UNIVERSIDAD DE VALPARAISO
CHILE

Facultad de Ciencias del Mar y de Recursos Naturales

INGENIERIA CIVIL OCEÁNICA

GENERACIÓN DE ENERGÍA POR CORRIENTES DE MAREA EN CHILE. UNA APLICACIÓN AL CASO DE MELINKA.

DOC ICO 01-2009 *

Resumen Ejecutivo correspondiente al estudio realizado por el Ingeniero Civil Rolando García G. y el Grupo de Ingeniería Civil Oceánica

* Actualizado con publicación en Anales del Instituto de Ingenieros Vol 121, 3-12-2009

www.ingenieriaoceanica.cl

ISSN 0716 - 2340

ANALES DEL INSTITUTO DE INGENIEROS DE CHILE

Vol. 121 N° 3 - DICIEMBRE 2009

"Uno de los pensamientos que más ha preocupado al Instituto de Injenieros, desde su fundación, ha sido la creación de un organo que lo ponga en relación con la sociedad, a cuyos intereses trata de servir, i cada día que pasa nos hace ver más i más la necesidad que la corporación tiene de consignar en un periódico las ideas que surjan i que se elaboren en su seno, referentes a los multiplicados i variadísimos ramos de la injeniería.

En esta virtud, no porque nuestro periódico sea especialmente el órgano del Instituto, dejará de serlo también del país en general, i léjos de esto, creemos obrar en consonancia con nuestro propósito, ofreciendo sus columnas a las personas ilustradas i de buena voluntad que nos honren con el precioso continjente de ideas útiles".

(Anales del Instituto de Injenieros. Tomo 1, Año 1, 1888).

Anales del Instituto de Ingenieros
Vol. 121, N° 3, Diciembre de 2009.

Contenido

SENSORLESS CONTROL FOR A SWITCHED RELUCTANCE WIND GENERATOR, BASED ON CURRENT SLOPES AND NEURAL NETWORKS. Pág. 77
Estanislao Echenique, Juan Dixon, Roberto Cárdenas y Rubén Peña.

GENERACIÓN DE ENERGÍA POR CORRIENTES DE MAREA EN CHILE. UNA APLICACIÓN AL CASO DE MELINKA. Pág. 87
Rolando García Gilardino y Patricio Winckler Grez.

UN ANÁLISIS DE LOS ESCENARIOS DE RIESGOS Y ESTRATEGIAS EN PROYECTOS INDUSTRIALES POST-CRISIS, PARA DUEÑOS, CONTRATISTAS Y PROVEEDORES. Pág. 103
Mario Salmona Petersen.

Editor
Raúl Uribe Sawada, Instituto de Ingenieros de Chile.

Comité Editorial
José Vargas Baecheler, Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica (SOCHID)
Alexander Chechilnitzky Zwicky, Asociación Interamericana de Ingeniería (AIDIS)
Marcial Baeza Setz, Asociación Chilena de Sismología e Ingeniería Antisísmica (ACHISINA)
Fernando Bravo Fuenzalida, Sociedad Chilena de Ingeniería de Transporte (SOCHITRAN)
Ramón Verdugo Alvarado, Sociedad Chilena de Geotecnia (SOCHIGE)

Los Anales del Instituto estarán dedicados a la presentación de trabajos técnicos en el área de la Ingeniería y ramas afines, para lo cual acepta colaboraciones tanto del país como del extranjero.
Se publicarán aquellos artículos que, a juicio del Comité Editorial, contribuyan al desarrollo o difusión del conocimiento, de técnicas y métodos o de aplicaciones de importancia en la Ingeniería. Artículos de índole expositiva que unifiquen resultados dispersos o que den una visión integrada de un problema o de una puesta al día de una técnica o área, serán bienvenidos. Del mismo modo, ensayos sobre temas de interés para la profesión como perspectivas educacionales, históricas o similares.

GENERACIÓN DE ENERGÍA POR CORRIENTES DE MAREA EN CHILE. UNA APLICACIÓN AL CASO DE MELINKA.

Rolando García Gilardino [1] y Patricio Winckler Grez [2]

RESUMEN

En el último tiempo ha tomado fuerza la investigación vinculada al desarrollo de dispositivos generadores de electricidad a partir de las corrientes originadas por mareas. Esto porque se trata de un fenómeno cíclico predecible, lo que constituye una ventaja comparativa importante respecto de otros sistemas, como los basados en a energía eólica, la energía solar o la energía undimotriz. En la actualidad existen numerosos dispositivos que están siendo desarrollados en distintos lugares del mundo. Hasta ahora no se dispone de dispositivos producidos en forma comercial, sin embargo, es esperable que al corto o mediano plazo éstos se comiencen a producir.

En este contexto es que a partir del año 2008, los autores se abocaron a preseleccionar sitios atractivos para el desarrollo de proyectos asociados a la explotación del recurso. En base a esta experiencia, en el presente documento se describen los aspectos teóricos, la metodología, y los resultados relevantes que permiten dimensionar una planta de generación eléctrica por corrientes de marea. Los estudios realizados son localizados en el Canal Chacao y Canal Leucayec y fueron seleccionados por las altas velocidades de las corrientes que siguen un régimen condicionado principalmente por fenómenos astronómicos.

1. GENERALIDADES.

1.1 LA ENERGIA MAREOMOTRIZ EN CHILE.

Se espera que dentro del período 2005-2030 se produzca un aumento significativo del consumo de energía a nivel global del orden del 50%. La mayor parte de este incremento se concentrará en las economías emergentes tales como Chile, las que cuentan con un aumento de consumo proyectado promedio del orden de 2,5% anual hasta el horizonte 2030. En Chile, la Ley 19.940 de marzo de 2004 introdujo modificaciones en la Ley General de Servicios Eléctricos, permitiendo la participación en el mercado eléctrico de generadores de pequeña escala (hasta 20 MW) y la exención parcial o total del peaje para los sistemas ENRC de pequeña escala. Es así como, a 2007, fuentes de tipo ENRC representaban 3,1% de la oferta energética nacional, principalmente de fuentes energéticas maduras y de aplicación comercial, como biomasa, eólica y centrales hidráulicas de pasada.

Por otra parte, la Ley 20.257 establece que para el horizonte 2010, un 5% de la oferta proveniente de las empresas comercializadoras debe provenir de fuentes ENRC. Este porcentaje se mantendrá estable hasta el año 2014, aumentándose en un 0,5% anual a partir del año 2015, hasta alcanzar un 10% en 2024. Este requerimiento se ha visto traducido en la implementación de un número significativo de proyectos con ENRC de estado maduro, pero al mismo tiempo plantea la necesidad de explorar otras fuentes cuyo nivel de desarrollo actual pudiera dificultar su aplicación comercial inmediata.

Estudios de carácter global han sugerido que Chile se encuentra en una situación de privilegio en lo referente al potencial energético del océano, ya sea de carácter mareomotriz o undimotriz, (Cornett, 2008, Acuña, 2008). Esto parece sugerir que, a nivel de recurso, Chile se encuentra en una posición favorable como para iniciar el desarrollo de proyectos ENRC basados en esta fuente.

[1] Ingeniero Civil de la Universidad Técnica Federico Santa María.
[2] Ingeniero Civil de la Universidad Técnica Federico Santa María. MSc. Grupo de Ingeniería Oceánica, Universidad de Valparaíso.

Entre las ERNC, se ha notado un interés por el desarrollo de tecnologías que aprovechen el potencial energético debido al movimiento de grandes cuerpos de agua como mares y océanos. En particular, las mareas presentan muy buenas cualidades que permiten su utilización. Entre las más importantes está su mayor predictibilidad en comparación con otras fuentes renovables como la solar, eólica, undimotriz e hidráulica, lo que permite proyectar a largo plazo la disponibilidad energética. En contraste, las corrientes mareales están sometidas a fuertes variaciones de magnitud en el día, que pueden tener ciclos de 6 ó 12 horas según el régimen de la zona.

La tecnología para el aprovechamiento de la energía de mareas ha tenido un desarrollo desde la década del 60, estableciéndose en 1967 la primera planta de generación eléctrica por mareas en el Estuario del Río Rance, Francia, que utilizaba una represa para generar desniveles. Si bien, la producción mediante una represa fue satisfactoria por concepto de energía generada, los fuertes impactos ambientales y los altos costos de mantención, hicieron necesario el desarrollo de una nueva tecnología mediante turbinas hidráulicas, que aprovechan la potencia del flujo que, de manera natural, es producido por las mareas. En cuanto a las fuentes de generación, en el mundo existen ciertas localidades en las cuales las corrientes mareales son suficientes para la generación de electricidad. En Chile existe una zona de fiordos comprendida entre las latitudes 41º y 44º Sur en la cual pueden encontrarse canales que presentan velocidades de hasta 5 [m/s].

1.2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.

Las mareas astronómicas son variaciones del nivel del mar producidas principalmente por las fuerzas gravitacionales de la Luna y el Sol. Debido a la naturaleza cíclica del movimiento relativo de sistema Luna, Tierra y Sol, es posible distinguir una variación periódica del nivel del mar en un punto específico del planeta. Este comportamiento puede ser descrito mediante la superposición de señales de período definido, con amplitud y desfase propios de cada lugar. Las diferentes señales periódicas se caracterizan a través de los llamados constituyentes de la marea, que permiten predecir las variaciones del nivel del mar por períodos bastante extensos. La variación del nivel del mar, causada por las mareas produce el desplazamiento periódico de grandes masas de agua denominadas corrientes de marea.

El movimiento de los volúmenes de agua se ve fuertemente influido por el ciclo lunar y la rotación de la Tierra (efecto de Coriolis), la presencia de continentes y la disipación de fondo, que en conjunto condicionan el patrón de circulación y las propiedades de amplitud y desfase de la señal que se propaga. La alteración de estos parámetros puede originar diferencias de potencial entre dos lugares que, de estar comunicados, dan lugar a un flujo periódico entre ambos. Cuando este flujo es forzado a pasar por zonas como estuarios, canales o estrechamientos, se generan corrientes aún mayores cuya energía cinética puede ser aprovechada. Las corrientes pueden asimismo verse afectadas por las condiciones locales, produciéndose diferencias considerables entre dos puntos cercanos, o bien, en un mismo punto, pero a diferentes profundidades.

Las turbinas hidráulicas aprovechan la energía cinética de las corrientes, las que al ser situadas en el flujo permiten transformar esta energía en electricidad. La potencia del flujo (P_f) se expresa de acuerdo a la Ecuación (1).

$$P_f = \frac{1}{2}\rho\Omega v^3 \qquad (1)$$

P_f : Potencia del flujo [W]
$\dot{m}$: Caudal másico [kg/s]
ρ : Densidad del fluido [kg/m^3]
Ω : Sección de la turbina [m^2]
v : Velocidad del flujo [m/s]

La potencia que puede producir un dispositivo generador o turbina hidráulica está condicionada por una aproximación teórica conocida como Límite de Betz, que no tiene relación con la eficiencia de estos dispositivos, sino con las leyes hidrodinámicas que rigen su funcionamiento. La ecuación (2) expresa esta relación.

$$P_d = \frac{1}{2}L_{Betz}\,\eta\rho\,\Omega\,v_e^{\,3} \qquad (2)$$

P_d : Potencia entregada por el dispositivo generador (W)
L_{Betz} : Límite de Betz
η : Eficiencia del dispositivo
ρ : Densidad del fluido [kg/m^3]
Ω : Sección de la turbina [m^2]
v_e : Velocidad del flujo a la entrada de la turbina (m/s)

En la actualidad existen numerosos dispositivos basados en turbinas hidráulicas que están siendo desarrollados en distintos lugares del mundo. Hasta ahora no se dispone de dispositivos producidos en forma comercial, sin embargo, es esperable que al corto o mediano plazo éstos se comiencen a producir. En la Figura 1 se ilustra, a modo de ejemplo, el dispositivo Seagen que opera en la localidad de Strangford Narrows, Reino Unido.

Figura 1: Dispositivo SeaGen de la MCT Ltd.

SEAGEN	
Fabricante	Marine Current Turbines Ltd
Ubicación	Strangford Lough, UK
Potencia Nominal	1.2MW a velocidad nominal de 3 m/s
Velocidad de Corte	0.7 m/s
Velocidad Nominal	3m/s
Rotación	10-20 RPM
Diámetro	18 m
Helices	2
Fundación	Monopila
Fondeo	menor que 30 m
Costo capital (£k/MW)	5191
Life Cycle Unit cost (p/kWh)	16.8
Largo de la pila	55 m
Peso Pila	245 Ton
Largo Viga Cruzada	29 m
Peso Viga + Rotores	151 Ton
Puesta en Marcha	Mayo 2008

Fuente: Final-Survey and Characterization Tidal In Stream Energy Conversions (TISEC) Devices, Noviembre 2005

Fuente: Final Surrey and characteriation. Tidal in stream energy conversions (TISEC) Devices, Noviembre 2008.

Figura 2: Diagrama de la metodología de estudio.

2. METODOLOGÍA DE ESTUDIO.

Para evaluar la implementación de un sistema energético basado en el aprovechamiento de las corrientes originadas por mareas, se definió un procedimiento que involucra aspectos que van desde la elección de un lugar apropiado, hasta el dimensionamiento preliminar del sistema energético que satisfaga las condiciones de demanda del lugar escogido (Figura 2). A continuación se detallan las diferentes actividades involucradas en cada uno.

2.1 ELECCIÓN DEL LUGAR.

La elección de un lugar apropiado debe considerar múltiples aspectos, que van desde la identificación de una necesidad u oportunidad para el desarrollo de un sistema energético, hasta las condiciones técnicas que permitan una adecuada instalación y desempeño de los dispositivos generadores. Definido el objetivo del suministro, sea éste para una localidad aislada o para algún sistema interconectado, se deberán evaluar los siguientes criterios generales que determinan la conveniencia de un lugar para el desarrollo de un sistema de estas características.

a. **Distancia al centro de consumo:** Se debe estimar la distancia entre la zona de generación, y el punto de conexión a un sistema interconectado o localidad aislada según sea el mercado objetivo. Además de la distancia, es imprescindible identificar las zonas en donde la transmisión es submarina ya que ésta es más costosa que la terrestre.

b. **Condiciones apropiadas para la generación:** Una revisión de los requerimientos de los prototipos disponibles permite definir las siguientes condiciones:

- Velocidades máximas en sicigias superiores a los 2 [m/s].
- Corrientes de origen mareal (lo que se traduce en un recurso renovable y predecible).
- Profundidades comprendidas entre 10 - 50 [m].
- Zonas abrigadas al clima marítimo extremo.

c. **Topo-batimetría:** La mayor parte de los dispositivos han sido desarrollados para profundidades entre 20 y 30 [m]. Existen prototipos que pueden ser instalados en profundidades mayores, sin embargo, se debe tener en cuenta que ello puede incrementar significativamente los costos de instalación y mantención.

d. **Mecánica de suelos:** Es importante identificar y analizar los suelos sobre los que se fundarán los dispositivos y evaluar los cambios geomorfológicos que puedan producirse por las modificaciones en los patrones de velocidades, lo que incluye análisis de socavación y/o embanque a nivel local.

Figura 3: Transporte del SeaGen con una grúa Rambiz y almacenamiento Belfast.

Fuente: www.marineturbines.com y www.scaldis-smc.com.

e. **Aspectos constructivos:** Los dispositivos que existen en la actualidad son de gran envergadura y peso, y difícilmente separables en varias partes. Por esto, se deben analizar las características de puertos cercanos donde se recibirán y almacenarán los componentes, para luego ser enviados a su locación final. Además, debe analizarse la disposición de la maquinaria especial, acorde con los pesos y dimensiones en la localidad seleccionada. Ésta deberá trabajar en zonas de fuertes corrientes y con infraestructura a gran distancia para su mantenimiento. En la Figura 3 se ilustra el transporte y almacenamiento de las partes del SeaGen en Belfast.

f. **Conflictos**: Es importante señalar que los dispositivos ocuparán un área no despreciable, pudiendo dificultar otras actividades marítimas como es la pesca y la navegación. Además, se debe cuantificar las variaciones en los patrones de velocidades originales sin proyecto y otros impactos en la flora y fauna alrededor de la planta de generación.

2.2 CARACTERIZACIÓN DEL RECURSO.

La identificación de zonas de interés para la explotación del recurso requiere de una serie de tareas que comprenden la recopilación de antecedentes oceanográficos, la implementación de modelos numéricos y el análisis de los resultados. En lo sucesivo se intercalan algunos de estos aspectos con la aplicación a la localidad de Melinka, ubicada en la XI Región, Chile (Figura 4).

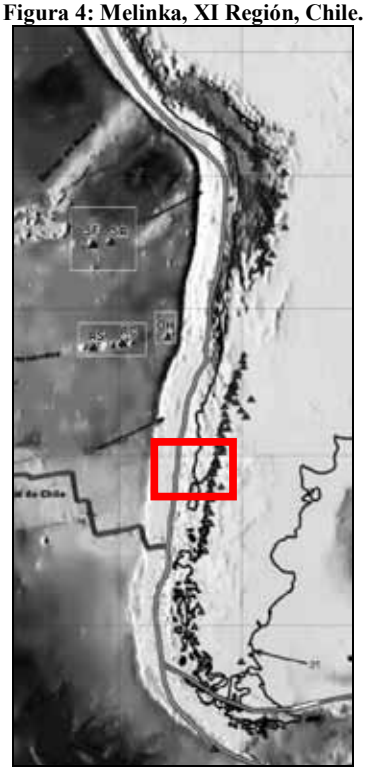
2.2.1 ANTECEDENTES Y DATOS.

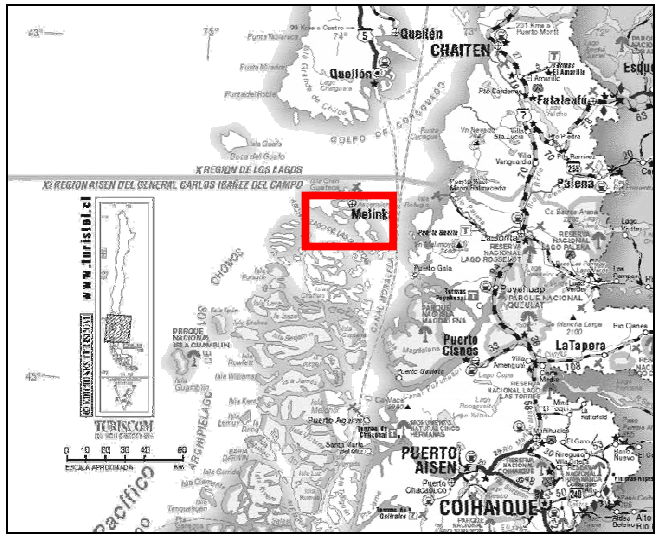
Para la caracterización es importante obtener antecedentes de la geografía, batimetría, registros del nivel del mar y registros de corrientes en el sitio de estudio.

2.2.1.1 Geografía.

La información geográfica del lugar puede ser obtenida mediante el uso de cartas náuticas, imágenes satelitales u otras fuentes como registros de aerofotogrametría. Tal información es de gran utilidad en la definición e identificación de la línea de costa, el análisis de las distancias y accesibilidad entre el emplazamiento de los dispositivos y los puertos más cercanos, las rutas de navegación definidas por la autoridad marítima, entre otros. En la Figura 5 se muestra las rutas de navegación en las cercanías de la localidad de Melinka.

Figura 4: Melinka, XI Región, Chile.

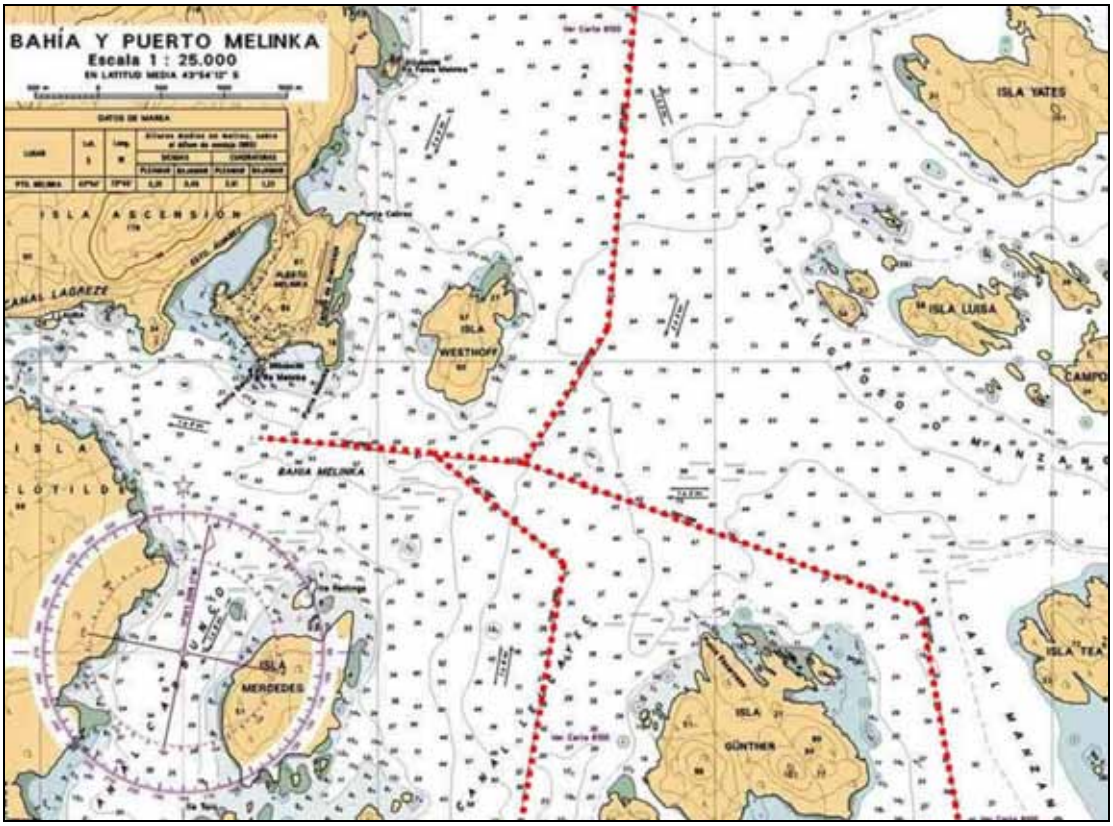




Fuente: Elaboración propia a partir de Turistel y Google Earth.

Esta información permite determinar la posición exacta al punto de conexión sea éste de un sistema eléctrico o localidad abastecida.

Figura 5: Rutas de navegación cercanas a Melinka.

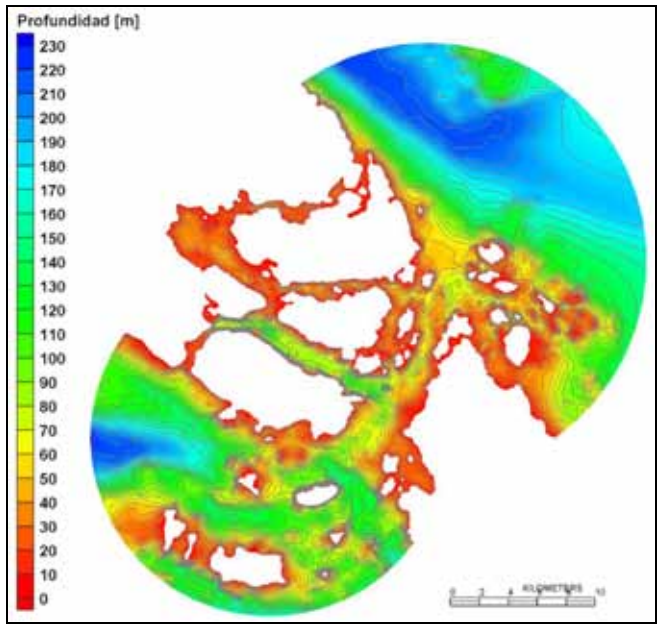


Fuente: Elaboración parcial propia a partir de datos SHOA.

2.2.1.2 Batimetría.

La información de la batimetría es usada para confeccionar el modelo hidrodinámico y para evaluar las profundidades a las cuales deben ser fundados los dispositivos. El Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) posee una extensa base de datos de batimetría que comprende gran parte del territorio marítimo chileno. Cabe notar que el objetivo del SHOA es brindar la información necesaria para garantizar una navegación segura y, en consecuencia, la densidad de sondaje puede resultar insuficiente para la confección de un modelo hidrodinámico. Por ello, es conveniente indagar sobre la existencia de registros batimétricos específicos en la localidad. En la Figura 6 se muestra el modelo batimétrico en las cercanías de la localidad de Melinka, generado a partir de la información obtenida de diversas fuentes.

Figura 6: Modelo batimétrico en la localidad de Melinka.



Fuente: Elaboración parcial propia a partir de datos SHOA.

2.2.1.3 Registros del nivel del mar.

Para desarrollar la simulación hidrodinámica, se deben conocer las variaciones del nivel del mar del lugar. Por otra parte, es importante conocer los niveles mínimos y máximos, ya que de éstos depende el diseño de la planta en cuanto a la selección y dimensionamiento del dispositivo, procesos constructivos, mantención de los dispositivos, etc.

Existen múltiples formas de obtener un registro de nivel del mar. Todos los años el SHOA publica las Tablas de Marea que permiten estimar las alturas e instantes de ocurrencia de pleamares y bajamares en distintos puertos del país. Debe tenerse en consideración que el propósito de estas publicaciones es de proveer la información necesaria para la navegación, lo que en ciertos casos puede resultar insuficiente para efectos de la modelación. Por ello, es recomendable indagar sobre la existencia de mediciones en el área de estudio o considerar una medición del nivel del mar de acuerdo a la normativa correspondiente (SHOA - pub. 3201, 2005).

Un registro horario del nivel del mar que comprenda un período continuo de al menos 30 días presenta condiciones suficientes para los propósitos de la modelación. A partir de éste, es posible realizar un análisis armónico para la determinación de los constituyentes más importantes; y un análisis no armónico (SHOA - pub. 3202, 1999) para la determinación de ciertos planos de referencia como el nivel medio del mar o el Nivel de Reducción de Sondas[1], entre otros. En la Figura 7 se presenta el registro de nivel del mar en Melinka y los resultados de la modelación hidrodinámica.

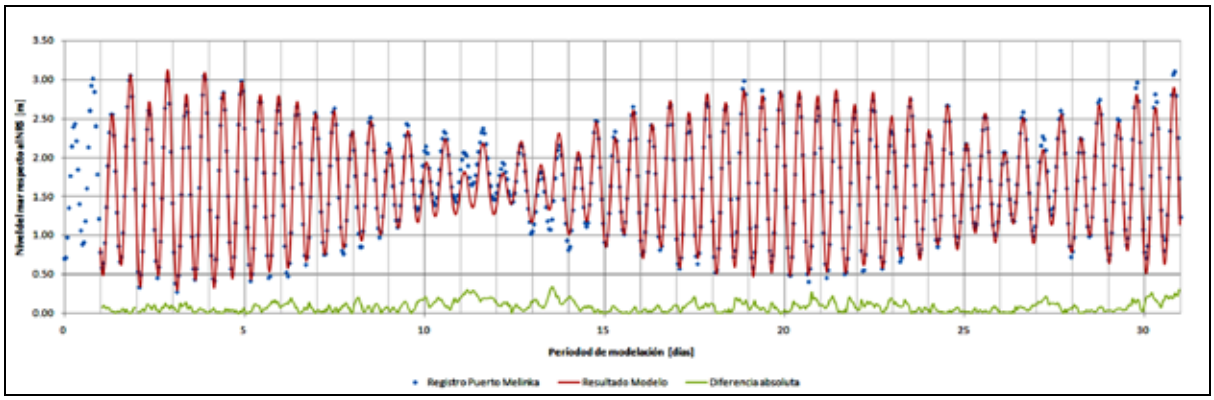
2.2.1.4 Registros de corrientes.

Los registros de corrientes son más escasos que los registros del nivel del mar debido a que están fuertemente influidos por condiciones locales. Por ende, es recomendable contar con registros cercanos a aquellos sitios que se desean representar en forma más precisa.

Existen registros de tipo lagrangianos (derivadores), eulerianos (correntómetros) y registros de corrientes en transectos. Una medición de correntometría euleriana proporciona datos útiles para calibrar las corrientes de un sector cercano al punto de observación. Además, si el registro incorpora mediciones de velocidad a diferentes profundidades, puede caracterizarse la variación vertical del recurso, aspecto que debe ser considerado al momento de cuantificar la potencia del flujo. En contraste, una medición de correntometría lagrangiana no presenta mayor utilidad en el proceso de calibración de un modelo, ya que la variación de parámetros como fricción de fondo o viscosidad turbulenta no tiene directa relación con el ajuste de las trayectorias definidas por los derivadores. Por último, las mediciones de corrientes en transectos seguidos por una embarcación que remolca un instrumento (bottom tracking o ADCP remolcado) entregan información del patrón de corrientes de un sector bastante amplio, que puede ser útil para validar un modelo hidrodinámico.
En la Figura 8 se presenta los vectores de un registro de corrientes obtenido con ADCP remolcado a lo largo del canal Leucayec, en las cercanías de Melinka.

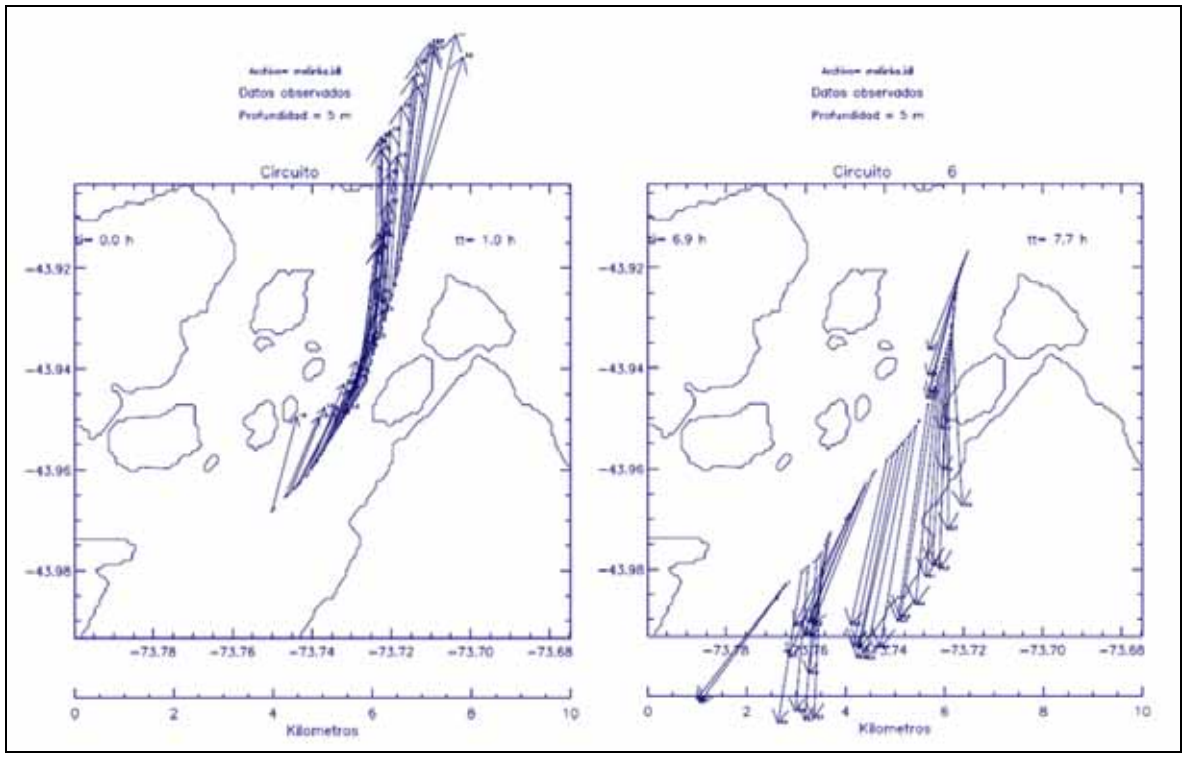
[1] "Nivel de Reducción de Sondas (NRS): Es el plano al cual están referidas las sondas o profundidades de una localidad. Las necesidades de navegación requieren que la carta náutica en la cual se insertan las sondas muestre la mínima profundidad que se puede encontrar en un punto, por lo tanto, usualmente se adopta como dátum de la carta algún nivel relacionado con las bajamares. Cada país adopta el N.R.S. de acuerdo con las características del régimen de marea de sus costas..." (SHOA, Pub. 3013, 1992).

Figura 7: Nivel del mar en Puerto Melinka.



Fuente: Elaboración propia a partir de datos del SHOA.

Figura 8: Corrientes en Canal Leucayec, en las cercanías de Melinka.



Fuente: Cáceres (2004).

2.2.2 MODELACIÓN NUMÉRICA.

Una modelación consiste en una representación simplificada de un fenómeno real, que puede desarrollarse a través de modelos físicos o modelos numéricos. En la actualidad son ampliamente utilizados los modelos numéricos basados en diferencias finitas, elementos finitos y volúmenes finitos. Cada método presenta ciertas ventajas dependiendo de las características del área de estudio y de los objetivos de la modelación hidrodinámica. Los algoritmos basados en el DF requieren de un trabajo computacional menor y son sencillos de implementar. Aquellos basados en EF y VF permiten representar complejas geometrías, gracias a la posibilidad de implementar mallas no estructuradas para la resolución del problema.

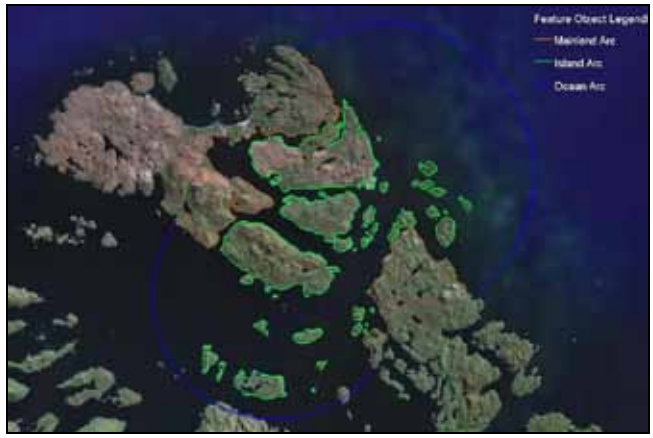
2.2.2.1 Modelo numérico.

Las modelaciones señaladas en este estudio fueron desarrolladas utilizando el programa ADCIRC (Luettich & Westerink, 2000) a través de la interfase proporcionada por el software SMS 9.0 (Brigham Young University, 2005). ADCIRC es un programa de modelación de zonas costeras, que resuelve las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento para un fluido móvil en una Tierra que rota. Las ecuaciones han sido formuladas a partir de las leyes de presión hidrostática, las que han sido discretizadas en el espacio mediante el método de elementos finitos y en el tiempo mediante el Método de Diferencias Finitas. La versión de ADCIRC 2DDI resuelve las ecuaciones de continuidad y momentum en dos dimensiones e integradas en la vertical.

2.2.2.2 Región de modelación.

La región de modelación debe conciliar tanto los objetivos del estudio como los requerimientos del programa que se utiliza. Un claro ejemplo de ello es la definición de la región de contorno, la que además de incluir todas aquellas zonas de interés - donde las corrientes son altas o donde la profundidad es idónea para los dispositivos - debe ser compatible con las opciones que ofrece el programa para la definición de las condiciones de borde. En la Figura 9 se presenta, a modo de ejemplo, la región de modelación en las Islas Guaitecas, en las cercanías de Melinka.

Figura 9: Región de modelación para canales de las Islas Guaitecas, Melinka.



Fuente: Elaboración propia a partir de Google Earth.

2.2.2.3 Condiciones de borde.

Es posible clasificar los contornos de la modelación en dos grandes grupos: las líneas de costa y regiones abiertas. En algunos casos es posible contar con registros de puntos que permiten definir la línea de costa, sin embargo, en otros se debe estimar a partir de fuentes de información geográfica como imágenes satelitales y cartas náuticas. Por otro lado, las regiones abiertas son contornos que deben ser impuestos sobre regiones ocupadas por el agua para limitar el tamaño del modelo. Sean los contornos líneas de costa o regiones abiertas, es necesario asignar las condiciones que gobernarán el comportamiento de ésas, conocidas como condiciones de borde del problema. Los programas de modelación incorporan diferentes opciones, como por ejemplo:

- Nivel del mar mediante la especificación de constituyentes armónicos o series de tiempo.
- Características de la velocidad normal y/o tangencial en los contornos.
- Especificación de caudales de entrada o salida en puntos específicos del contorno.
- Fronteras fijas o móviles resueltas a través de rutinas tipo wetting and drying.

2.2.2.4 Confección de la malla.

La malla de elementos finitos está compuesta por un conjunto de elementos cuyos lados se encuentran definidos por nodos o vértices. Para su confección, es necesario ubicar espacialmente estos nodos, por lo que resulta imprescindible contar con la información de batimetría adecuada. El proceso de confección de la malla es habitualmente desarrollado por rutinas incorporadas en los mismos programas de modelación, ofreciéndose múltiples formas de ajustar el mallado. Se deberá tener en cuenta que una malla más fina permitirá obtener mayor estabilidad y precisión, pero a un costo computacional mayor. En consecuencia, es importante distribuir correctamente el tamaño de los elementos sobre toda la extensión del modelo ya que ello optimizará los recursos utilizados. También se debe evaluar la calidad del mallado para diagnosticar posibles problemas en la modelación.

Al respecto, existen parámetros que deben ser revisados a objeto de permitir una modelación eficiente. Entre éstos se cuentan el número total y distribución del tamaño de los elementos, la forma de los elementos, el gradiente de profundidad de cada elemento y otros indicadores que dependerán del modelo en cuestión.

2.2.2.5 Intervalo temporal.

En modelaciones hidrodinámicas es importante la definición del intervalo de tiempo que se utilizará para resolver el problema. Al respecto, se deberá tener en cuenta que un tamaño menor de elementos exigirá la definición de un intervalo de tiempo menor. Esto se explica mediante la condición de Courant-Friedrichs-Levy (CFL), que establece que el intervalo temporal utilizado para resolver numéricamente ciertas ecuaciones diferenciales parciales debe mantener cierta relación con el tiempo que demora en ocurrir la acción representada. En el caso de la modelación de fenómenos originados por mareas, el tiempo al que se hace referencia corresponde al tiempo que tarda en propagarse la señal de marea entre dos nodos adyacentes o pertenecientes a un mismo lado de un elemento, por lo que la condición CFL estaría descrita por la Ecuación (3).

$$\frac{\Delta t}{\Delta x_{i-j}} v_{as} \leq CFL \qquad (3)$$

CFL : Coeficiente de Courant-Friedrichs-Levy.
Δt :Intervalo temporal utilizado para la modelación (time-step).
Δt_{i-j} : Longitud del lado que une los nodos i y j.
V_{as} : Velocidad de propagación de la onda de marea (en aguas someras) igual a la raíz cuadrada del producto de la profundidad y la aceleración de gravedad.

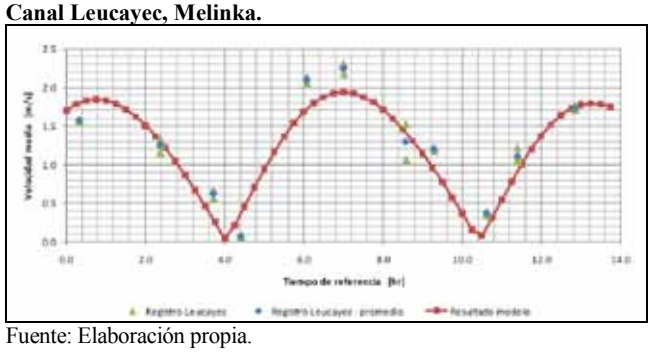
2.2.2.6 Parámetros del fluido.

Cada programa requiere la especificación de múltiples parámetros que regirán las características del fluido que se modela. Se deberá buscar en la bibliografía correspondiente o indagar en estudios similares los valores recomendados para cada uno. Entre los más comunes se distinguen: la viscosidad lateral o de Eddy, vinculada a la disipación por fenómenos turbulentos, y el coeficiente de fricción de fondo.

2.2.2.7 Calibración.

Es la última etapa de la modelación y su objetivo principal es la verificación de los resultados obtenidos. Para ello, es necesario efectuar un proceso de calibración y sensibilización de aquellos parámetros sobre los que no se conoce con certeza el valor que deben adoptar. Usualmente pueden ser revisados con este propósito los parámetros del fluido (viscosidad lateral y fricción de fondo) y otras variables del problema, como desfases en la señal de marea sobre las condiciones de borde, cuando no se tiene total certeza de los valores en éstas. La calibración debe ser efectuada, en la medida que existan datos, para niveles del mar al interior del dominio de integración (Figura 7) y corrientes en una o más estaciones de medición (Figura 10).

Figura 10: Calibración de la magnitud de las corrientes en el Canal Leucayec, Melinka.



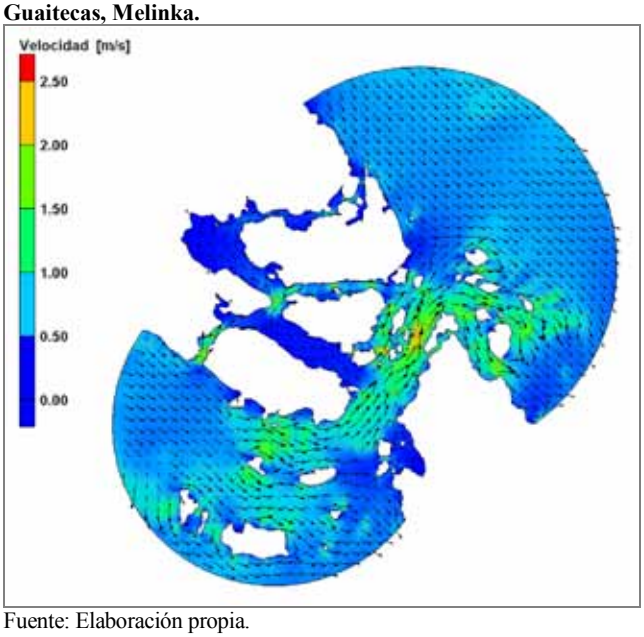
Fuente: Elaboración propia.

2.2.3 RESULTADOS.

Una de las ventajas que ofrece la elaboración de un modelo numérico es que permite caracterizar la hidrodinámica de las corrientes sobre toda la región abarcada por el modelo. Para ello puede resultar útil la visualización del patrón de corrientes para ciertos instantes característicos del flujo, como: mínima cuadratura llenante, mínima cuadratura vaciante, máxima sicigia llenante y máxima sicigia vaciante. La elección de estos instantes para la representación de las corrientes radica en que corresponden a los valores alcanzados bajo las condiciones extremas, por lo que los peaks de velocidad correspondientes a otros instantes deberían alcanzar valores intermedios.

Con la simulación en el modelo y los antecedentes investigados, se logra identificar las zonas de interés en la localidad modelada. La Figura 11 muestra los resultados correspondientes a la modelación de los canales de las Islas Guaitecas, en las cercanías de Melinka.

Figura 11: Simulación de la corriente para canales de las Islas Guaitecas, Melinka.



Fuente: Elaboración propia.

2.3 CARACTERIZACIÓN DE LA DEMANDA.

Como principal ingreso del sistema energético, además de posibles subsidios, la demanda de energía eléctrica es quizás la variable más importante para determinar la dimensión de la planta de generación. Según el objetivo del proyecto, la demanda provendrá de un sistema interconectado o de alguna localidad aislada. La demanda de energía eléctrica de una localidad se ve afectada por diversos factores que en definitiva dan lugar a un patrón de consumo, el que puede sufrir ciertas variaciones a lo largo del período de análisis. De este modo, es necesario reunir los antecedentes y datos en las áreas de estudio que permitan caracterizar la situación de consumo actual y cuantificar la demanda a lo largo del período del proyecto.

En favor de la síntesis, los aspectos relevantes de la caracterización de la demanda son omitidos en este documento. Mayores antecedentes pueden ser consultados a los autores.

2.4 ASPECTOS LEGALES.

Cualquier proyecto que involucre el uso de recursos naturales debe contar con los permisos de la autoridad correspondiente y cumplir con las exigencias ambientales establecidas.
En Chile, el proceso para la adquisición de los terrenos de playa, de las playas, rocas, porciones de agua y fondo de mar para diferentes usos se tramita a través de las concesiones marítimas. Estas concesiones son otorgadas por el Ministerio de Defensa Nacional (Subsecretaría de Marina) y la Armada de Chile (Dirección General del Territorio Marítimo y Marina Mercante) previo cumplimiento del "Reglamento sobre concesiones marítimas". El Reglamento establece los términos y condiciones que deben ser cumplidos antes de otorgar la concesión. Además, se establecen las garantías que el concesionario debe pagar cuando se desean realizar obras o construcciones en el lugar.

La Ley N° 19.300 presenta las disposiciones que regulan el derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación, la protección del medio ambiente, la preservación de la naturaleza y la conservación del patrimonio ambiental. En lo que concierne a proyectos o actividades que puedan ocasionar una alteración directa o indirecta en el medio ambiente, la Ley establece la realización de una "Declaración de Impacto Ambiental" o elaboración de un "Estudio de Impacto Ambiental" según sea la naturaleza del proyecto. Entre los impactos asociados al sistema de generación de energía por corrientes de mareas, destacan los efectos adversos sobre la cantidad y calidad de recursos naturales renovables, alteración significativa de los sistemas de vida y costumbres de grupos humanos (en el caso de localidades con suministro eléctrico parcial), localización próxima a

poblaciones y recursos susceptibles a ser afectado y efectos en el valor paisajístico entre otros.

2.5 ASPECTOS AMBIENTALES.

A la fecha no se han desarrollado proyectos que involucren un uso intensivo del recurso, por lo que no es posible contar con estudios de campo que permitan cuantificar los efectos ambientales sobre el ecosistema local. Sin embargo, se pueden identificar ciertos impactos particulares en relación al funcionamiento de los dispositivos, los que son descritos a continuación.

Efectos sobre el flujo y transporte de sedimentos: Todos los dispositivos que actualmente se encuentran en desarrollo han sido diseñados para operar en una disposición modular, por lo que los efectos sobre el flujo y transporte de sedimentos tienen más bien un efecto local en el lugar específico de emplazamiento de cada dispositivo. Si se considera que las eficiencias globales de estos dispositivos se encuentran entre un 30% y un 40%, y que su disposición espacial requiere mantener ciertas distancias respecto a la superficie, fondo y otros dispositivos, la cantidad de energía que puede ser efectivamente extraída respecto a la energía total de la sección de un canal corresponderá a una fracción relativamente pequeña de la energía disponible. Sin embargo es necesario señalar que las bajas eficiencias señaladas corresponden a la energía extraída por el dispositivo, debiéndose sumar la energía perdida por vórtices y mezclas generadas aguas abajo de la turbina.

Efectos sobre especies acuáticas: Es indudable que el emplazamiento de un rotor bajo la superficie del mar altera el desplazamiento de las especies de este medio. No obstante, la velocidad de los rotores es considerablemente menor que la de las turbinas para propulsión marina (hélices) o turbinas eólicas, principalmente porque se debe evitar el fenómeno de cavitación en los extremos de las aspas del rotor. La velocidad en los extremos se limita a valores que no superen los 12 [m/s], lo que en otras palabras, se traduce en una velocidad de rotación que varía entre 10 y 20 [rpm]. El efecto en las especies marinas es materia de investigación en la actualidad.

Efectos producidos por obras terrestres anexas: Un proyecto de generación eléctrica requiere de la construcción de una línea de transmisión para conectar la planta de generación con el sistema de abastecimiento de la zona. El impacto ocasionado por estas obras involucra principalmente una perturbación local de la vegetación por la instalación de las estructuras que sustentan las líneas de transmisión.

Conflictos por otros usos: La tecnología para la generación de energía por corrientes de marea requiere de corrientes elevadas, por lo que los lugares más apropiados para la generación suelen no coincidir con los mejores lugares para establecer rutas de navegación ni emplazamiento de módulos para explotación acuícola. Sin embargo, cuando se desea instalar una gran cantidad de dispositivos, o cuando las zonas potencialmente atractivas involucran rutas de navegación, el dimensionamiento de éstos se debe limitar en virtud de la compatibilidad de las diferentes actividades que se desarrollan.

Impactos ambientales durante la instalación: La instalación de los dispositivos involucrará generalmente tres actividades: emplazamiento del dispositivo, construcción de obras asociadas a la transmisión submarina y obras terrestres anexas. Los efectos ocasionados por cada una resultan similares a otras actividades comunes de construcción en el mar, por lo que son en gran parte conocidos, como el impacto sobre la vida marina, el efecto sobre la calidad del agua y conflictos de faenas temporales con otros usos.

3. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA ENERGÉTICO.

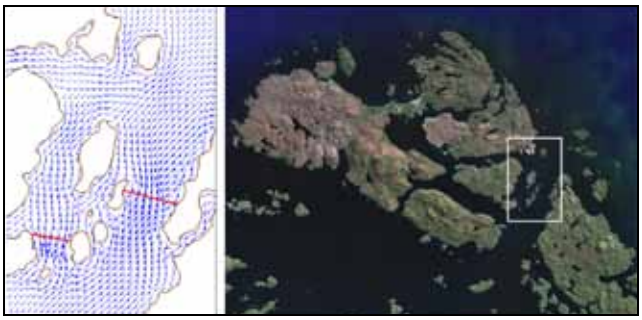
El dimensionamiento del sistema energético comienza con la identificación de aquellas zonas que reúnen las mejores condiciones para la instalación de los dispositivos, para luego estimar la energía que podría producirse con éstos. Dada la variabilidad de las corrientes originadas por las mareas, la generación de energía no podrá suplir las demandas de la localidad aislada en ciertos periodos, por lo que se debe contar con generadores eléctricos de respaldo que permitan abastecer al consumo permanente.

3.1 ZONAS DE INTERÉS.

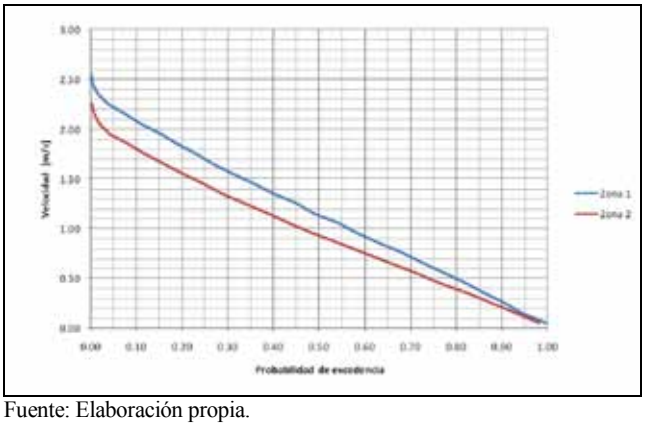
La identificación de las zonas de interés tiene el objeto de determinar aquellos sitios que garanticen las condiciones óptimas para la instalación de los dispositivos generadores. Para ello puede ser útil la confección de curvas de excedencia de velocidad y potencia para los sitios que se desee estudiar. Estas curvas entregan información útil al momento de definir la velocidad

nominal de los dispositivos. Asimismo, es posible estimar la energía disponible en las zonas identificadas, determinando un valor promedio de energía por unidad de superficie que puede ser utilizado para estimar la energía generada por diferentes dispositivos que pudiesen ser instalados. Los resultados de velocidad, potencia y energía para el Canal Leucayec y Carbunco se presentan en la Figura 12.

Figura 12: Resultados para Canal Leucayec y Canal Carbunco, Melinka.



Característica		Canal Carbunco	Canal Leucayec
Potencia promedio	[kW/m2]	0.86	0.58
Area de la sección	[m2]	11375	48768
Energía mensual disponible	[MWhr]	7054	20379
Energía anual disponible	[MWhr]	85825	247944



Fuente: Elaboración propia.

Como complemento a la modelación hidrodinámica, deben corroborarse los resultados en terreno mediante inspección aérea e identificación de vestigios de socavación y/o acorazamiento del lecho que pueden generarse en zonas de altas corrientes, además de la instrumentación de las localidades específicas.

3.2 ELECCIÓN DE DISPOSITIVOS GENERADORES.

Los principales aspectos que deben tenerse en cuenta para escoger y evaluar el desempeño de los dispositivos generadores se presentan a continuación:

Condiciones de diseño: Los prototipos en desarrollo han sido concebidos para adaptarse a ciertas condiciones específicas de instalación y operación. Cabe destacar que la instalación, dimensiones, peso del dispositivo y la profundidad del lugar juegan un papel fundamental en la factibilidad de instalación, particularmente en lo relacionado a su costo, utilización de maquinarias y requerimiento de personal especializado para realizar las faenas. En lo que respecta a la operación y mantención, debe tenerse en cuenta las dificultades de trabajar en un ambiente marino con corrientes elevadas, hecho que puede dificultar la labor de los buzos o artefactos que se utilicen para inspeccionar y efectuar las tareas de mantenimiento de los dispositivos. Además, debe considerarse la frecuencia con que se realizan estas actividades, ya que de requerir un apoyo logístico importante pueden encarecer en gran medida los costos.

Tamaño y capacidad: La evaluación de este criterio puede resultar un tanto ambigua, ya que el tamaño y la capacidad son factores que deben adaptarse a las condiciones hidrográficas específicas y a los requerimientos de consumo del lugar. Por ejemplo, para satisfacer la demanda de un sitio podrían requerirse dos o más dispositivos, sin embargo, si las condiciones hidrográficas así lo permiten, podrían aumentarse el tamaño del rotor y las capacidades de los componentes, para así requerir solamente uno. Lo anterior está sujeto a las condiciones de adaptabilidad del dispositivo que se analice y al espacio disponible en las zonas identificadas.

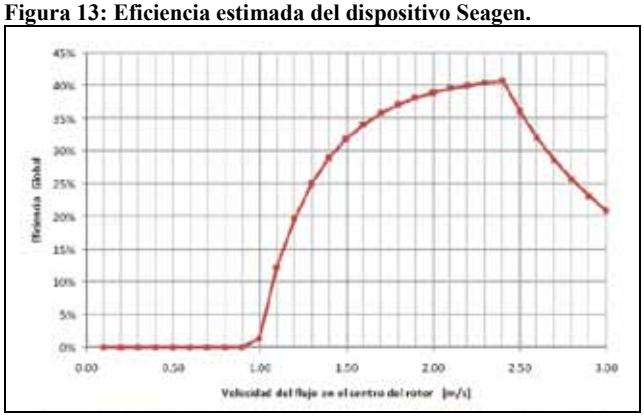
3.3 POTENCIA SUMINISTRABLE.

La *potencia generable* corresponde a la energía que los dispositivos son capaces de producir a partir de la potencia de las corrientes *(potencia disponible)*. En sistemas aislados, este concepto resulta diferente al de *potencia suministrable*, ya que esta última se encuentra condicionada a la *potencia demandada*. En otras palabras, no toda la potencia generable en un instante está siendo demandada por los usuarios, por lo que sólo puede aprovecharse una parte de ésta.

Es posible estimar la potencia disponible a partir de la distribución de velocidades mensuales de una zona específica obtenida de la modelación numérica, estimando para cada intervalo la potencia según el porcentaje del tiempo que representa cada rango.

La potencia generable por los dispositivos dependerá de la potencia disponible y de la eficiencia del dispositivo en cuestión, que varía en función de la velocidad del flujo y de otros elementos como la eficiencia del rotor, de transmisión y de generación. En la Figura 13 se presenta el diagrama de eficiencia estimado en este estudio para el dispositivo Seagen.

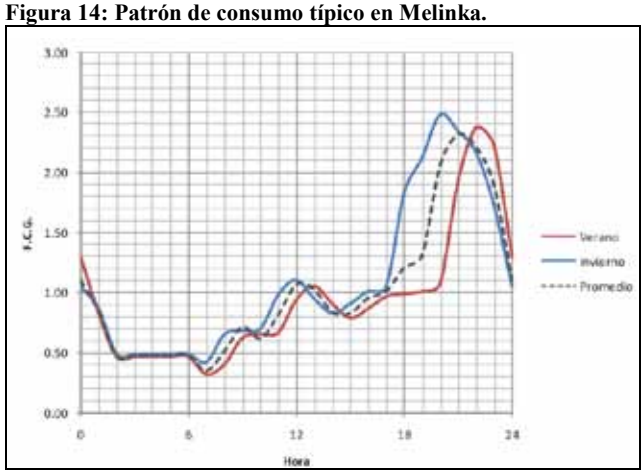
Figura 13: Eficiencia estimada del dispositivo Seagen.



Fuente: Elaboración propia.

En el caso de un sistema aislado, la potencia suministrable corresponderá a la intersección entre la potencia generable y la potencia demandada en un instante específico. Para determinar la potencia suministrable, se debe suponer un patrón de consumo que permita caracterizar la demanda durante el período de funcionamiento del proyecto. Aquella fracción del consumo que no pueda satisfacerse por los dispositivos generadores, deberá ser suministrada por un sistema de respaldo. En la Figura 14 se presenta los factores de carga que aproximan el patrón de consumo base en Melinka, en la situación actual.

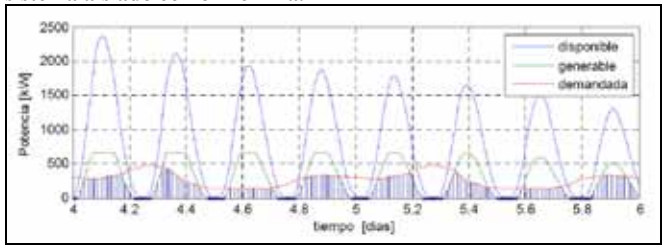
Figura 14: Patrón de consumo típico en Melinka.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 15 muestra la potencia disponible, la potencia generable y la potencia demandada suponiendo un determinado patrón de consumo horario para un período de dos días. El área achurada corresponde a la energía suministrable.

Figura 15: Potencia disponible, generable y demandada en sistema aislado como Melinka.



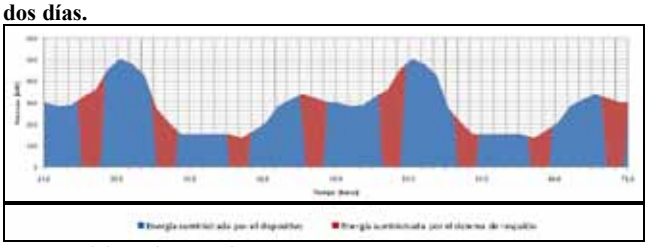
Fuente: Elaboración propia.

3.4 SISTEMA DE RESPALDO.

Dada la naturaleza de las corrientes de marea, la energía que puede ser generada a partir de éstas presentará variaciones considerables, por lo que difícilmente podrá satisfacerse la demanda a través de esta única fuente si se trata de un sistema aislado. Por ello, la utilización de un sistema de respaldo resulta indispensable en estos casos. Debido a que el costo de operación de los dispositivos generadores es bastante bajo, el sistema de respaldo entrará en funcionamiento únicamente cuando los dispositivos no sean capaces de satisfacer la demanda instantánea. Dependiendo del régimen de marea imperante, los intervalos de déficit pueden ocurrir con una

frecuencia de 6 a 12 horas, con una duración de 1 a 3 horas, correspondientes al período de *estoa* del lugar (momento en que la velocidad de la corriente está cerca de cero y cambia de dirección). La Figura 16 muestra las dos fuentes que permiten satisfacer la demanda considerando un sistema híbrido de potencia suministrada por corrientes de marea y un sistema de respaldo.

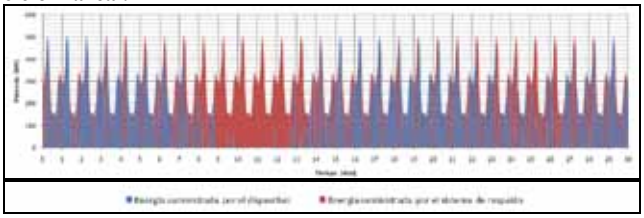
Figura 16: Distribución de energía con sistema de respaldo en dos días.



Fuente: Elaboración propia.

Además, es probable que se presente un déficit en los períodos de cuadratura, los que pueden tener duraciones de hasta 5 días (Figura 17), con una frecuencia entre 14 y 15 días.

Figura 17: Distribución de energía con sistema de respaldo en un ciclo mareal.



Fuente: Elaboración propia.

Durante el período de funcionamiento del proyecto, los peaks de consumo coincidirán con los instantes de déficit energético en reiteradas ocasiones. Este hecho da lugar a la necesidad de contar con un equipo de respaldo que permita satisfacer en todo momento la demanda del sistema, por lo que su capacidad instalada debe ser al menos igual a la potencia máxima instantánea estimada para la localidad.

Por otra parte, debido a las características del déficit ocasionado por los períodos de *estoa*, en lo que respecta a su relativa corta duración y alta ocurrencia, puede ser útil estudiar la posibilidad de utilizar un sistema de acumulación de energía (acumuladores o baterías) para suplir aquella parte del consumo que no es posible suministrar en forma directa. De este modo, puede aprovecharse aquella fracción de la energía generable que no está siendo consumida para suministrarla luego en los períodos que se requiera, disminuyendo los costos asociados a la operación de un sistema de respaldo. La alta duración del déficit asociado a los períodos de cuadratura, imposibilita el uso de sistemas de acumulación para el suministro de energía en estos intervalos, principalmente porque las dimensiones y capacidad de un sistema de estas características lo convierten en una alternativa extremadamente costosa, lo que confirma la necesidad de contar con un sistema de respaldo para tal efecto.

4. EVALUACIÓN ECONÓMICA PRELIMINAR.

Una evaluación económica preliminar permite obtener una aproximación de la factibilidad de desarrollar un determinado proyecto e identificar las variables de mayor relevancia para lograr su rentabilización. Actualmente los ejemplos más avanzados del uso de la tecnología para el aprovechamiento de las corrientes de marea con fines de generación eléctrica, están dados por algunos prototipos que han permitido comprobar la factibilidad técnica del uso de este recurso. Sin embargo, su producción aún dista bastante de los niveles adecuados para su comercialización. Por ello, no se conoce con certeza los costos asociados al uso de esta tecnología, aunque ciertas fuentes señalan que se trata de una de las alternativas con mayores costos por capacidad instalada (DTI, 2007).

5. CONCLUSIONES.

En general existe un contexto favorable para la implementación y desarrollo de sistemas basados en ERNC, tanto para generación de sistemas aislados como para generación en sistemas interconectados de gran capacidad.

Además de identificar los principales aspectos que deben considerarse para el estudio de esta tecnología, la metodología definida permite determinar aquellos que actualmente presentan mayores deficiencias y sobre los cuales deben abrirse nuevas líneas de investigación, tales como: necesidad de contar con normativas específicas que definan un marco legal claro para la implementación de esta tecnología; estudios para la optimización de variables relativas al funcionamiento de los dispositivos, contando para ello con un análisis detallado de los costos involucrados; estudio de la infraestructura portuaria y maquinaria nacional disponible para la instalación de dispositivos; estudios de los efectos medio ambientales sobre el flujo y especies de la zona (especialmente frente a usos intensivos del recurso) entre otros.

En lo que respecta al uso de esta tecnología para el suministro energético de localidades aisladas, se concluye que uno de los principales factores que dificulta su utilización radica en que la energía que efectivamente puede ser aprovechada está condicionada en gran medida por la variabilidad propia de la fuente y las características de la demanda, lo que conlleva a una reducción significativa de los factores de capacidad. Si se considera que esta tecnología se encuentra aún entre las más caras por unidad de potencia instalada, una reducción del factor de capacidad implica que montos importantes de dinero no están siendo utilizados.

Para el caso particular del lugar estudiado, independientemente del sistema de suministro energético que resulte conveniente, es indispensable conocer los planes de desarrollo de las principales industrias de la zona, ya que de acuerdo a las proyecciones realizadas, gran parte de la energía demandada podría provenir de este sector. Además, si éstas requirieran de un mayor suministro energético, la capacidad instalada debería aumentarse, con lo que podrían disminuirse significativamente los costos por potencia instalada en caso que resulte necesaria la instalación de un mayor número de dispositivos.

6. BIBLIOGRAFÍA.

La bibliografía presentada corresponde a una compilación de documentos que tienen directa relación con estudios específicos de energías de corrientes, además de referencias de carácter general que permiten sustentar el marco conceptual del estudio.

Brigham Young University (2005). Surface-water Modeling System. SMS 9.0.

Cáceres, M. (2004). Medición de Corrientes Islas Guaitecas.

CNE-PNUD Chile. (2006). Suministro eléctrico continuo de Melinka y Repollal, Comuna de Guaitecas, XI Región de Aysén.

DGTM (2006). Reglamento sobre concesiones marítimas. TM - 020. Valparaíso.

DTI (2007). Economic viability of a simple tidal stream energy capture device.

EPRI (2006). Methology for Estimating Tidal Current Energy Resources and Power Production by Tidal In-Stream Energy Conversion (TISEC) Devices.

EPRI (2006). Economic Assesment Methology for Tidal In-Stream Power Plants.

EPRI (2005). Tidal In Stream Energy Conversion (TISEC) Devices.

EPRI (2006). System Level Design, Performance, Cost and Economic Assessment - San Francisco Tidal In-Stream Power Plant.

EPRI (2006). In-Stream Tidal Power in North America - Environmental and Permitting Issues.

Foreman, M. (1977). Manual for tidal heights analysis and prediction.

García, R. (2009). Evaluación del potencial de la energía originada por corrientes de marea para generación en sistemas aislados. Valparaíso, Chile.

Hill, D. (2007). Glacier Bay Tidal Modeling Page – Reports and Publications.

Johnson, D. (2001). Wind Energy Systems Chapter 4 – Wind Turbine Power, Energy and Torque. Manhattan, KS.

Luettich, D. (2000). ADvanced CIRCulation Multi-dimensional Hydrodynamic Model. ADCIRC -CF 6/15/2000 . University of North Carolina.

Marine Current Turbine Ltd. (2007). Marine Current Turbines: Technical & Environmental Challenges.

Marine Current Turbines Ltd. (2007). Marine Current Turbines: an update.

Marine Current Turbines Ltd. (s.f.). SeaGen Technical Specifications.

McDonald, C. L. (2006). Automatic unstructured mesh generation for 2D shelf-based tidal models. Brigham Young University, Department of Civil and Environmental Engineering.

SHOA - CN 8111. (s.f.). Carta Náutica N° 8111 - Bahías y Puertos en Islas Guaitecas.

SHOA (2008). Catálogo de Cartas y Publicaciones Náuticas.

SHOA (1992). Glosario de marea y corrientes.

SHOA (2003). Especificaciones para la ejecución de sondajes.

SHOA (2005). Especificaciones Técnicas para mediciones y análisis oceanográficos.

SHOA (1999). Método oficial para el cálculo de los valores no armónicos de la marea.

SHOA (2000). Tablas de Marea.

USACE (1999). Coastal Engineering Technical Note IV-21.