio de Minería, 2012) y la minería usa aproximadamente el 90% de la electricidad generada en el SING. Existe un gran potencial para que la energía marina entregue electricidad a la minería en todo Chile. A nivel internacional, las actividades de I+D+i se concentran en el desarrollo de equipos a escala de MW para sistemas de generación de electricidad que se entrega a la red eléctrica, y que en el caso de Chile serían adecuados para enfrentar estas necesidades. Existen interesantes oportunidades para programas coordinados de I+D+i para determinar cuáles dispositivos son los más idóneos, y cómo podrían ser integrados

Sin embargo, en términos de desarrollo de nuevas tecnologías, puede ser igualmente o incluso más interesante que Chile se concentre en el desarrollo de dispositivos de energía undimotriz para la desalinización y el bombeo de agua de mar (aunque el primero podría tener limitantes debido a la altitud). Este sector ha recibido relativamente poca atención hasta la fecha y su potencial es enorme, especialmente en el norte de Chile. Como cualquier otra tecnología pre comercial de energía renovable, se necesita resolver el problema en torno a la confiabilidad, y sería interesante considerar cómo los dispositivos de energía undimotriz podrían reducir la carga de plantas modificadas o existentes, en lugar de desarrollar sistemas independientes.

3.2.3.1 Conclusiones - investigación, desarrollo e innovación (I+D+i)

Los nuevos programas chilenos de investigación en energía marina deberán complementar a aquellos que ya existen. Una serie de estudios han considerado los desafíos y las necesidades de investigación del sector de la energía marina:

- Accelerating Marine Energy. The Potential for Cost Reduction (Acelerando la llegada de la energía marina. El potencial de reducción de costos) – sugerencias de Carbon Trust Marine Energy Accelerator (Carbon Trust, 2011)
- Marine Energy Technology Roadmap (Hoja de Ruta para las Tecnologías de Energía Marina - ETI/UKERC, 2010)
- Technology Innovation Needs Assessment (Evaluación de las necesidades de innovación en tecnología - TINA) – Marine Energy Summary Report (Informe Resumido sobre Energía Marina - LCICG, 2012)

- El Informe de Research Prioritisation Steering Group (Grupo Director de Prioridades de Investigación - Forfás, 2011)

Una lección que conviene extraer de la experiencia europea, es que la investigación debe estar alineada con las necesidades de la industria. Mediante la colaboración entre el mundo académico y el sector privado, es posible identificar aquellas necesidades de investigación que ofrecen el mayor potencial de desarrollo. Es importante que todo proceso de priorización de la investigación tome en cuenta la experiencia práctica, además de los estudios publicados.

Tabla N° 2: Información económicas para las distintas regiones en Chile

| Región para la energía marina | Región administrativa | Población ¹⁴ | Porcentaje de PIB ¹⁵ | PIB per capita ¹⁶ (PPA) | Tasa de desempleo ¹⁷ | % Tasa de pobreza ¹⁸ |
|-------------------------------|-----------------------|-------------------------|---------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Norte Grande | XV.Arica y Parinacota | 181,402 | 0.63 | 7,096 | 7.5 | 17.8 |
| | I.Tarapacá | 328,921 | 2.47 | 15,359 | 4.4 | 15 |
| | II.Antofagasta | 588,130 | 10.50 | 36,549 | 5.4 | 9.1 |
| Norte Chico | III.Atacama | 284,607 | 2.75 | 19,762 | 5.0 | 15.8 |
| | IV.Coquimbo | 739,153 | 3.20 | 8,866 | 6.3 | 17.5 |
| Centro | V.Valparaíso | 1,795,765 | 8.07 | 9,196 | 7.5 | 20.3 |
| | RM. Metropolitana | 7,007,620 | 48.97 | 14,307 | 6.7 | 13.7 |
| | VI.O'Higgins | 900,163 | 4.50 | 10,243 | 5.5 | 11.7 |
| Centro Sur | VII.Maule | 1,023,686 | 3.69 | 7,382 | 5.8 | 18.8 |
| | VIII.Biobío | 2,061,544 | 7.95 | 7,898 | 8.0 | 26 |
| | IX.Araucanía | 986,397 | 2.24 | 4,654 | 7.4 | 28.2 |
| | XIV.Los Ríos | 381,720 | 1.22 | 6,563 | 5.3 | 20.5 |
| Los Lagos (región X) | | 856,971 | 2.47 | 5,910 | 4.1 | 18.1 |
| Aysén (región XI) | | 106,885 | 0.48 | 9,106 | 5.5 | 11.4 |
| Magallanes (región XII) | | 159,666 | 0.86 | 11,073 | 3.1 | 7.1 |

En la Tabla 2 también se muestran las diferencias en riqueza, desempleo y pobreza que existen entre las distintas regiones de Chile. Estos aspectos influyen significativamente en una política en desarrollo de energía marina, ya que definen el mercado de la energía, y la disponibilidad y el costo del contrato de mano de obra, además de las prioridades de desarrollo de los Gobiernos Regionales.

Tabla N° 3: Comparación regional de los recursos, infraestructura y mercados energéticos para la energía marina

| Factor | Unidades | Norte Grande | Norte Chico | Centro | Centro Sur | Los Lagos | Aysén | Magallanes | Islas en el O. Pacífico |
|--|---------------------------------------|--------------|-------------|--------|------------|-----------|--------|------------|-------------------------|
| Recursos para la energía marina | | | | | | | | | |
| Costa expuesta | km ² | 1,242 | 1,229 | 486 | 1,195 | 831 | 1,213 | 2,619 | 73 |
| Plataforma de suelo marino | km ² <100 m de profundidad | 5,000 | 3,300 | 2,175 | 18,500 | 8,600 | 21,400 | 78,250 | 150 |
| Clima de oleaje ¹⁹ | kW/m | 20-25 | 25-31 | 36-41 | 46-61 | 71-87 | 87-111 | 111-120 | 45-60 |
| Recurso undimotriz | MW | 20,000 | 21,300 | 10,700 | 32,000 | 25,700 | 45,200 | 88,600 | 1,900 |
| Sitios de mareas clave | Número | 0 | 0 | 0 | 1 | 7 | 3 | 14 | 1 |
| Recurso mareomotriz ²⁰ | MW | 0 | 0 | 0 | 14 | 1,067 | 220 | 3,560 | 12 |
| Infraestructura | | | | | | | | | |
| Plantas térmicas | Número | 14 | 11 | 20 | 24 | 6 | 5 | 4 | 0 |
| Plantas hidroeléctricas | Número | 6 | 4 | 29 | 42 | 11 | 4 | 0 | 0 |
| Plantas eólicas | Número | 6 | 13 | 4 | 9 | 3 | 1 | 1 | 0 |
| Plantas solares | Número | 30 | 2 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Subestaciones costeras | Número | 10 | 8 | 9 | 9 | 7 | 0 | 0 | 2 |
| Puertos principales ²¹ | Número | 3 | 2 | 2 | 5 | 1 | 1 | 2 | 2 |
| Naves de remolque | >50 Tonelaje | 19 | 2 | 17 | 16 | 9 | 1 | 9 | 0 |
| Universidades | Número | 20 | 13 | 59 | 34 | 6 | 3 | 3 | 0 |
| Mercados energéticos | | | | | | | | | |
| Población ²² | Miles de habitantes | 1,098 | 1,024 | 9,697 | 4,453 | 857 | 107 | 160 | 7 |
| Caletas pesqueras | Número registrados | 30 | 53 | 40 | 119 | 196 | 17 | 10 | 7 |
| Sitios para la acuicultura | Número | 23 | 119 | 1 | 47 | 2,015 | 490 | 42 | 0 |
| Sitios para la minería ²³ | Número | 668 | 3,686 | 1,419 | 241 | 0 | 14 | 25 | 0 |
| Abastecimiento de agua | % viviendas | 97 | 96.3 | 97.5 | 82.0 | 82.2 | 92.6 | 98.3 | n/a |
| Plantas de desalinización | Número | 6 | 3 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |

3.2.4 FINANCIAMIENTO

El financiamiento es un tema de suma importancia para la industria de energía marina. Las tecnologías necesarias para el desarrollo de la energía undimotriz y mareomotriz están en las etapas iniciales de desarrollo y, actualmente, el costo de generación de estas fuentes de energía - conocido como costo nivelado de energía (levelised cost of electricity, LCOE) - es mayor que otros medios de generación energética. Sin embargo, no es fácil sacar conclusiones generales a partir de esto, debido a la variedad de influencias en los costos e ingresos que afectan a los proyectos de energía marina, y la naturaleza de los mercados que necesitan de energía renovable a partir del suministro de energía marina.

Factores determinantes en la viabilidad financiera de la energía marina, en la siguiente tabla se indican algunas de las variables financieras básicas a considerar, junto con algunos comentarios acerca de sus características para el sector undimotriz.

Tabla N° 4: Factores determinantes en la viabilidad financiera de la energía undimotriz

| Factor | Descripción | Rango o variabilidad |
|----------------------------|--|---|
| Nivel de recurso | La energía entregada por las olas en un punto particular. | En Chile, el promedio anual de la altura de la ola varía de 20 kWm en Arica a más de 110 kWm en Magallanes (Baird & Associates, 2012) |
| Cantidad del recurso | La escala o área de un recurso determinado que representa efectivamente la longitud de costa y las extensiones de lecho marino con una profundidad adecuada. | En algunas áreas irregulares y de pendientes pronunciadas puede que se encuentren áreas apropiadas o suficiente espacio para colocar un grupo de dispositivos generadores de energía undimotriz. En otras zonas puede haber una extensión de 20 o 30 kilómetros de lecho marino adecuado para la instalación de varias filas de dispositivos. Con niveles de extracción de energía de 5 a 10% por fila de dispositivos, se asume que 3 filas conforman el límite comercial, proporcionando un mejora en la capacidad de casi tres veces del nivel de energía undimotriz incidental. |
| Disponibilidad del recurso | El patrón con el cual la energía undimotriz llega a un punto determinado. | Un nivel de oleaje constante entrega mayor producción (factores de planta más altos) y Chile posee uno de los regímenes de oleaje más constantes del mundo. Los factores de planta en Chile deben ser de alrededor de un 50% en comparación al 30% de Europa. Sin embargo, los períodos con condiciones de oleaje más calmas pueden servir para acceder, instalar, retirar o reubicar dispositivos, lo que también, puede significar un beneficio en términos de costo. |
| Costo de inversión | La suma de dinero invertido en el desarrollo de tecnología que debe ser recuperado por medio de la venta de tecnología o ingresos de operación | Algunas empresas de tecnología undimotriz ya han invertido cerca de USD 100 millones en la región para desarrollar y probar prototipos a escala de MW, y es posible que sea necesario invertir entre USD 150 y 200 millones más, antes de entregar las primeras máquinas de producción en una cantidad significativa. Algunos de los nuevos participantes del mercado han logrado desarrollar y probar dispositivos con calificaciones similares por sumas bastante más bajas (entre USD 10 y 40 millones), aunque aún no se ha comparado su desempeño con el de los participantes preexistentes. |

| | | |
|--|---|--|
| | | <p>Algunas empresas que desarrollan tecnologías modulares para extracción de energía undimotriz pueden desarrollar modelos de producción a un menor costo, pero su capacidad está a escala de kW en vez de MW.</p> <p>Muchas de estas tecnologías han sido apoyadas mediante subvenciones y en algunos casos por ventas directas de modelos tecnológicos iniciales presentados a modo de demostración. Los niveles residuales de inversión que aún faltan por pagar con las ventas a futuro pueden ir desde cientos de miles hasta varios millones de dólares. La recuperación de estos costos con los primeros 100 dispositivos producidos, por ejemplo, puede agregar miles o cientos de miles de dólares al costo individual por dispositivo.</p> |
| <p>Costo de capital en tecnología (CAPEX)</p> | <p>Los costos iniciales de fabricación e instalación de uno o varios dispositivos (arreglos)</p> | <p>Existe el potencial de que los dispositivos (o al menos sus estructuras) se fabriquen en Chile a un costo más bajo, independientemente que las tecnologías fueran desarrolladas en Chile o no.</p> <p>La instalación de los dispositivos para extraer energía undimotriz podría ser más costosa en Chile si se necesitan embarcaciones especializadas (ya que el costo de contar con estas embarcaciones puede ser más alto que en Europa o Estados Unidos). Las condiciones medioambientales (oleaje o pendiente del lecho marino) pueden ser más complejas y, por lo tanto, más costosas, pero los precios de embarcaciones en general y los costos de personal son más bajos.</p> |
| <p>Gastos operacionales en tecnología (OPEX)</p> | <p>El costo permanente de operar y realizar mantenimiento a uno o a un arreglo de dispositivos.</p> | <p>La operación y el mantenimiento pueden ser más complejos debido a la alta consistencia del régimen de olas, sin embargo, los costos de personal son más bajos.</p> |
| <p>Costos de desarrollo del proyecto</p> | <p>Los costos iniciales para identificar un lugar, obtener permiso para desarrollarlo, asegurar su conexión al mercado (red eléctrica o uso directo) y generar un contrato para la energía producida.</p> | <p>Existe escasa experiencia en el desarrollo de sitios para proyectos de energía marina en Chile. Sin embargo, es probable que los requerimientos legales en Chile sean menos demandantes que en muchos países europeos, donde las directivas y la legislación de la UE pueden hacer que el proceso sea más complejo.</p> <p>El recurso de oleaje está distribuido por toda la costa de Chile, por lo que no debería presentar una gran dificultad encontrar sitios adecuados, ya que existen muchas áreas interesantes.</p> |
| <p>Valor de la trayectoria anterior</p> | <p>El valor asociado a la experiencia ganada para proyectos a futuro.</p> | <p>Muy alta para la energía undimotriz en Chile, ya que su potencial de desarrollo es muy grande.</p> |

Hasta que la energía marina pueda competir directamente con otras formas de generación, los primeros proyectos necesitarán de apoyo – mediante subsidios de capital y posiblemente de ingresos - para desarrollar la tecnología (investigación y desarrollo) y para las primeras granjas de energía marina, hasta que el costo de la tecnología se haya reducido a un nivel donde pueda existir competencia con otras fuentes de generación de energía.

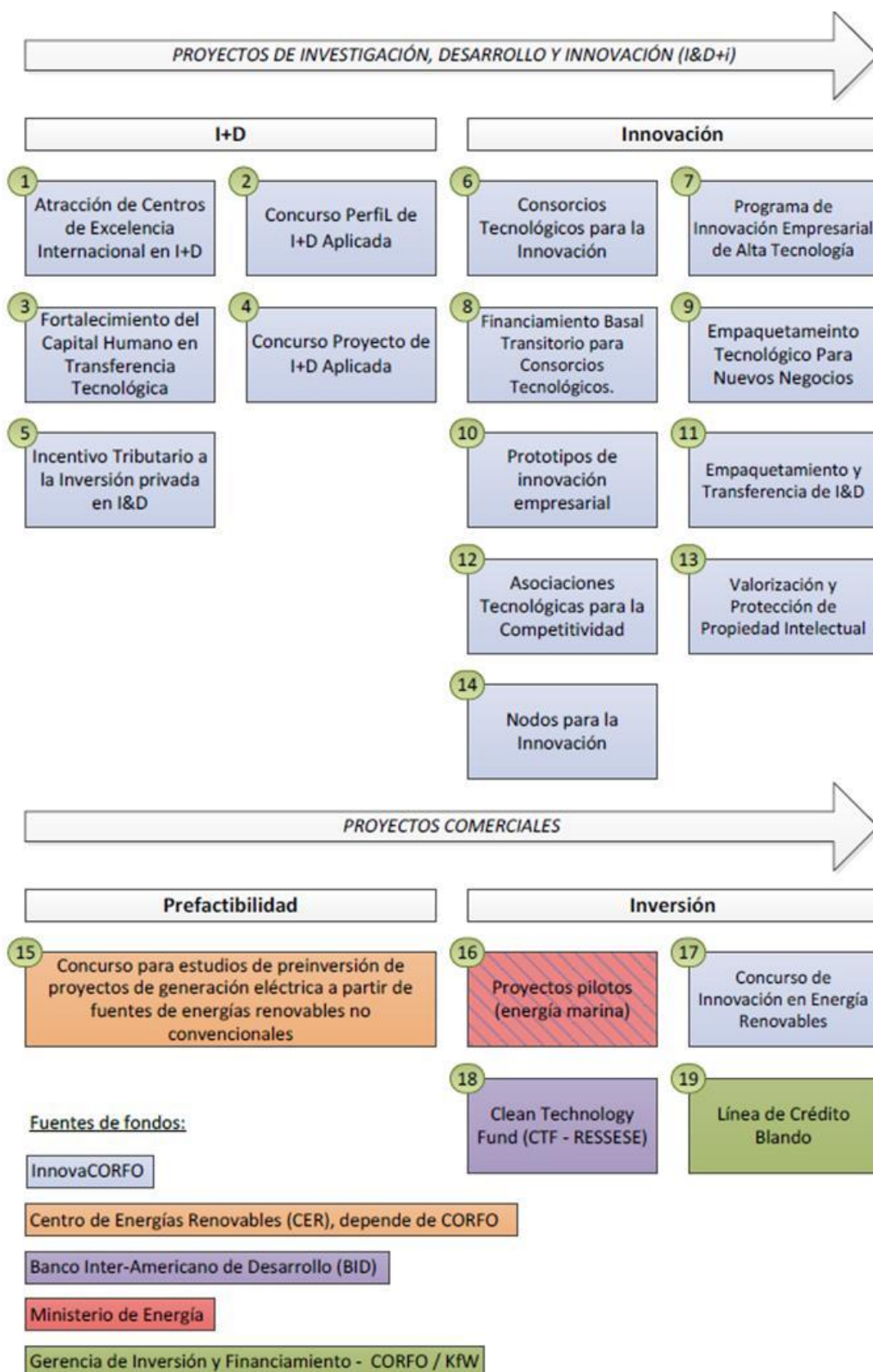
La Estrategia de Energía Marina del Ministerio de Energía, manifiesta la necesidad de entregar instrumentos que apoyen y promuevan la inversión y el desarrollo de la industria de energía marina en Chile. Reconoce que un modelo de financiamiento por proyecto no es viable y que se debería estudiar la posibilidad de algún tipo de subsidio, además de instrumentos de apoyo financiero para evitar barreras de entrada al mercado.

El mercado eléctrico chileno está desregulado y opera en base a un modelo de costo más bajo. Existen incentivos y metas para las Energías Renovables No Convencionales (ERNC13) y recientemente se han incrementado, sin embargo, actualmente apuntan a proyectos de neutralidad tecnológica y no están dirigidos a tecnologías precomerciales, como son la energía undimotriz y mareomotriz.

El Informe Marine Energy Development (Desarrollo de energía marina) del 2011 (E&A/UoE, 2012) describe incentivos y herramientas de financiamiento para el desarrollo de proyectos de energía marina, basándose en la experiencias de Europa y específicamente del Reino Unido. Para una estrategia de desarrollo de energía marina en Chile (que es lo que el Gobierno de Chile ha clasificado como una de sus metas), se han discutido diversos mecanismos de financiamiento incluyendo el sistema UK ROC, las subastas implementadas en Perú y Brasil y las feed-in tariffs de Canadá (una tarifa especial o sobre precio por unidad de energía eléctrica inyectada a la red proveniente de ERNC).

Ya existen en Chile varios instrumentos de financiamiento para los proyectos de fuentes de energía renovable y la mayoría son administrados por CORFO, la agencia gubernamental para el fomento de la producción en Chile. En la Figura 3.2.3.1 a continuación se pueden observar los mecanismos de apoyo financiero potenciales para los proyectos de energía marina.

Figura N° 3.2.4.1: Mecanismos de apoyo financiero disponibles en Chile y aplicables a los proyectos de energía marina



Se puede observar en la Figura 3.2.4.1 que hay una cantidad importante de fondos disponibles para el estudio, desarrollo e innovación de proyectos en Chile. Varios desarrolladores de tecnología y universidades chilenas ya han utilizado estos fondos para realizar proyectos a pequeña escala (ver ejemplos en la Figura 3.2.3.2). Los fondos del Centro de Energías Renovables para estudios de pre-factibilidad pueden ser de utilidad para evaluar los proyectos de energía marina, y el sector privado ha manifestado interés en usar el fondo de consorcios para la innovación de CORFO para desarrollar este tipo de proyectos. Sin embargo, los fondos para tecnologías limpias, KfW e innovación en energías renovables, están diseñados para tecnologías más avanzadas con costos más competitivos y un riesgo tecnológico más bajo.

Aunque algunos de estos fondos se podrían utilizar como parte de un arreglo financiero más amplio, los dos instrumentos con el potencial de crear un impacto importante en la energía marina en Chile a corto plazo son los proyectos pilotos y el Centro de Excelencia Internacional.

Los proyectos pilotos de energía marina propuestos apuntan a instalar los primeros dispositivos de energía marina a gran escala en aguas chilenas. El apoyo total disponible se estima en unos USD 9 millones para energía mareomotriz y USD 5 millones para energía undimotriz, lo que financiaría hasta el 50% de los costos del proyecto. Se espera la convocatoria de las primeras ofertas durante el 2014 y el propósito es contar con dispositivos instalados para el año 2016. El fondo será administrado por el Ministerio de Energía con el apoyo del Banco Interamericano de Desarrollo, quien proporcionará fondos adicionales para los proyectos.

Desde el año 2008 Chile cuenta con un crédito tributario para investigación y desarrollo de 35% por gastos en contratos relacionados con estas áreas. En el año 2012 se aprobó una ley que establece un crédito tributario máximo para cada empresa de USD 1,2 millones, tres veces el máximo anterior. Esta ley, también, permite aplicar los créditos a una gama más amplia de gastos; entrega un mayor grado de flexibilidad en los procedimientos; permite la presentación de requerimientos hasta 180 días después de iniciados los trabajos de investigación y desarrollo; y elimina el límite de porcentaje de ventas brutas para permitirle a los start-ups y las PYMES el uso de este crédito. Además, y lo que es significativo para las empresas internacionales, el crédito, también, considera hasta un 50% del costo de actividades de investigación y desarrollo realizadas fuera de Chile.

Los fondos existentes han sido suficientes para apoyar a algunas empresas chilenas en la evaluación de prototipos pequeños o a escala parcial (ver Figura 3.2.4.1), además de varios proyectos universitarios y otros estudios. Los proyectos pilotos asegurarán las primeras instalaciones a escala completa en Chile y el Centro de Excelencia Internacional mantendrá un cierto nivel de actividad de investigación y desarrollo e innovación.

Figura N° 3.2.4.2: Trayecto de la tecnología (basado en Carbon Trust, 2011)



Aunque la interconexión de los sistemas SIC y SING en el año 2018 puede disminuir los precios de la electricidad por un cierto tiempo, es probable que a largo plazo los precios aumenten debido al incremento en la demanda y la dependencia continua de Chile de las importaciones de combustibles fósiles desde el extranjero.

El costo nivelado de las energías undimotriz y mareomotriz disminuirá mientras la producción acumulada de estas fuentes aumente. No se sabe hasta qué punto los proyectos de generación eléctrica a escala comercial y conectados a la red sean comercialmente atractivos, pero es posible que algunos proyectos sean competitivos en cuanto a costos respecto de otras fuentes de energías renovables para mediados de la década del 2020.

Aún es posible que Chile siga una estrategia de desarrollo sin tener que subsidiar implementaciones pre-comerciales a gran escala, por medio de:

- La continuidad de actividades en el área convencional de prototipos de gran escala conectados a la red eléctrica, por medio del desarrollo de un nuevo instrumento de financiamiento para apoyar a las primeras granjas pre-comerciales en Chile. Por ejemplo, esto puede incluir una expansión de los proyectos pilotos undimotrices y mareomotrices (que poseen un total de <2MW de capacidad instalada) para que incluyan múltiples dispositivos (con 10 a 30MW de capacidad) en el mediano plazo (por ejemplo, cerca del 2020).
- Apoyo a proyectos de investigación, desarrollo e innovación que contribuyan a reducir el riesgo tecnológico y reduzcan los costos a niveles viables comercialmente. Este trabajo debe ser coordinado con las necesidades de la industria global de energía marina. En Chile, ya existen ejemplos de investigación y desarrollo en energía marina para dispositivos instalados en el extranjero, donde la adaptación de estas máquinas a las aguas chilenas probablemente será un factor clave. Se debe considerar esta opción como apoyo complementario al desarrollo de tecnologías chilenas.

- El desarrollo de nuevos estudios e instrumentos de financiamiento para apoyar el desarrollo de nichos de mercados donde Chile cuenta con una ventaja natural, por ejemplo:
 - Bombeo y desalinización de aguas con el uso de energía undimotriz en el norte de Chile (a gran escala para la industria minera y centros poblados, y a pequeña escala para comunidades aisladas)
 - Generación eléctrica con el uso de energía undimotriz a pequeña escala para comunidades aisladas en todo Chile
 - Generación eléctrica con el uso de energía mareomotriz a pequeña escala para comunidades aisladas y granjas salmoneras en el sur de Chile

En las industrias mineras, salmoneras, de construcción naval y otras industrias clave, se presentan oportunidades para que las empresas privadas formen alianzas para fomentar la investigación y el desarrollo de la energía marina, lo que les entregará ventajas estratégicas en el largo plazo.

4 METODOLOGÍA

Las tendencias recientes marcan una clara inclinación hacia el uso de las ERNC en Chile y se realizará un análisis de los efectos de la legislación vigente en materia de energía renovable no convencional (ERNC) y medio ambiente.

Para este proyecto se han elegido dos proveedores presentes en el mercado que ofrecen diferentes tecnologías de generación de energía a través del método de Undimotriz, refiriéndome a la empresa escocesa Pelamis Wave Power (PWP) con su sede en Edimburgo y la empresa Chilena Wilefko con sede en Santiago patrocinada por Corfo y con desarrollo e investigación de la Pontífice Universidad Católica de Valparaíso.

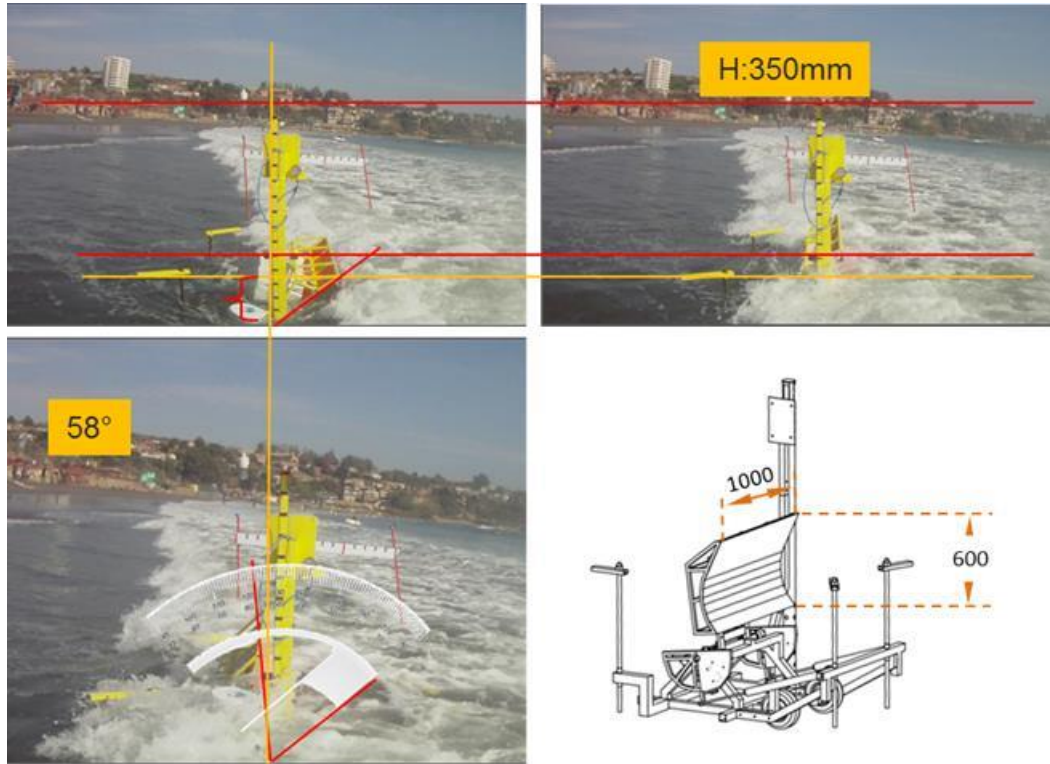
Figura N° 4.1: Dispositivo Pelamis tamaño real



Figura N° 4.2: Dispositivo Pelamis operativo



Figura N° 4.3: Dispositivo Wilefko



En lo que dice relación al proyecto, éste se limitará a desarrollar un estudio de técnico económico respecto a la generación de energía a partir del potencial eléctrico que posee el mar chileno, en particular, sus olas. Para ello, el objetivo es determinar la pre factibilidad de instalar una central de tipo undimotriz con tecnología Pelamis o Wilefko con una capacidad de 2MWH, en el puerto Esperanza de Minera Centinela, perteneciente al grupo Minero Chileno Antofagasta Minerals. Ubicado en la localidad de Michilla, 50 Km al Norte de la Ciudad de Mejillones en la segunda región de Antofagasta Chile. El proyecto será analizado bajo tres perspectivas o estudios: Comercial, Legal/Medioambiental y Técnico/Económico.

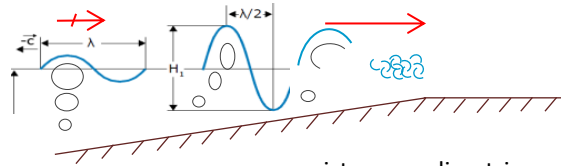
La instalación del sistema “WILEFKO” o “PELAMIS” debe ser capaz de suministrar 2MWH, por medio del sistema undimotriz (olimotriz) energía de las olas y la empresa ABB diseñará el generador apropiado y los medios de conexión eléctrica para la interconexión con sistema existente, en 23kV (u otro voltaje), para la posterior conexión al sistema Interconectado del Norte Grande SING.

Figura N° 4.4: Modelo del proyecto de generación energética Undimotriz

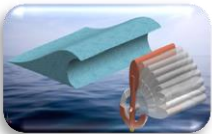


Olas

Vector Horizontal
Compresión de la onda
cerca de la costa

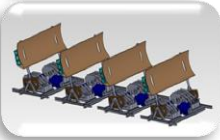


Pared de agua "que se mueve a 30 km / h
es 800 veces más denso que el aire
La energía aquí es mayor



Flap Cóncavo de Impacto
Con sistema de flotación 7% eficiencia (CFD Star-CCM+)

sistema undimotriz puede capturar más energía debido su cercanía a la costa en comparación con el resto de los sistemas ERNC . La mejor eficiencia energética de nuestro diseño se obtiene a partir de 2 m olas, que a su vez se encuentran los tamaños de onda más predominantes en la costa chilena



Tren de Flaps

Flaps sucesivos

$$\sum_{i=0}^n a(1-b)^i = \text{potencia}; b = \% \text{ pérdida},$$

= número de flaps

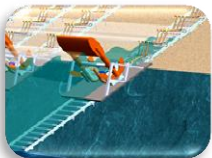


almacenamiento

La energía disponible de acuerdo a la demanda,
Mayor Factor Despacho Energía



recio de venta por MW se eleva del 30% al 200%,



Rieles en la costa para los trenes de flaps

Permitir ajustar la posición vertical de los flap de acuerdo a nivel de la marea
Mantiene bajos los costos de mantenimiento, evitando el uso de embarcaciones

Permite el 10% de incremento de eficiencia



Modelo de negocio

1. Etapa de almacenamiento → Modelo de Potencia o estabilizador
2. con almacenamiento → Generación de Modelo
3. Dispositivos portátiles, con 300KW capacidad , para zonas aisladas o aplicadas en hogares utilizando la costa
4. **Desalinización de agua de mar**

En la región de Atacama hay 74 lugares aislados

4.1 ESQUEMA DE INSTALACIONES

Bajo el mismo concepto de aporte a una minería sustentable e inclusiva, se evaluó la factibilidad de instalar una central undimotriz en el Puerto Esperanza de Minera Centinela utilizando Energía Renovable No Convencional (ERNC), considerando el montaje de una planta WILEFKO de 4000 KW de potencia. En la figura N°4.1.1, se observa un polígono señalando donde se instalará el sistema olimotriz, lugar privilegiado, ya que posee olas ideales para esta tecnología por su frecuencia, Amplitud y desplazamiento.

Figura N° 4.1.1: Zona asignada para la instalación sistema undimotriz



La ubicación de la zona para la operación tiene las coordenadas geográficas, latitud $22^{\circ}43'23.43''S$, longitud $70^{\circ}17'14.43''$, el cual posee un frente de costa útil de 300 m, con una zona de rompiente promedio de 30 metros de ancho. La distancia entre el punto medio de extracción y el sector de donde se encontrará la sala maquina eléctrica es de 250 m lineales, según Figura N° 4.1.2

Figura N° 4.1.2: Esquema de las instalaciones



En la Figura N°4.1.2, se muestra la distribución de los componentes Wilefko, observando las etapas del proceso, Captura de energía, Transformación, Acumulación y Generación.

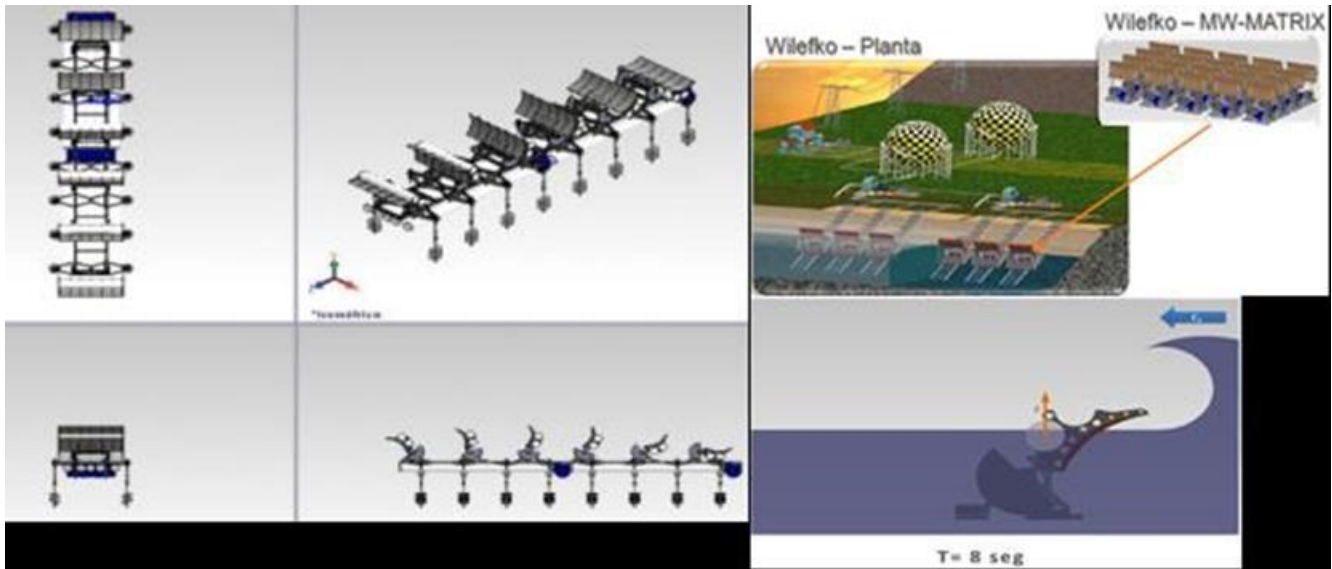
La zona de montaje será en la franja marina próxima a la costa donde se emplazaran los dispositivos Wilefko a una profundidad no superior a -5m.

4.2 CAPACIDADES DE DISEÑO

La franja de montaje tendrá las siguientes dimensiones de 30 metros de ancho y 200 metros de largo, que estará calculado por la potencia promedio de la zona, estimada en 12,38 MW por 1Km de costa con un Factor de Planta del 57%. Es posible aumentar el factor de planta y/o corregir una subestimación de potencia de la zona de interés, incrementando el largo de la franja hasta alcanzar el óptimo deseado.

El tren de ola o motor de ola, se compone de dos estructuras independientes, según Figura N° 4.2.1

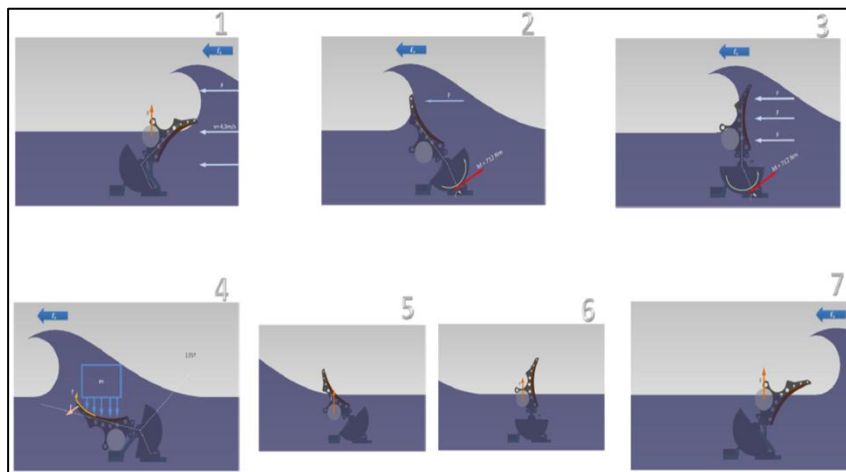
Figura N° 4.2.1: Tren de paletas captadoras de la energía de olas



La primera área llamada cama de tren, corresponde a una estructura metálica revestida en HDPE anclada al fondo marino por medio de tornillos de fibra de vidrio, capaces de soportar 100 ton. La segunda llamada tren de paletas está compuesta de una estructura metálica revestida de hdpe, donde se instala de 6 a 8 paletas cóncavas fabricadas en fibra de vidrio, las cuales reciben el impacto de las olas. El conjunto ensamblado posee las dimensiones de 20 m de largo, 3 metros de ancho y 2 metros de altura con la paleta en descanso con un peso aproximado de 8 ton.

El funcionamiento de la cama de tren de olas, se logra a través de 7 movimientos continuos representados en la Figura N° 4.2.2, generados por las olas del mar y obteniéndose aire comprimido.

Figura N° 4.2.2: Diagrama de movimientos de tren de paletas captadoras de energía de las olas del mar



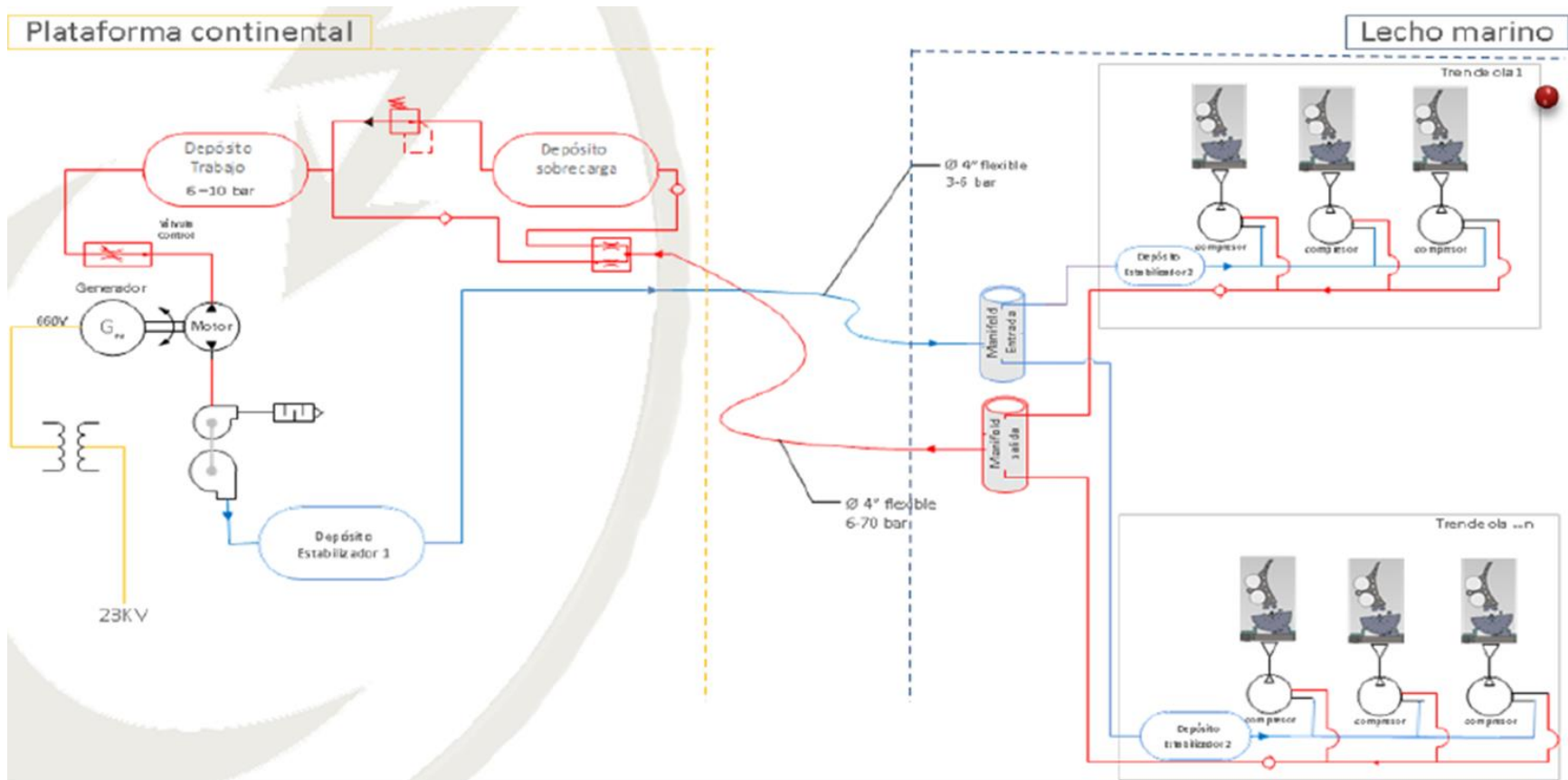
La primera estación o estación de transferencia, corresponde a una estación más próxima a la costa, está compuesta por un manifold con una entrada de aire atmosférico y otra salida de aire comprimido. Se empalman los manifolds de las estaciones de trenes de olas a un manifold principal metálico recubierto con HDPE hasta empalmar con los dispositivos de almacenamiento y sala de máquinas.

El aire comprimido se almacena en un depósito y tiene dos etapas; almacenamiento de trabajo y almacenamiento de sobre carga la cual recupera las alzas de presiones en el sistema. Las dimensiones del depósito de aire de trabajo dependen del factor de la planta exigido por el sistema.

Para aumentar el almacenamiento de aire comprimido es necesario aumentar el diámetro de las tuberías de ingreso, siendo usados como almacenamiento primario de energía que permite disminuir el volumen de los depósitos o solo aumentar la capacidad de generación. El diámetro de la tubería no va ser mayores a 6”.

En la Figura N°4.2.3, se observa el diagrama de flujo de la planta Wilefko, el tren, compresor, acumulador y el generador de 23 KV propuesto por la empresa ABB.

Figura N°4.2.3: Diagrama de flujo de la planta Wilefko, el tren, compresor, acumulador y el generador de 23 KV ABB



CAPTURA → **TRANSFORMACION** → **ALMACENAMIENTO** → **GENERACION**

En la Figura N°4.2.4 se especifica los requerimientos técnicos del generador diseñado por ABB, es ABB type AMS 800L4A BST brushless synchronous Generator rated con protección contra la corrosión utilizando una capa epoxica según la norma ISO 12944C5M con los siguientes datos (ver figura 15)

Power= 2500 kVA

PF = 0,8 (overexcited)

PF = 1 (Underexcited)

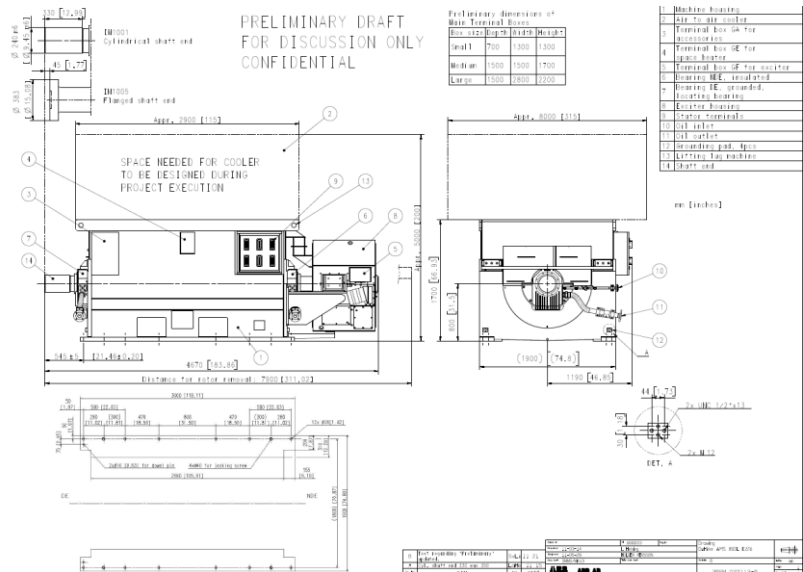
Voltaje = 6600 V

Frecuencia = 50 Hz

Velocidad = 1500 rpm

Índice de Protección IP56

Figura N°4.2.4: Generador tipo turbina diseñado ABB



Airgap torque equation - 3-phase short circuit

$$T_e(t) = M_0 e^{-t/\tau_0} \sin \omega t + M_1 e^{-t/\tau_1}$$

$$M_0 = 11.5 ; M_1 = 1.83 ; \tau_0 = 0.127 \text{ s} ; \tau_1 = 0.117 \text{ s} ; \omega = 314 \text{ rad/s}$$

Maximum value of torque $12.8 * T_N$, when $t = 4.9 \text{ ms}$

Airgap torque equation - 2-phase short circuit

$$T_e(t) = M_0 e^{-t/\tau_0} \sin \omega t - M_1 e^{-t/\tau_1} \sin 2\omega t + M_2 e^{-t/\tau_2}$$

$$M_0 = 9.75 ; M_1 = 4.89 ; M_2 = 2.01 ; \tau_0 = 0.183 \text{ s} ; \tau_1 = 0.676 \text{ s} ; \tau_2 = 0.357 ; \omega = 314 \text{ rad/s}$$

Maximum value of torque $14.3 * T_N$, when $t = 6.66 \text{ ms}$

Rated torque $T_N = 13.3 \text{ kNm}$

| Forces on the foundation per stator side | | | |
|--|---|---|--|
| Static | Rated torque | 2-phase short circuit | 3-phase short circuit |
| | | | |
| $F = 115.5 \text{ kN}$ | $F = 115.5 \text{ kN} \pm 7.4 \text{ kN}$ | $F = 115.5 \text{ kN} \pm 105.7 \text{ kN}$ | $F = 115.5 \text{ kN} \pm 94.5 \text{ kN}$ |

4.3 CONDICIONES MARÍTIMAS Y CLIMA DE OLAS EN CALETA MICHILLA

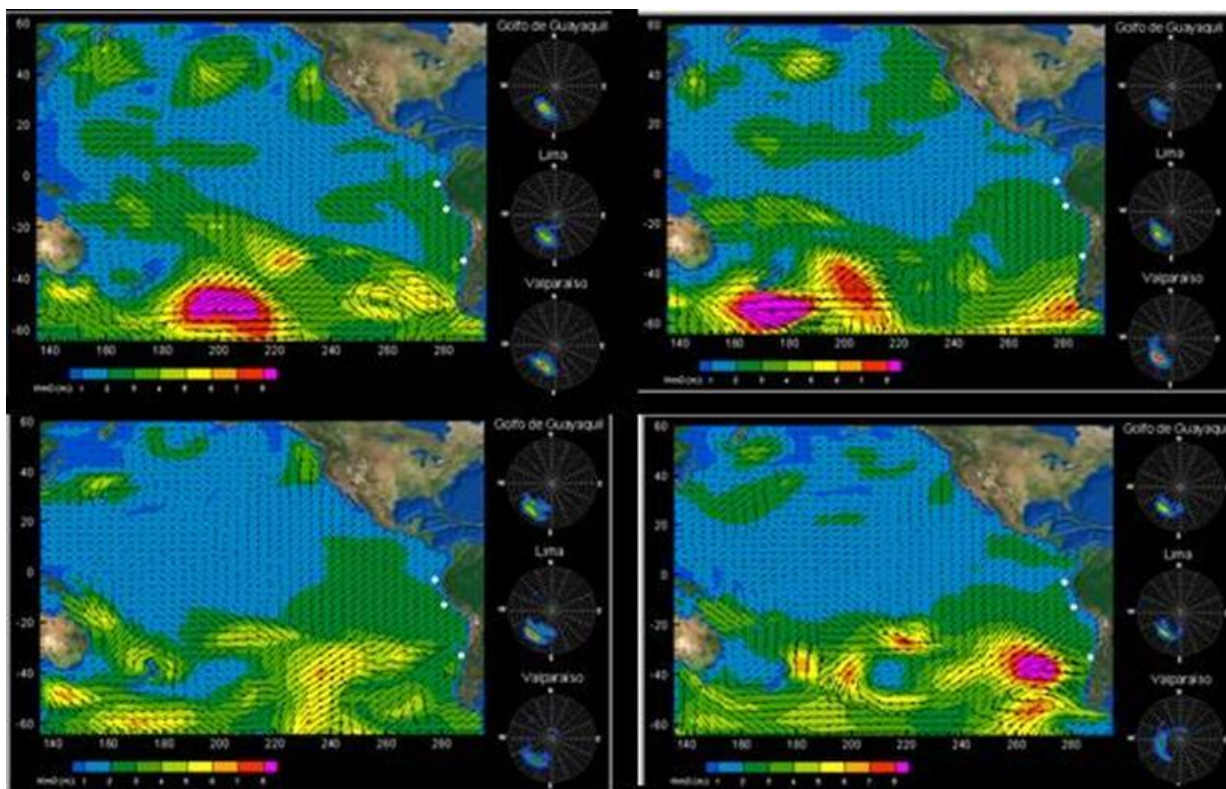
La información necesaria para determinar si la zona de instalación de Wilefko y el número de trenes es necesario para obtener 4000 Kw, se utilizó una simulación del recurso undimotriz (oleaje), WW3 (Wave Watch III) y el estudio de clima de oleaje para el proyecto Esperanza realizado en Caleta Michilla año 2007, elaborado por la empresa Proconsa y el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) desarrollando su proyecto de parámetros estadísticos, análisis de refracción y shoaling de olas para transferir las condiciones de olas obtenidas del Hindcast en aguas profundas hasta dos puntos ubicados de la zona. Este proceso simula cambios en la altura y dirección de la ola, de acuerdo con las respuestas de las olas a la batimetría en aguas someras. Este estudio del clima de oleaje fue desarrollado utilizando la base de datos de olas en aguas profundas conocida como Olas Chile II, la cual fue completada en el año 2005 como proyecto desarrollado para el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA). Este proyecto tuvo como principal objetivo desarrollar una base de datos de las olas operacionales de largo plazo, confiable y válida para toda la costa de Chile.

Olas del Pacífico surge como extensión del proyecto Olas Chile II, la base de datos de oleaje desarrollada por Baird & Associates S.A. que se ha transformado en el estándar institucional en Chile en lo que respecta a la definición de climas de oleaje. Para que este clima de oleaje sea confiable en el largo plazo para todo el Océano Pacífico, se han realizado validaciones pormenorizadas con mediciones de olas desde Canadá hasta Chile.

Este es uno de los motivos por el cual esta base de datos adquiere gran pertinencia en proyectos de ingeniería marítima y costera a lo largo de las costas de toda América (del Norte, Central y del Sur) que se encuentran expuestas a las olas del Pacífico.

Esta base de datos de oleaje en aguas profundas es el resultado del trabajo de modelación global espectral de oleaje realizado junto con el Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos (USACE), la Estación Experimental de Vías Navegables, y el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), ver Figura N° 4.3.1.

Figura N° 4.3.1: Modelación global espectral Olas del pacifico de Junio 2003



WaveWatch III es un modelo espectral de olas oceánicas que cuenta con capacidades particularmente destacables en la predicción de swells de larga distancia, gracias a los avanzados métodos numéricos incorporados en el algoritmo correspondiente a la propagación.

El programa de modelación utilizado para generar la base de datos ofrece mejoras en diversas áreas:

- Los campos de vientos presentan mejoras significativas, ya que se han realizado correcciones estadísticas utilizando las mediciones de vientos oceánicos obtenidas por el escaterómetro del satélite QuikSCAT.
- La validación es amplia, ya que se han considerado los datos de altímetros satelitales de varios años para todo el Océano Pacífico.
- También cuenta con nuevos tipos de presentaciones de los resultados de los análisis de olas.

Las principales características de este modelo hindcast que lo distinguen de otros modelos de este tipo disponibles para la región son:

- La consistencia estadística.

En muchos otros modelos hindcast, particularmente aquellos que se basan en el uso de productos de predicción atmosférica, los detalles de la modelación (por ejemplo, la resolución) varían en el transcurso del modelo, generándose variaciones en los errores estadísticos con el paso del tiempo. El modelo hindcast de Baird para el Océano Pacífico se basa en el uso de campos de vientos consistentes desde el punto de vista estadístico.

- No existe asimilación de datos de olas en el modelo hindcast.

Muchos modelos de este tipo "corrigen" en forma local los datos al asimilar los registros de oleaje. Esta asimilación limita la capacidad de verificar los resultados del modelo hindcast de manera independiente.

- Disponibilidad de datos espectrales.

Se cuenta con un completo conjunto de datos espectrales dirección-frecuencia a lo largo de toda la costa del Pacífico. Considerando las complejas condiciones de oleaje de carácter bimodal a lo largo de la costa del Pacífico en América del Norte, Central y Sur, cualquier lugar debería ser analizado utilizando datos espectrales completos.

A partir de los espectros direccionales de olas, se obtiene un completo conjunto de parámetros integrados de oleaje, incluyendo la distinción de hasta seis diferentes componentes de sea/swell en un archivo especializado con series temporales.

- Los resultados del modelo incluyen:

Campos con grillas de los parámetros medios de ola. (Hs, Tm, dirección media de ola (MWD), dispersión direccional, frecuencia peak, dirección peak, frecuencia peak de seas, dirección media del sea) a cada 6 horas.

Espectros de olas direccionales cada 3 horas, cada 2 grados de latitud a lo largo de toda la costa norte y sudamericana.

Espectros de olas direccionales cada 3 horas, con validación en diferentes lugares con olígrafos y altímetros satelitales.

Los conjuntos de campos de viento del modelo hindcast fueron obtenidos de la base de datos de re-análisis del Centro Nacional para la Predicción Ambiental de los EE.UU. (NCEP). La base de datos de re-análisis consiste en una simulación numérica de condiciones atmosféricas globales, cuya resolución temporal es de 6 horas y abarca más de 50 años. Se extrajeron los campos de vientos U (este-oeste) y V (norte-sur), a un elevación de 10 m sobre el suelo de una base de datos globales, y de una grilla que cubre toda la región del Océano Pacífico. La resolución espacial de la base de datos de viento de re-análisis es de aproximadamente 1,9°.

Los vientos de esta base de datos, al igual que en cualquier otro modelo atmosférico global, tienden a subestimar las velocidades peak del viento durante tempestades

porque la resolución de la grilla es limitada. Estos vientos también subestiman la velocidad de los vientos en regiones tropicales.

Para considerar estas limitaciones, se realizó una comparación pormenorizada, de carácter global, con 6 años de mediciones de vientos oceánicos realizadas por el escaterómetro del satélite QuikSCAT. La figura a continuación presenta un ejemplo de la tendencia de la velocidad entre los vientos registrados en la base de re-análisis y los vientos del QuikSCAT.

Se observa una tendencia significativamente baja en los trópicos, mientras que los datos de re-análisis sobreestiman la velocidad de los vientos en la zona offshore en el norte de Chile y Perú.

Se realizaron diversas validaciones mediante la comparación de los resultados de los modelos con mediciones de oleaje efectuadas en diferentes lugares del Océano Pacífico.

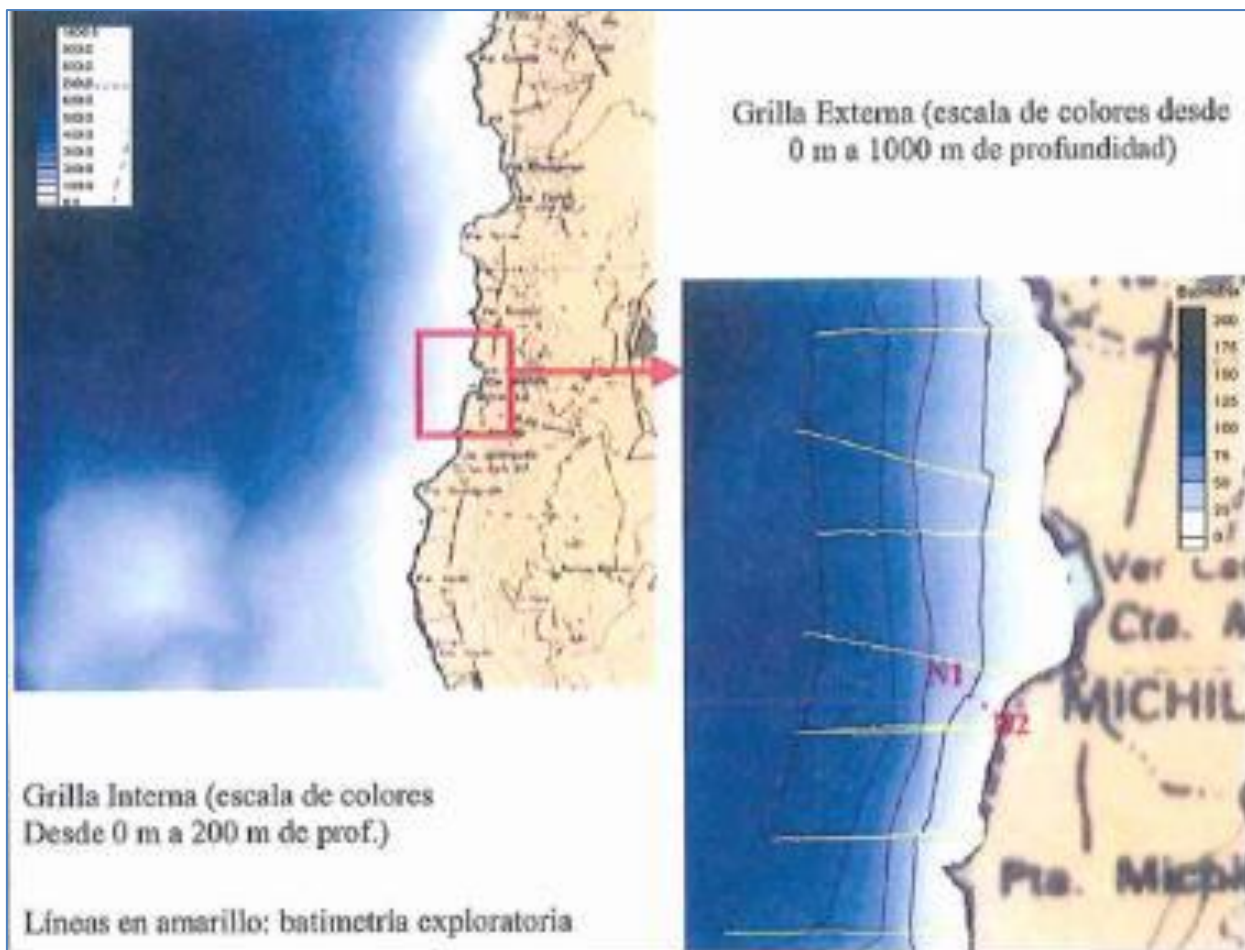
El modelo de olas no fue calibrado con las mediciones disponibles, dado a que es la base de datos de viento la que ha sido calibrada. Asimismo, las mediciones no han sido asimiladas en el modelo hindcast, puesto que son usadas sólo para validación. Ello demuestra cuán robusta y confiable es la base de datos.

Se realizó una evaluación de las capacidades tipo hindcast utilizando diversas mediciones, incluyendo:

- Mediciones estadísticas: Se consideraron valores estadísticos tales como sesgo general, diferencias en el cálculo del error medio de raíz cuadrada (RMSE), índice de dispersión (SI), índice de dispersión sin sesgo (SIB) y la correlación entre las mediciones y los datos del hindcast.
- Ploteos de las series temporales: Se realizó una inspección visual de los ploteos de las series temporales.
- Ploteos C-C: Se elaboraron y revisaron los ploteos de las correspondientes alturas de olas, tanto en los conjuntos de mediciones como en el modelo hindcast, en valores equivalentes de probabilidad acumulada.

El modelo fue aplicado a una distancia de 90 Km de Michilla, punto más próximo del punto de extracción, con datos de condición de ola, denominado CHORALILLO, ubicado en latitud 23°20'24" y longitud 70°35'24". En la figura N° 4.3.2 se observan grillas para modelar la transformación de olas.

Figura N° 4.3.2: Grillas para modelar la transformación de olas y punto número 1



4.4 ANÁLISIS DE DATOS Y DEFINICIÓN DE EQUIPO WILEFKO

El cálculo de potencia se realizó procesando datos en nuestra matriz de cálculo bajo los siguientes supuestos:

- Dimensión paleta: 2x3 m (alto, ancho)
- Separación entre trenes: 2,5 m
- Cantidad de trenes por Km: 182 x 6 por tren
- Velocidad media propagación: 4 m/s
- Pérdida por impacto paleta: 25%

Figura N° 4.4.1: Rosa de altura del Punto N1

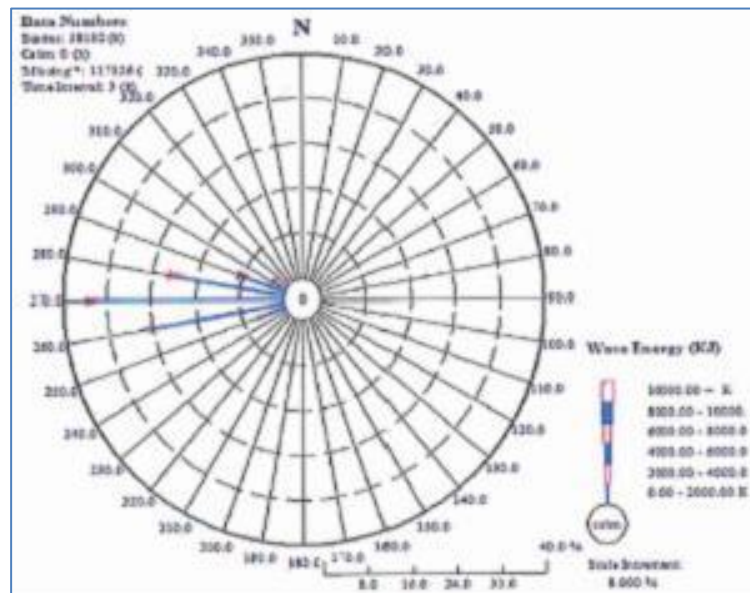


Figura N° 4.4.2: Rosa de energía de olas de N1

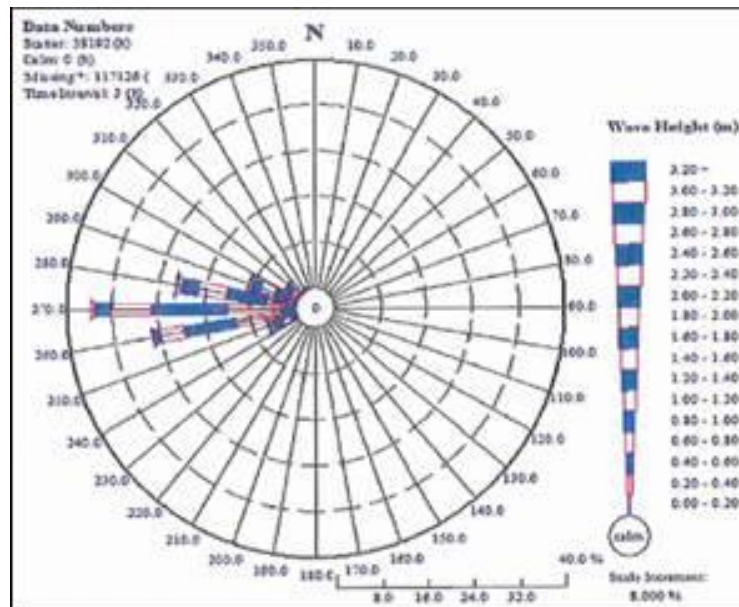
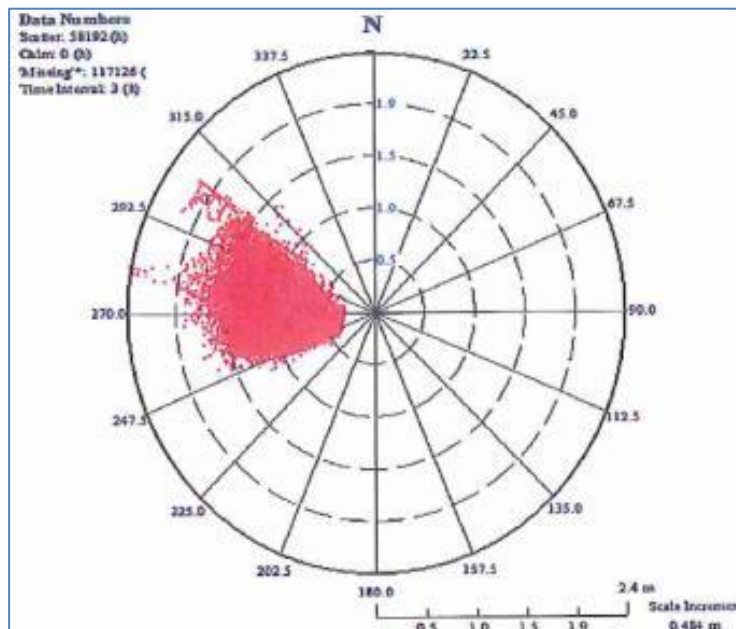


Figura N° 4.4.3: Rosa de puntos de olas (H_{mo}) del Punto N1



Los resultados de las rosas, según las Figuras N°4.4.1, 4.4.2 y 4.4.3 indican que el oleaje en aguas someras es predominante de W, con periodos mayoritariamente entre los 10 s y 18 s. En relación con las olas significativas (H_{mo}) del oleaje operacional, se observa que el 33% del tiempo la altura de las olas es por encima de 1m.

El ángulo de la rosa de la dirección de propagación de olas (Figura N°4.4.3) indica la dirección de propagación del oleaje. La distribución de direcciones es calculada considerando los valores horarios para el año 2010 completo. Como se puede observar el mayor porcentaje de ola proviene de SW (sureste), con velocidades de 0.6 m/s en el centro del gráfico hasta 2.0 m/s en el perímetro del gráfico. De este modo podemos determinar la orientación que será instalado el dispositivo para obtener una mayor potencia.

El modelo empleado y presentado para la simulación del recurso undimotriz (oleaje) es el WW3 (Wave Watch III), el cuál fue aplicado con una resolución espacial de 1 kilómetro y proporciona datos de la altura significativa de oleaje, el periodo, la dirección y la potencia. Se seleccionaron dos puntos frente a la costa del sector de interés que fueron señalados anteriormente.

El siguiente análisis hace referencia a una estimación de la potencia según la información existente. Cabe destacar que para tener un valor real, es necesario medir con el equipo Undimensor Wilefko, ya que la morfología, granulometría, vientos, corrientes, pendiente del fondo marino, salinidad y otros, son variables que modifican la condición de ola.

Según los datos del cuadro de potencia estimada, podemos concluir que para la localidad sugerida se dispone un potencial medio de 11.8KW/metro lineal, más cercano a la costa, si se proyecta la potencia teórica a un kilómetro, la costa tendría aproximadamente 11.8 MW

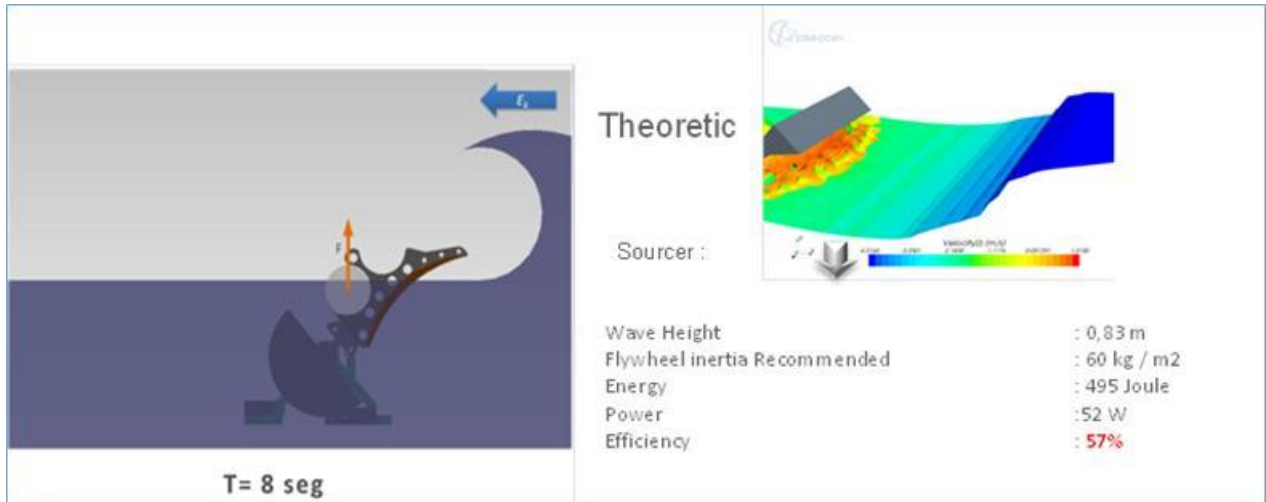
Finalmente el modelo registró una potencia de 15,43 MW y 13,01 MW respectivamente alcanzando una variación de 15,68%, según Tabla N° 5, lo importante es destacar que se puede observar la estacionalidad en los diferentes meses del año, dónde podemos planificar la potencia disponible referente a la altura de ola de la bahía.

Tabla N°5 Relación de altura significativa y la potencia por metro lineal.

| Mes | Altura significativa (metro) | Periodo medio (segundo) | Potencia (KW/m) | Dirección media (°) |
|-----|---------------------------------|----------------------------|--------------------|------------------------|
| Ene | 1.82 | 10.97 | 19.75 | 195.9 |
| Feb | 1.65 | 10.90 | 15.30 | 197.0 |
| Mar | 1.69 | 11.56 | 17.90 | 196.8 |
| Abr | 1.90 | 11.71 | 22.00 | 200.5 |
| May | 1.92 | 12.00 | 24.51 | 202.0 |
| Jun | 2.06 | 11.29 | 27.11 | 202.2 |
| Jul | 2.17 | 11.73 | 30.43 | 202.2 |
| Ago | 2.13 | 11.80 | 31.34 | 201.5 |
| Sep | 1.91 | 10.28 | 19.68 | 203.7 |
| Oct | 2.09 | 11.37 | 26.86 | 202.5 |
| Nov | 1.77 | 10.56 | 17.03 | 202.8 |
| Dic | 1.57 | 0.96 | 13.14 | 206.1 |

Ahora con los datos obtenidos se puede visualizar la frecuencia de la ola y se modela la energía, para una altura de olas media, en este caso 2 mts, además muy importante podemos obtener un factor de servicio o eficiencia de la planta, tal como lo muestra la Figura N° 4.4.4

Figura N°4.4.4: Base teórica de cálculo del periodo y altura de ola.



En la Tabla N° 6 se presenta la estadística descriptiva de las olas operacionales registradas en el sector de caleta Michilla, segunda Región. La dirección de las olas está referida al norte magnético, no ha sido corregida al norte verdadero.

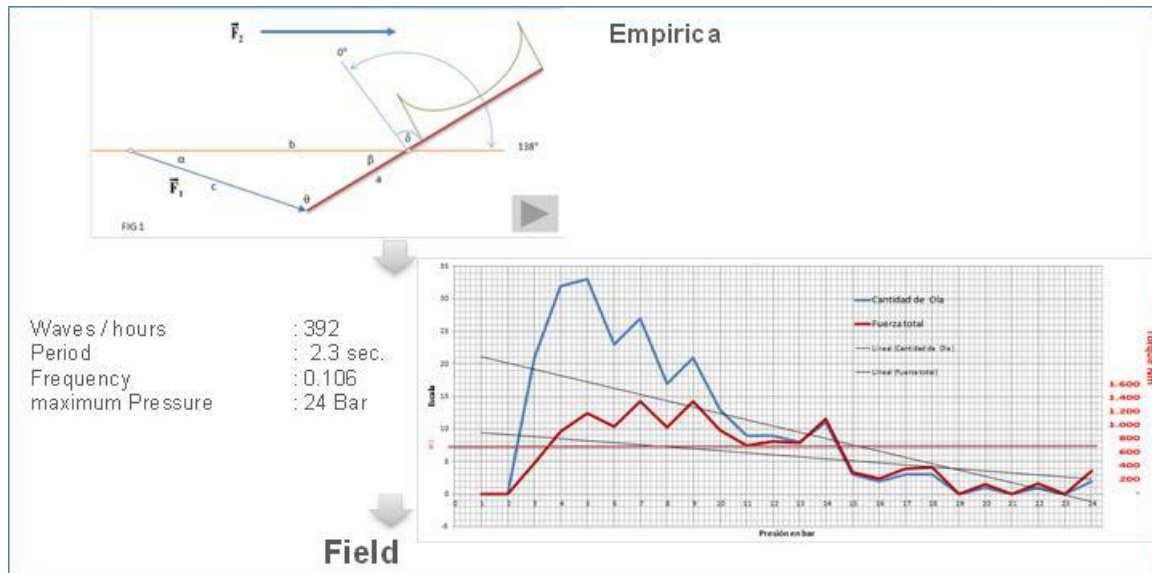
Tabla N°6 Estadística descriptiva de las olas operacionales

| | Hs | Ts | dirección |
|----------------------------|-------------|--------------|---------------|
| | (metro) | (segundo) | (°) |
| Media | 0.83 | 10.65 | 282.12 |
| Error típico | 0.01 | 0.07 | 0.91 |
| Mediana | 0,83 | 10.50 | 287.00 |
| moda | 0.64 | 9.64 | 291.15 |
| Desviación estándar | 0.15 | 1.20 | 15.63 |
| Varianza | 0.02 | 1.43 | 244.36 |
| Rango | 0.81 | 5.96 | 74.21 |
| Mínimo | 0.53 | 8.59 | 235.41 |
| Máximo | 1.34 | 14.55 | 309.62 |

Estos resultados indican que la altura de ola significativa promedio fue de 0,83 mt y el periodo significativo promedio fue de 10,65 segundos.

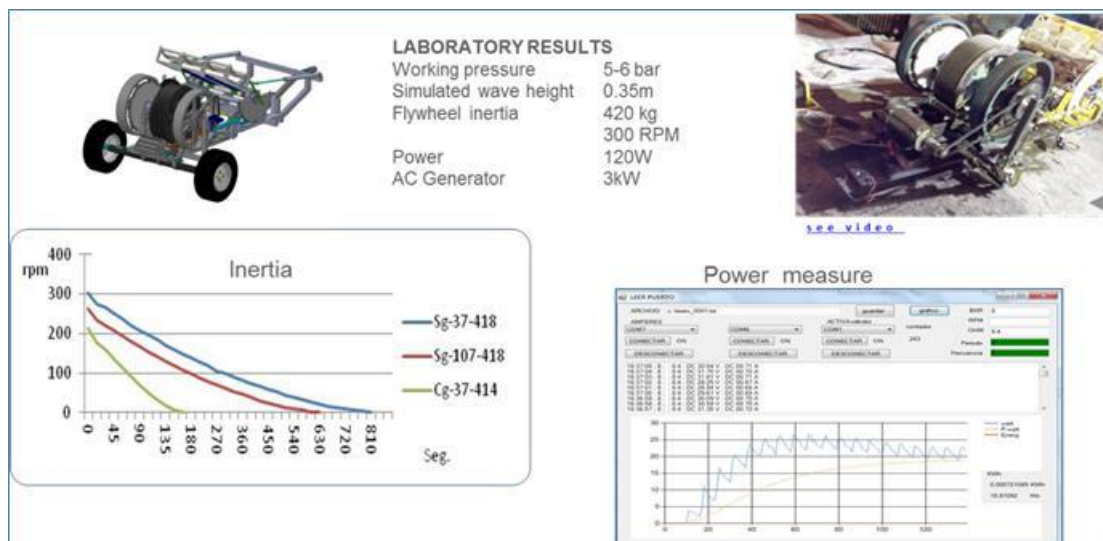
Con estos datos es posible poder calibrar nuestro equipo, con el ángulo y presión de trabajo más eficiente tal como lo muestra la Figura N°4.4.5.

Figura N°4.4.5: Cálculo del ángulo y presión de trabajo



Finalmente con los datos obtenidos y pruebas en laboratorio se procede a calibrar el equipo rotatorio en la curva óptima de funcionamiento, a razón que la inercia de trabajo y la potencia alcanzada estén en concordancia, tal como lo muestra la Figura 4.4.6.

Figura 4.4.6: Pruebas de calibración de equipo rotatorio



4.5 EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA INVERSIÓN

Se realiza evaluación económica de la inversión, considerando un capex de 10 MUSD, una tasa de interés exigida del proyecto de 10%, un costo anual de mantenimiento de 800KUSD, precio de la energía de 90 US\$/MWh y un subsidio de Corfo de un 30% del capital de inversión (3MUSD). Todo esto se realiza con un cuadro comparativo de la situación actual versus la instalación de la planta Wilefko, además se consideran dos periodos de ejercicio para el retorno de la inversión de 10 y 15 años. Obteniendo una TIR de 11,35% y 17,17% respectivamente, esto lo clasifica como un **proyecto viable económicamente**, tal como lo indica la figura 4.5.1.

Figura N° 4.5.1: Evaluación económica del proyecto

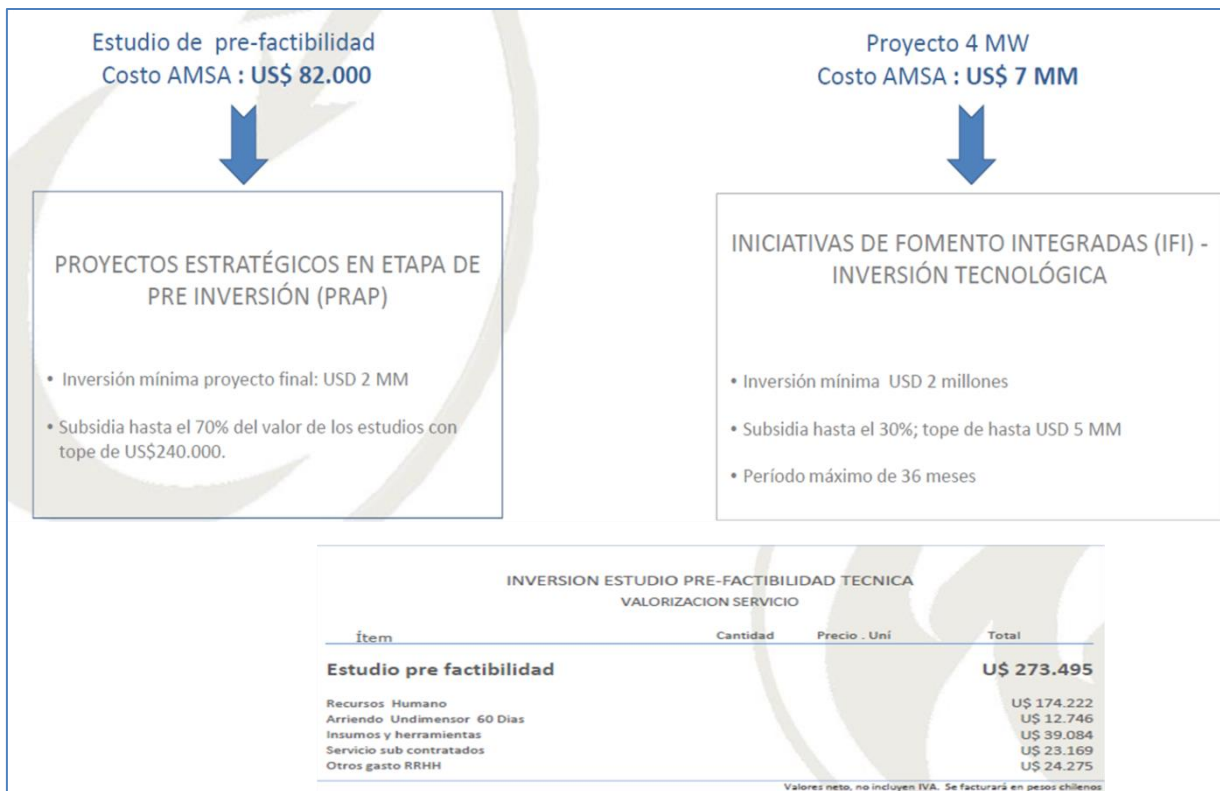
| Centinela : Situación Actual | | Proyecto Sustitución | |
|------------------------------|----------------------------|-------------------------------|--------------------|
| Consumo Energético | 9,7 kWh/m ³ | Energía en el año | 24.192.000 kWh/año |
| Capacidad Bombeo | 60.000 m ³ /día | Potencia | 4 MW |
| Potencia Instalada | 28 MW | Factor de Planta | 70% |
| Precio Energía | 90 US\$/MWh (estimado) | Costo Inversión MW construido | 2.500.000 USD/MW |
| Costo total | 18.856.800 US\$/ anual | costo mantención anual | 8% 15% |
| Al año | | Inversión | 10.000.000 US\$ |
| Energía en el año sustituida | 24.192.000 kWh/año | Subsidio Corfo hasta 30% | -3.000.000 US\$ |
| Costo al año | 2.177.280 US\$ | Costo Mantenimiento Anual | 800.000 US\$ |
| | | Tasa exigida proyecto | 10% |

| Periodos (años) | | 10 | 15 |
|--------------------------|-------------|--------|--------|
| Ahorro con Proyecto | VAN US\$ MM | 11,78 | 14,96 |
| Costo Proyecto | VAN US\$ MM | 10,53 | 11,70 |
| TIR | | 11,35% | 17,17% |
| PRI | | 5 | 5 |
| Relación Beneficio/costo | | 1,12 | 1,28 |

4.6 PROPUESTA DE FINANCIAMIENTO

Existen dos propuestas de financiamiento que se presentan en el informe, la primera a través de una etapa preinversional con estudios de factibilidad, análisis en terreno e Ingeniería básica y de detalles y el segundo plan es el financiamiento total del proyecto, ambos tienen iniciativas de subsidios Corfo por inversión tecnológica, pero niveles de riesgo distintos, estrategias de permisología distintas y plan de trabajo distinto. Para el caso AMSA el primer plan de financiamiento se adecua más a sus políticas de inversión y su control de proyectos, por lo tanto se recomienda presentar el primer caso, Figura N° 4.6.1.

Figura N° 4.6.1: Propuestas de financiamiento del proyecto



5 DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La principal actividad industrial en el norte de Chile es la minería, que ha sido fuente del crecimiento en poblaciones urbanas del sector, aumentando la demanda de servicios básicos y el costo de vida. El PIB per cápita en la capital minera de Antofagasta triplica cómodamente el promedio nacional. La minería, también, ha profundizado los problemas de disponibilidad de agua en el área, por lo que las plantas de desalinización son cada vez más comunes, las cuales necesitan electricidad para su funcionamiento. El Norte Grande depende, predominantemente, del gas (47%) y el carbón (45%) para la generación de electricidad. Hoy en día se está diversificando la generación con proyectos de ERNC como por ejemplo, una pequeña planta eólica en las afueras de la ciudad de Calama y un cierto número de proyectos solares aprobados que se encuentran en proceso de instalación, por lo tanto, queda muy claro que la ERNC es una necesidad imperiosa en la zona que se debe desarrollar.

Las olas son un recurso energético inagotable y de costo nulo. Se estima que Chile tiene un potencial teórico bruto es de 240 GW según un estudio realizado por Baird & Associates S.A., y la actividad del oleaje es lo suficientemente intensa como para producir energía en toda la costa del Pacífico. Se podría decir que Chile es el mejor lugar del mundo para la generación de energía undimotriz, con más de 4.000 km de costa expuesta a constantes oleajes de alta energía. Esto nos muestra que sea interesante comenzar a estudiar la factibilidad de producir energía eléctrica a partir de las olas del mar, con el fin, de aportar a la diversificación del mix de generación y desincentivar el uso de combustibles fósiles para tal propósito en el país.

En el Norte Grande los niveles de energía undimotriz son menores que en el resto del país, sin embargo, son lo suficientemente altos para la generación de esta, desde los 20 kW/m hasta 25 kW/h. Además cuenta con una línea costera de aproximadamente 1.242 km con pocas bahías o ensenadas importantes. En alta mar, el lecho marino cae abruptamente, con una franja relativamente estrecha donde la profundidad no supera los 100 m, lo que las hace adecuadas para el anclaje de dispositivos de energía undimotriz. Sin embargo, el área total de dicha zona se aproxima a los 5.000 km². Por otro lado, no existen recursos mareomotrices significativos instalados, por lo que no hay experiencia, ni información al respecto.

En la actualidad, la Universidad de Tarapacá (Arica e Iquique) participa activamente en la investigación de la acuicultura y la pesca, y ha comenzado a trabajar en proyectos de energía renovable. Aunque se centra en la energía solar, el Centro de Estudios de Recursos Energéticos de la Universidad Arturo Prat de Iquique pretende incorporar la energía marina dentro de su espectro de futuras actividades. La Universidad de Antofagasta cuenta con un Centro de Desarrollo Energético que tiene por objetivo estudiar el potencial de la energía undimotriz del Norte Grande. Todas estas iniciativas tienen el potencial de sustentar el desarrollo de proyectos de energía marina en la región, y ya presentan efectos positivos de rentabilidad en proyectos solares y eólicos que actualmente se encuentran en funcionamiento.

Es muy importante que hoy en día existan planes que permitan que parte de la recaudación de impuestos obtenida de la minería se invierta en la región, ya que en este momento, más del 85% de la recaudación de impuestos en el Norte Grande se

invierte en las regiones del centro y sur del país, para por ejemplo financiar este tipo de desarrollo de tecnologías.

La red eléctrica del Norte Grande (Sistema Interconectado Norte Grande, SING) no está conectada con el resto de Chile. El Norte Grande presenta un gran número de plantas de energía térmica ubicadas en la costa que abastecen proyectos mineros en el interior, por lo tanto, existen muchas conexiones directas entre los generadores grandes en la costa y los clientes en la zona interna, mientras que las conexiones entre las distintas comunidades son menos robustas. El gran número de subestaciones eléctricas cerca de la costa puede facilitar la conexión de los proyectos de energía marina, quedando en evidencia el alto potencial que tiene la energía undimotriz para suministrar energía a la red eléctrica en el Norte Grande.

Cabe señalar también, que no existen recursos mareomotrices significativos en esta región, sin embargo, el recurso undimotriz total supera con creces a la demanda de electricidad actual en la zona.

Se están realizando grandes inversiones en plantas de desalinización, estaciones de bombeo de agua con sus tuberías que pueden transportar agua marina desalinizada o sin procesar por más de 100 km hacia el interior a más de 2.000 m de altura, como también plantas de energía relacionadas para satisfacer las demandas de la industria minera, cuyo crecimiento continuará por mucho tiempo. Ciertos dispositivos de energía undimotriz hidráulicos pueden emplearse directamente para el bombeo de agua. Dada la gran y creciente demanda de la industria minera para satisfacer sus necesidades de energía, también como de agua marina desalinizada y sin tratar, se hace evidente que el mercado potencial para los proyectos de energía marina es bastante amplio.

Las plantas de desalinización que obtienen energía a partir de la energía undimotriz podrían abastecer con agua dulce o desalinizada a la industria minera según la disponibilidad de abastecimiento de agua dulce en la región de Chile. Ya se han puesto en marcha planes en Australia Occidental para desarrollar la primera planta de desalinización en el mundo a partir de energía undimotriz con cero emisiones de dióxido de carbono, mediante la tecnología de energía undimotriz hidráulica CETO de Carnegie Wave Energy. La planta no solo desalinizaría el agua marina, sino que también, produciría electricidad que podría utilizarse para bombear agua a lo largo de grandes distancias.

En el corto plazo, la demanda de agua y energía podría impulsar el desarrollo (posiblemente combinado) de pequeñas plantas de energía undimotriz y desalinización para comunidades aisladas. Este es un nicho de mercado dentro de la energía marina donde Chile podría convertirse en un actor principal y desarrollar un mercado extenso tanto nacional como internacional. En el mediano y largo plazo, se espera que la demanda de electricidad aumente debido al constante crecimiento de la actividad minera. El alto costo de la energía y el agua, en conjunto con beneficios impositivos y un entorno de operación más favorable, podrían anticipar la viabilidad de proyectos de energía undimotriz en el Norte Grande, en relación a las regiones del sur.

Es por todo lo expuesto en los capítulos anteriores veo necesario y totalmente factible generar un proyecto para abastecer el consumo interno de Puerto de Minera Centinela

y así disminuir los costos operacionales a modo de ser pionero de esta tecnología en la región para luego ampliar su uso a lo anterior mencionado. Además AMSA tiene compromiso social con la comuna de Michilla de abastecer con energía y este proyecto tiene el objetivo de mantener ese compromiso, es por esto la importancia para la comunidad vecina y para centinela, la instalación de un sistema que pueda suministrar 2MW continuos, por medio de energía de las olas undimotriz, se elige al proveedor Wilefko por su disponibilidad, calidad, factibilidad técnica y conveniente precio; se debe elegir un generador tipo turbina y realizar la interconexión eléctrica con sistema interior existente en el puerto y para la posterior conexión al sistema Interconectado del Norte Grande SING.

Considerando en el estudio de factibilidad para generar energía eléctrica, a partir de energía renovable y cubriendo el Marco Regulatorio (Medio ambiental, AAMM, DOP, IMBSC, propiedad legal), Económico (VAN, TIR, FC, aporte al negocio C1 compañía), de Negocio (Riesgos estratégicos, redes, comunidades, autoridades, bono Social y de carbono, etc.), Técnico (Control de la Corrosión, cubrir la demanda, mantenimiento, capacitación, operación), Marco Social (brindar de energía eléctrica a la comunidad de Michilla) y lograr el Financiamiento utilizando los beneficios tributarios, desarrollo, Innovación y tecnológico que posee el Ministerio de Energía para este de proyectos.

Es fundamental para el progreso de la industria de energía marina que todas las medidas normativas sean desarrolladas en forma paralela; es improbable que un conjunto de medidas normativas parciales o descoordinadas entreguen el impulso político e industrial necesario para avanzar en el desarrollo de una industria de energía marina exitosa.

A modo de ejemplo, un sistema bien estructurado de autorizaciones y licencias, no asegura el desarrollo de la industria de energía marina al no existir acceso directo a la infraestructura de la red eléctrica. Asimismo, el acceso a la red eléctrica y un adecuado sistema de autorizaciones, no es suficiente para asegurar el éxito de una estrategia de desarrollo, si no existe el apoyo financiero para proyectos pre comercial.

En tanto, es necesario que el Ministerio de Energía defina en su estrategia una serie de actividades cuya ejecución es responsabilidad de dicha cartera. Estas pueden incluir la identificación de barreras para el desarrollo de la energía marina y el establecimiento de grupos de trabajo con otros ministerios para enfrentar estas mismas barreras (por ejemplo, concesiones marítimas con el Ministerio de Defensa y el Ministerio de Bienes Nacionales), pero los cambios necesarios deben ser implementados por el ministerio responsable. Asimismo, se desprenden beneficios de la energía marina en términos de creación de empleos e inversiones que son centrales para la energía marina, pero que en el papel aparentan ser de mayor interés para el Ministerio de Economía que para su símil de Energía.

Una lección que conviene extraer de la experiencia europea, es que la investigación debe estar alineada con las necesidades de la industria. Mediante la colaboración entre el mundo académico y el sector privado, es posible identificar aquellas necesidades de investigación que ofrecen el mayor potencial de desarrollo. Es importante que todo proceso de priorización de la investigación tome en cuenta la experiencia práctica, además de los estudios publicados.

5.1 RESULTADOS ESPERADOS

- Reducir la exposición a la volatilidad de precios de los mercados energéticos externos para el área muelle de Minera Centinela, según Figura N° 5.1.
- Generar energía en forma limpia, segura y sustentable
- Evitar emisiones y gases de efecto invernadero ENRC.
- Independencia energética de la red interconectada SING (Aumentado la disponibilidad del sistema de suministro de este insumo)
- Apoyo social a la localidad vecina de Michilla, entregando energía eléctrica domiciliaria.
- Reducir el costo operacional del área muelle en Minera Centinela, por concepto de consumo de energía en un 7,3 %.
- Cubrir el foco estratégico del grupo AMSA alineado con el ministerio de energía del gobierno de Chile para reducir la huella de carbono.
- Lograr el financiamiento de la primera etapa del proyecto en su fase experimental, modelamiento en terreno e ingeniería base.
- Lograr el financiamiento de la segunda etapa del proyecto con su ingeniería de detalles, la ejecución en terreno y su puesta en marcha.

Figura N° 5.1: Árbol de decisiones Implementación

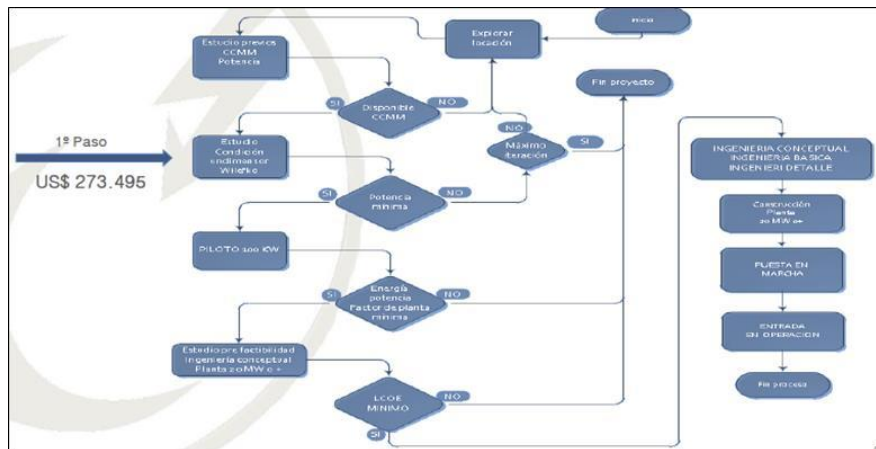
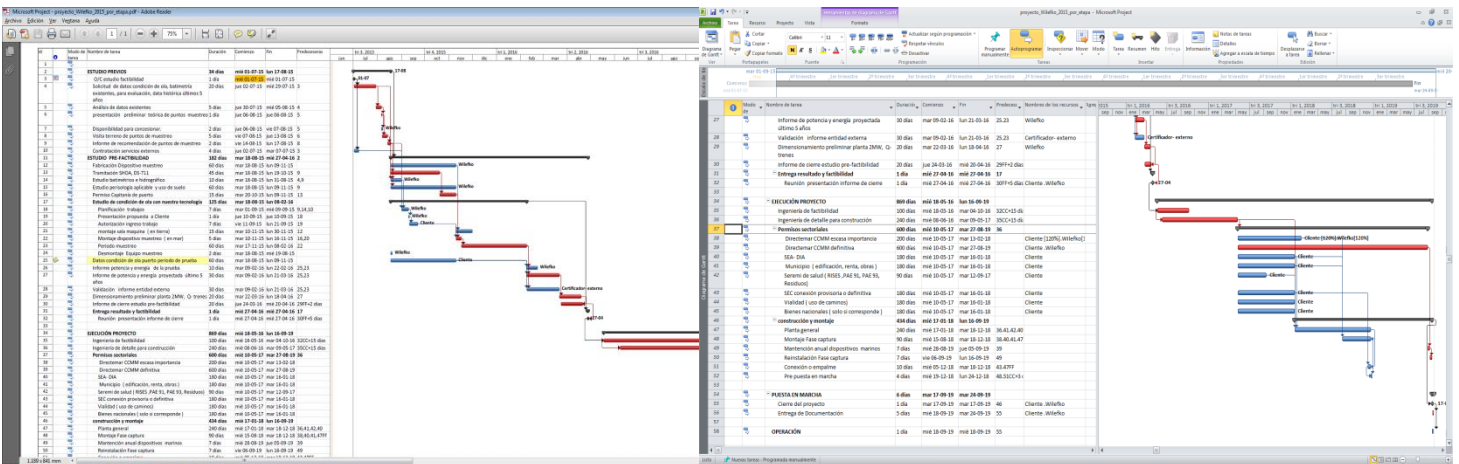


Figura N° 5.1.1: Programa implementación proyecto



5.2 DIFICULTADES PREVISIBLES Y ESTRATEGIAS DE SOLUCIÓN

Las principales Barreras de entrada que podemos observar para el proyecto son las siguientes:

- 1.- Barreras Gubernamentales, permisos e Impacto Ambiental, Bienes Nacionales, Ministerio de Defensa, AAMM, Municipalidad de Mejillones.
- 2.- Fuente de financiamiento para el estudio previo a la factibilidad
- 3.- Conseguir un proveedor confiable y que otorgue una alternativa factible y conveniente.
- 4.- Lograr vencer los Paradigmas del sector, que se niegan a generar el cambio.
- 5.- Lograr un contrato de compra y conexión al SING de la energía de la planta Undimotriz.

Para lograr vencer las barreras hasta ahora previstas, se diseñan las siguientes estrategias de Mitigación:

- 1.- Trabajar con la gerencia de asuntos externos y sustentabilidad del área permisos AMSA.
- 2.- Trabajar con la AAMM (DIRECTEMAR, DIRSORMAR, Capitanía puerto Mejillones y Gobernación Marítima Antofagasta.)
- 3.- Reuniones con empresas proveedoras nacionales y extranjeras proveedoras de energía renovables Undimotroz.
- 4.- Poder diseñar un modelo apropiado y poder satisfacer a la demanda energética actualmente existente.

6 BIBLIOGRAFIA

- [1.] ACUÑA, H. Evaluación del Potencial de la Energía del Oleaje en Chile. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil, 2008.
- [2.] Aporte potencial de Energías Renovables No Convencionales y Eficiencia Energética a la Matriz Eléctrica, 2008 – 2025, Trabajo en conjunto entre la Universidad de Chile y la Universidad Técnica Federico Santa María, junio 2008.
- [3.] Atria Baird Consultores S.A. 2001. Project SHOA Olas Chile, Report on the Results of Hindcasting and Submittal of Database. Technical report submitted to the Hydrographic and Oceanographic Department of the Chilean Navy, Santiago.
- [4.] BOUD 2006. Cost Estimation Methodology. The Marine Energy Challenge approach to estimating the cost of energy produced by marine energy systems. Documento elaborado para The Carbon Trust por ENTEC, UK.
- [5.] Fernández Díez, Pedro. DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ENERGÉTICA, UNIVERSIDAD DE CANTABRIA, Energía de las olas.
- [6.] Rojas, J. EVALUACIÓN TÉCNICO ECONÓMICA DE UNA CENTRAL UNDIMOTRIZ EN CHILE. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Industrial, 2009.
- [7.] Ley General de Servicios Eléctricos, DFL 1/1982.
- [8.] MSc. MONÁRDEZ, PATRICIO. ACUÑA, HUGO. PhD. SCOTT, DOUG. DRAFT: Evaluation of the Potential of Wave Energy in Chile, 2008.
- [9.] Baird & Associates, que poseen datos del recurso undimotriz detallado de toda la costa chilena
- [10.] Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. ENERGÍAS RENOVABLES Y GENERACIÓN ELÉCTRICA EN CHILE, Diciembre 2007, Santiago de Chile.

SITIOS WEB

- [11.] AQUA ENERGY GROUP Ltd., www.energygroup.com
- [12.] ENERGETECH, www.energetech.com.au
- [13.] MARINE CURRENTS TURBINE, www.marineturbines.com
- [14.] OCEAN POWER DELIVERY Ltd., www.oceanpd.com
- [15.] PELAMIS WAVE POWER, www.pelamiswave.com
- [16.] www.cdec-sing.cl
- [17.] www.cne.cl
- [18.] www.consejominero.cl
- [19.] www.codexverde.cl
- [20.] www.wilefko.com
- [21.] <http://web.directemar.cl/estadisticas/maritimo/default.html>
- [22.] http://www.ine.cl/canales/menu/publicaciones/compendio_estadistico/pdf/2012/estadisticas_demograficas_2012.pdf
- [23.] <http://www.sernageomin.cl/sminera-atlas.php>

7 ANEXOS

7.1 ANEXO.A: DISPOSITIVOS CONVERTIDORES DE LA ENERGÍA DEL OLEAJE

Los convertidores de la energía del oleaje son dispositivos que transforman la energía mecánica de las olas en energía útil, que deben ser capaces de resistir las condiciones extremas del mar y de funcionar eficientemente para las amplias gamas de frecuencia y amplitud de las olas. Existen varios tipos de dispositivos patentados, de los cuales Pelamis presenta grandes ventajas sobre las demás [7].

En el mundo se han patentado alrededor de 1000 dispositivos que convierten la energía de las olas (Saenz, 2006) en energía útil, donde cada uno de ellos aprovecha de una determinada manera las formas en que la energía se presenta en las olas.

Existen dispositivos que aprovechan de mejor manera la energía potencial asociada a la elevación instantánea de la superficie del mar, mientras que otros aprovechan la energía cinética asociada a la velocidad orbital de las partículas del fluido.

También existen unidades de amplio espectro, cuya tasa de captura no se ve influenciada mayormente por el período de las olas, mientras que hay otros diseñados para operar eficientemente dentro de un rango específico de períodos o sintonizados que aprovechan el fenómeno de resonancia de un oscilador.

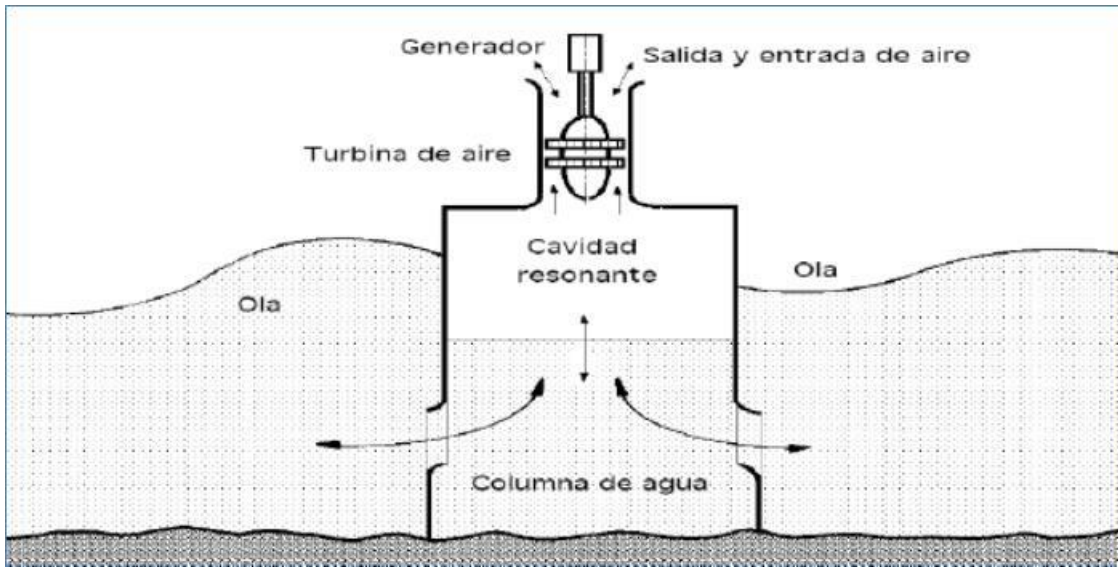
Además existen dispositivos que aprovechan sólo la energía del frente de ola incidente, mientras que hay otros que capturan energía de un frente de ola de ancho mayor que el ancho del dispositivo. Dicho fenómeno se denomina Efecto Antena (Fernández [s.a.]). Se han definido algunos principios básicos que permiten agrupar a los convertidores de la energía del oleaje, entre ellos su operación, su orientación respecto al oleaje incidente y su ubicación relativa a la costa (Carter, 2005)

7.1.1 Clasificación según su operación

Los principios de operación de un dispositivo capaz de convertir la energía de las olas se pueden resumir en tres grandes grupos: columna oscilante de agua, sobrepaso y mecanismo.

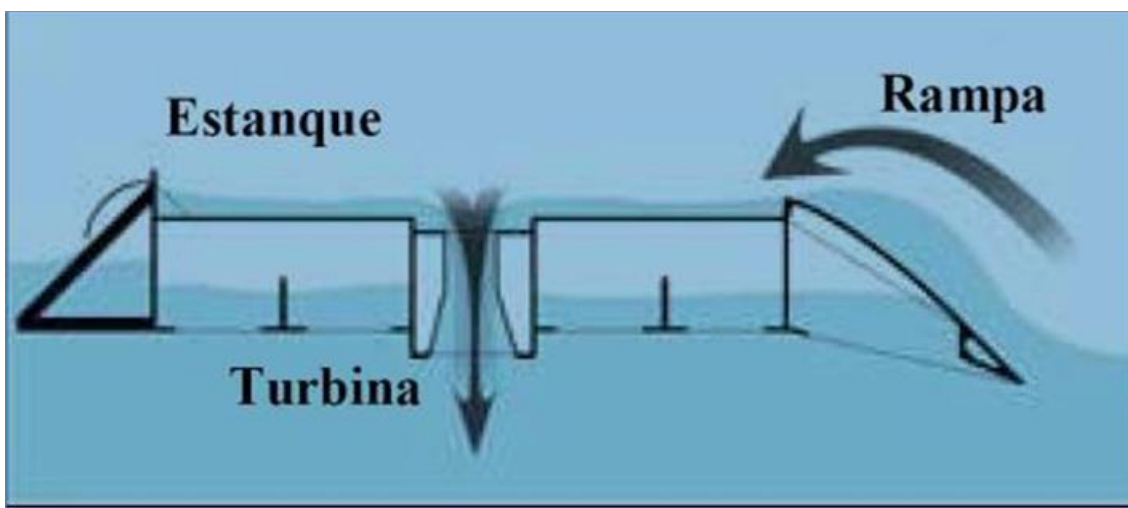
a) *Dispositivos de Columna Oscilante de Agua:* Consisten en cámaras que aprovechan el movimiento vertical de las olas para inducir la oscilación de una columna de agua, que expande y comprime el aire al interior de la cámara, impulsando una turbina de aire (Figura N°A.1). El diseño geométrico de la cámara es importante para lograr una sintonización entre su período natural y el período del oleaje, para que la columna entre en resonancia. El éxito de este principio radica en el desarrollo de la turbina Wells, que aprovecha el flujo bidireccional de aire rotando siempre en el mismo sentido.

Figura N° A.1. Columna Oscilante de Agua^[13]



b) Dispositivos de Sobrepaso: Este tipo de dispositivo consiste en un estanque de acumulación de agua, que posee rampas o canales que son sobrepasados por las olas (Figura N°A.2). El agua acumulada, que se encuentra por sobre el nivel del mar, es aprovechada por una turbina hidráulica convencional de baja carga. La ventaja de estos sistemas es que ya han sido utilizados durante mucho tiempo en centrales hidráulicas convencionales. La innovación está en la captura del oleaje, lo que ha impulsado el diseño de rampas más eficientes.

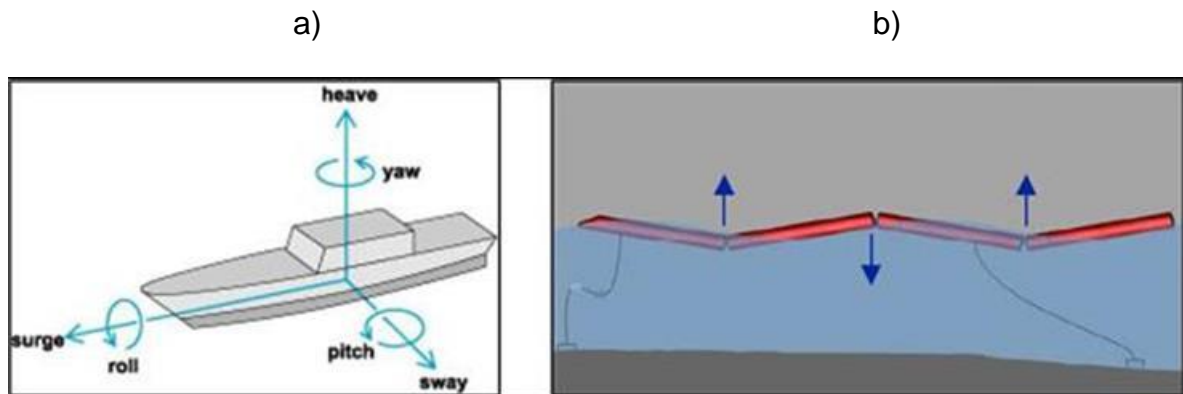
Figura N°A.2. Dispositivo de Sobrepaso, (Fuente: Wave Dragon 2007)



c) *Sistemas Activos (Mecanismos Oscilantes)*: Un sistema activo es un conjunto de estructuras fijas y móviles, cuyo movimiento relativo impulsado por el oleaje es aprovechado para la generación de electricidad. El movimiento de las estructuras

flotantes de un dispositivo se sustenta en las fuerzas hidrostáticas restitutivas asociadas a los grados de libertad verticales del cuerpo flotante (heave, pitch, roll), mientras que los grados de libertad horizontales (surge, sway, yaw) generalmente son de baja importancia para el aprovechamiento de la energía. Varios de estos dispositivos utilizan sistemas oleohidráulicos para transferir el movimiento a los generadores. Los grados de libertad de un cuerpo flotante se muestran en la Figura 23a, mientras que la Figura 6b esquematiza un sistema activo.

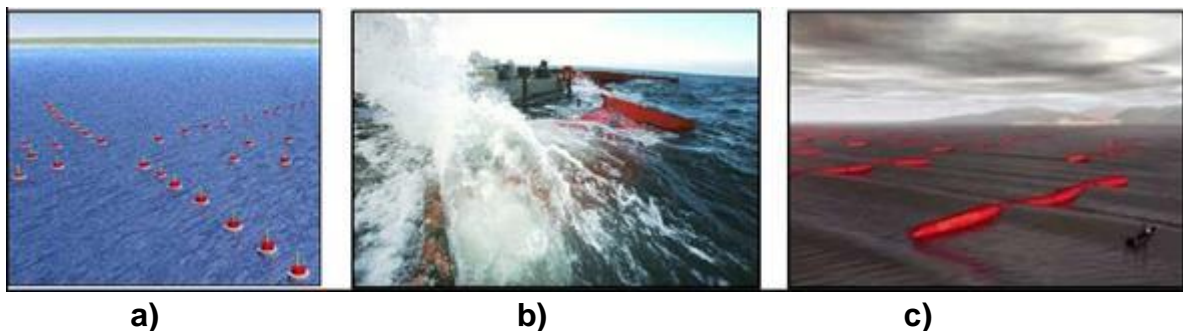
Figura N°A.3 a) Grados de libertad de un cuerpo flotante (fuente Sci-tech 20059, b) Esquema de un sistema activo (fuente OPD 2007).



7.1.2 Clasificación según su orientación

La orientación de un dispositivo respecto de la dirección del oleaje incidente se resume en tres clases: absorbedores puntuales, atenuadores y terminadores (Figura 24).

Figura N°A.4 a) Parque de absorbedores puntuales, (Fuente Finavera 2007) b) Dispositivo terminador (fuente Wave Dragon 2007) y c) Parque de atenuadores (fuente OPD 2007).



a) *Absorbedores Puntuales*: Corresponden a aquellos dispositivos cuyas dimensiones son pequeñas relativas a la longitud de onda incidente. La ventaja de ellos es que

pueden aprovechar de igual manera el oleaje proveniente de todas las direcciones. Estos dispositivos capturan energía de un frente de ola de ancho mayor que el ancho del dispositivo (efecto antena).

b) Terminadores: Corresponden a aquellos dispositivos cuyo eje principal se alinea en forma perpendicular a la dirección de propagación del oleaje. En esencia “termina” la acción de la ola. Un terminador eficiente debe ser capaz de reducir la reflexión y transmisión del oleaje.

c) Atenuadores: Dispositivos cuyo eje principal se alinea en forma paralela a la dirección de propagación del oleaje. En esencia “atenúa” la acción de la ola, reduciendo su amplitud.

De la misma manera que los absorbedores puntuales, estos dispositivos capturan energía de un frente de ola de ancho mayor que el ancho del dispositivo. Tanto el largo de un atenuador como el de un terminador puede ser igual o mayor a una longitud de ola y en ambos casos la eficiencia de captura es dependiente de la dispersión direccional del oleaje. Dada su orientación respecto a las olas, los esfuerzos que se producen en un atenuador son más reducidos que en el caso de un terminador.

7.1.3 Clasificación según su ubicación relativa a la costa

La primera generación de convertidores de energía del oleaje fue desarrollada en sitios sobre la costa (onshore). Posteriormente se desarrolló una segunda generación de dispositivos ubicados en zonas cercanas a la costa (nearshore), cuyas estructuras pueden ser fijas al fondo marino o flotantes. Utilizando los conceptos de ambos desarrollos, surgió una tercera generación de dispositivos localizados en sitios de mayor profundidad (offshore). La Figura N°A.5 muestra dos centrales “onshore” instaladas en el Reino Unido y Portugal respectivamente.

Figura N°A.5. a) Limpet 500,(fuente Wavegen 2007 b) Central Isla de Pico (fuente Falcão 2000)



a)



b)

7.1.4 Dispositivos Undimotrices

El presente estudio se centrará en dispositivos de costa afuera u *offshore*, motivado principalmente por la mayor disponibilidad de energía en comparación con la costa, la reducción de conflictos con otros usuarios del espacio marítimo, mayor disponibilidad de superficie para su emplazamiento y la disminución del impacto visual, todas ellas razones que facilitan el aprovechamiento a gran escala de la energía de las olas⁸⁹.

Según un estudio realizado por Previsic (2004a) de la agencia estadounidense *EPRI* (*Electric Power Research Institute*), existe un grupo de dispositivos *offshore* cuya fase de investigación y desarrollo está cercana a su conclusión, luego de años de investigación y la instalación de plantas piloto a escala real. En este estudio se clasifica un conjunto de dispositivos en tres grupos según su grado de desarrollo:

Grupo 1: Desarrollo próximo a su conclusión y unidades a escala real probadas en el océano.

Grupo 2: Desarrollo próximo a su conclusión, sólo falta validar algunos aspectos relativos a su instalación, retiro y anclajes. Construcción de plantas a escala real sólo en algunos casos.

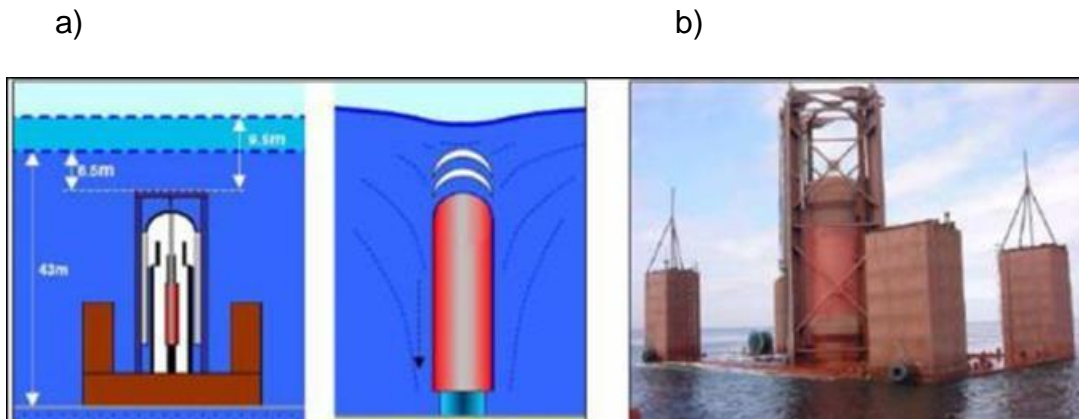
Grupo 3: Existen aspectos críticos en la investigación y el desarrollo de los dispositivos que aún no han sido resueltos. Se requieren modelos físicos y numéricos previos al desarrollo de una planta a escala real.

En base a este estudio y a la información existente, fueron seleccionados cuatro dispositivos para analizar la generación eléctrica a partir de las olas. En el estudio antes mencionado sólo un dispositivo clasificó en el primer grupo: *Pelamis*. Dicho dispositivo fue escogido en conjunto con *AWS*, *Energetech* y *Wave Dragon*, que clasifican dentro del Grupo 2. A continuación se describen estos dispositivos

7.1.4.1 Archimedes Wave Swing (AWS)

Archimedes Wave Swing (Figura 26) es un mecanismo absorbedor puntual cuya estructura se apoya en el fondo marino, completamente sumergida, con un generador lineal que convierte el movimiento oscilatorio en electricidad. La estructura móvil de este mecanismo es un flotador con aire en su interior, que constituye un sistema de resorte. Las diferencias de presión causadas por el oleaje producen la oscilación del flotador.

Figura N°A.6. a) Esquema y dimensiones AWS, b) Instalación de planta piloto AWS (Fuente AWS 2007)



7.1.4.2 Energetech

Energetech (Figura N°A.7) es un dispositivo terminador de columna oscilante de agua. Posee muros parabólicos que focalizan las olas hacia una cámara resonante, que induce la oscilación de la columna de agua en su interior. Cada unidad posee una turbina de aire *Dennys-Auld* desarrollada por *Energetech*, que alcanza mayores niveles de eficiencia que las turbinas *Wells*. Originalmente *Energetech* se enfocó en el desarrollo de unidades *onshore*, para luego elaborar una configuración de anclaje que permite instalar los dispositivos a profundidades en torno a los 50 metros.

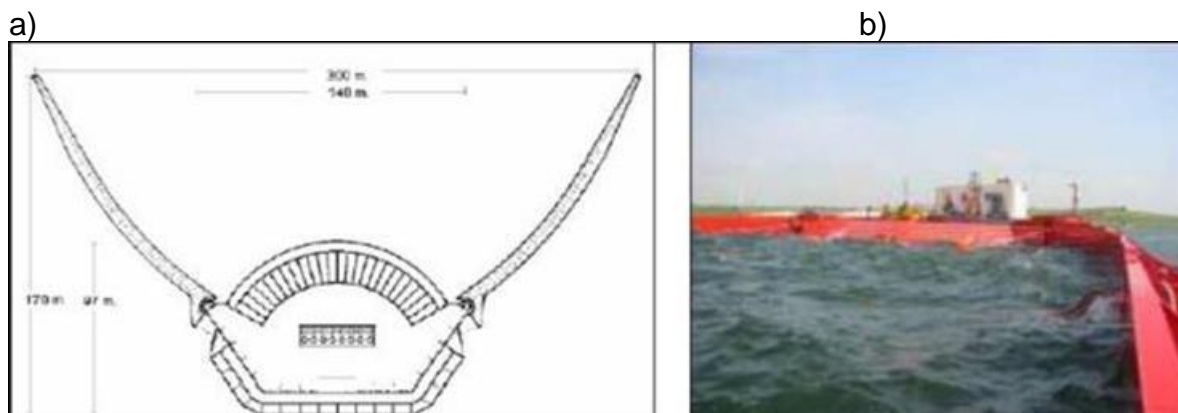
Figura N°A.7 a) Esquema y dimensiones Energetech (fuente Previsic 2004) b)Planta piloto Energetech (fuente Energetech 2007)



7.1.4.3 Wave Dragon

Wave Dragon (Figura N°A.8) es un terminador de sobrepaso, que combina una rampa de doble curvatura y dos brazos reflectores que focalizan las olas hacia un estanque de acumulación. Este dispositivo posee múltiples turbinas *Kaplan* conectadas a generadores, que transforman la carga del reservorio en energía eléctrica. La potencia nominal de este dispositivo varía entre 4 a 7 [MW] según su tamaño.

Figura 28 a) Vista en planta de Wave Dragon. b) Prototipo de Wave Dragon. (fuente wave dragon 2007)



A continuación se muestra un cuadro resumen con los aspectos más relevantes de cada dispositivo obtenidos del estudio de Previsic (2004).

Tabla A.1: Cuadro resumen de dispositivos seleccionados ^[7]

| Dispositivo | Nivel de desarrollo | Potencia nominal [MW] | Costo estimado [MMUS} |
|-------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|
| AWS | Grupo 2 | Hasta 4.0 | 4.0-6.0 |
| Energetech | Grupo 2 | 0.5 – 2.0 | 2.5-3.0 |
| Pelamis | Grupo 1 | 0.7 | 2.0-3.0 |
| Wave Dragon | Grupo 2 | 4.0-7.0 | 10.0-12.0 |

7.2 ANEXO B: EVALUACIÓN DE IMPACTO AMBIENTAL

A continuación se exponen 3 cuadros resumen sobre las principales consideraciones en las 3 etapas principales de un proyecto undimotriz con tecnología Pelamis: Construcción, Operación y Fin de Operación.

| Impactos medioambientales Durante la Construcción del Parque Undimotriz | | | |
|---|---|---|--|
| Actividad | Cambio ambiental | Potencial impacto a... | Medidas de mitigación (o de reducción de impacto) |
| Tendido cable submarino (desde el fondo hasta la costa) | Desprendimiento del cieno o limo del fondo marino | Industria pesquera: Daño al habitat de los peces | Identificar las áreas más importantes (en cuanto a biodiversidad) y evitar tender los cables por éstas |
| | | Ecología Marina: Daño a especies marinas | Evitar tender los cables por zonas sensibles |
| | | Arqueología: Daño a sitios arqueológicos | Identificar los sitios arqueológicos submarinos y tender los cables a una distancia considerable de éstos |
| Construcción de las instalaciones de la central en la costa | Cambios (temporales) visuales y acústicos | Miradores o características visuales: reducción del valor estético de la zona costera en cuestión | Restituir los sitios completamente después de la construcción. |
| | | Ruidos molestos: Posibles molestias en la población | Emplear las mejores prácticas posibles con el fin de minimizar los ruidos molestos asociados a la construcción siguiendo una adecuada guía |
| | | Población de aves: cambios en la alimentación, reproducción y habitat de las aves | Ubicar la central en zonas alejadas de poblaciones importantes de aves, y si es necesario, construir durante temporadas de éxodo. |
| Producción e instalación de estructuras de concreto | potenciales cambios a la calidad del agua y emisiones de gases en la costa debido a la producción de concreto | Ecología Marina: Contaminación del agua con efectos en la vida marina | Control de los químicos utilizados en la fabricación del concreto y seguimiento rigurosos de las normas medioambientales del uso costero |
| Instalación parque undimotriz | Obstrucción temporal a la navegación | Industria pesquera: Paralización temporal (y tal vez parcial) de la actividad pesquera | Negociación con gente relacionada con la industria pesquera para minimizar los impactos en la actividad y estudiar posibles compensaciones |
| | | Interrupción temporal de la navegación en la zona en cuestión, tanto comercial como privada. | Negociación con los usuarios de transportes acuáticos, con el fin de establecer protocolos de acuerdo que aseguren la navegación sin riesgos durante la construcción del parque. |

| Impactos medioambientales Durante la Operación del Parque Undimotriz | | | |
|--|---|---|--|
| Actividad | Cambio ambiental | Potencial impacto a... | Medidas de mitigación (o de reducción de impacto) |
| Presencia del parque undimotriz puede ocupar un kilómetro cuadrado | Cambios en el régimen hidrofísico debido a la extracción de energía de las olas cercanas a la costa | Ecología Marina: Cambios en los habitats costeros debido a los cambios hidrofísicos | Localizar el parque al menos 2Km costa afuera |
| | | | Instalar los generadores a un espacio de 150m uno del otro |
| | | "Procesos Costeros": Los convertidores pueden reducir el promedio de energía en la costa, posiblemente, erosionando y afectando el transporte natural de sedimentos | Utilizar máquinas diseñadas para absorber la menor cantidad de energía posible en grandes tormentas (es allí cuando la mayor cantidad de erosión y transporte de sedimento ocurre) |
| | Reducción del área de acceso de embarcaciones | Industria pesquera: Área de mar ocupada por parque no estará disponible para la pesca | Negociación con pescadores o representantes de la industria pesquera. Evitar localización del parque en áreas importantes de pesca |
| | | Recreación: Área de mar ocupada por parque no estará disponible para su utilización recreacional. | Negociación con clubes o usuarios de embarcaciones. Evitar localización del parque en áreas importantes recreación. |
| | | Navegación: La presencia del parque undimotriz interferirá con rutas de navegación para todo tipo de embarcaciones | Estipular de la mejor manera los límites y las rutas con los organismos pertinentes |
| | Cambios en la vista del mar | Miradores o características visuales: El valor estético de la zona costera en cuestión puede cambiar | minimizar elementos de altura sobre la superficie del mar. |
| Funcionamiento de los motores hidráulicos que contienen las máquinas | Cambios en el nivel del ruido bajo la superficie | Ecología Marina: Ruido puede afectar a los mamíferos marinos cuya comunicación depende de los sonidos. | Evitar la localización del parque en zonas donde abunden los cetáceos. La mantención regular de los equipos reducirá el ruido. |
| | Pérdidas de Fluido | Contaminación del agua, con efectos negativos en la vida submarina | Usar fluidos hidráulicos biodegradables o que no sean tóxicos |
| Presencia de concreto y/o acero para asegurar cada generador | Cambios en la naturaleza del fondo marino | Ecología Marina: Cambios locales en la fauna y flora del fondo marino | seleccionar localizaciones para la instalación cuyos impactos sean mínimos, y con el fin de maximizar los beneficios para el nuevo habitat que proveerán las estructuras |
| Cables aéreos o instalaciones en la costa que conecten el parque con el sistema interconectado | Cambios en las propiedades estéticas de la zona costera | Miradores o características visuales: Se puede reducir el valor estético de la zona costera en cuestión | La evaluación de impacto ambiental debe identificar la ruta y la localización óptima para las estructuras. Utilizar cables subterráneos si es necesario. |
| Mantención de generadores (cada máquina es acarriada hacia la costa) | Cambios en la ecología marina | Ecología Marina: medidas de mantención como traslado de los equipos puede tener un efecto en la vida marina de una zona específica. | Asegurarse que los anti-encrustantes utilizados no sean tóxicos. Asegurarse que las actividades de mantención no contaminen. Cualquier efecto acumulativo debería ser evaluado |

| Impactos medioambientales Durante el fin de operación del Parque Undimotriz | | | |
|--|--|---|---|
| Actividad | Cambio ambiental | Potencial impacto a... | Medidas de mitigación (o de reducción de impacto) |
| Retiro de las máquinas del sitio | Cambio en las propiedades estéticas del área costera | Miradores o características visuales: posible reducción del valor estético de la zona costera en cuestión | asegurarse que la bodegas de las máquinas en desuso sea temporal y evitar la ubicación de ésta sea en zonas con alto valor estético |
| Retiro de todos los cables y estructuras instalados costa afuera | Cambios en la flora y fauna del fondo marino | Ecología marina: cambios locales en habitats del fondo marino | Evitar dejar escombros y retirar cables viejos |