

# UN SISTEMA DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ PARA ZONAS AISLADAS

Ignacio Martínez Neghme\*

*Existen en nuestro país numerosas zonas aisladas alimentadas por grupos electrógenos en base a combustibles fósiles. Eventualmente, un sistema eléctrico a base de energía undimotriz -energía que aprovecha el movimiento de las olas- podría complementar los actuales sistemas eléctricos.*



La denominada Energía Undimotriz es la tecnología utilizada para producir energía eléctrica mediante un dispositivo que aprovecha la energía generada por el movimiento oscilatorio de las olas. Algunos dispositivos utilizan la energía cinética de las olas, mientras que otros usan

la energía potencial de éstas. Esta energía es transformada mecánicamente y convertida en energía eléctrica, la cual es transportada a tierra mediante cables.

Su principal recurso es la presencia de olas, por lo que presentan un mejor desempeño en las zonas alejadas de la Línea del Ecuador, donde su potencial es mayor. Chile es privilegiado en este sentido, ya que diversos estudios avalan el alto potencial undimotriz de nuestras costas. El nivel de energía de las olas se define en términos de potencia por unidad de longitud [kW/m] y su potencia es proporcional al período y al cuadrado de la altura de la ola.

Los conversores de energía undimotriz o WECs (Wave Energy Convertors), son dispositivos que transforman la energía mecánica del oleaje en energía útil, en donde las olas puedan interactuar con la capacidad de resistir la fuerza que éstas ejerzan sobre el mismo.

\*Teniente 2º ING.NV.EL.

## Objetivo

El objetivo general de esta investigación es desarrollar un modelo para la implementación de un sistema eléctrico a base de energía undimotriz, identificando lugares aislados con características favorables para la extracción de esta energía y en base a estos antecedentes, determinar el tipo de dispositivo undimotriz y la configuración eléctrica más adecuada para su implementación.

## Metodología

La siguiente es la metodología propuesta como modelo para implementar un sistema eléctrico a base de Energía Undimotriz.

Lo primero es seleccionar un área general de interés para el estudio de implementación de un sistema de Energía Undimotriz. En este caso, fue seleccionada el área de la Alcaldía de Mar de Cabo de Hornos, por sus características favorables de recurso undimotriz y su condición de aislamiento de la red eléctrica.

Posteriormente, es necesario ser capaz de describir el sistema eléctrico del lugar donde se quiera instalar el sistema de Energía Undimotriz, con el propósito de poder dimensionar el consumo de energía y la potencia eléctrica necesaria para alimentar el sistema eléctrico.

De esta forma, es necesario efectuar un cuadro de cargas para poder dimensionar la potencia

necesaria que deberá tener el sistema de Energía Undimotriz, así como también, una estimación del consumo diario de energía eléctrica, mensual y anual del lugar.

Cuadro de Cargas	
Potencia requerida del sistema	13,54 [kW]

Cuadro de Cargas	
Consumo estimado en base a consumo de combustible diesel	Anual: 26,07 [MWh]

■ Tabla N°1: Resultados cuadros de cargas y consumos en Cabo de Hornos.

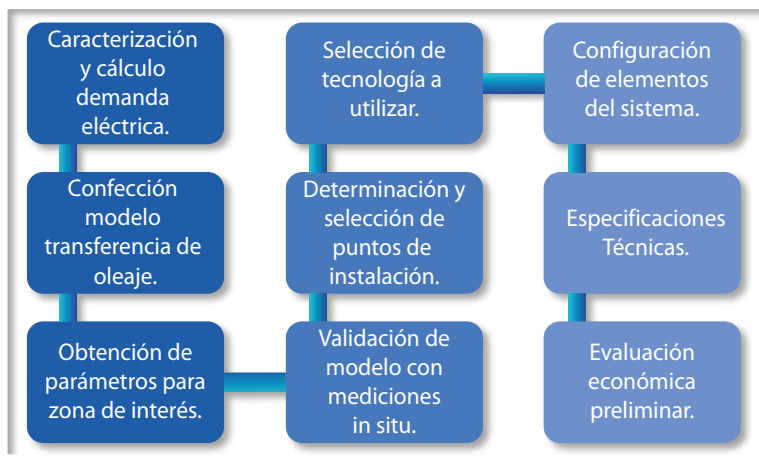
Luego, es necesario conocer las características generales del oleaje en la zona indicada. Para esto existen diversos estudios de olas; si el lugar no posee, es necesario efectuar una transferencia de oleaje para verificar los puntos de mayor potencial energético.

En este caso, el modelo de transferencia de oleaje se desarrolló utilizando el Nodo 565 de la base de datos de olas del Proyecto Olas Chile IV (Propiedad de la empresa Baird & Associates), el Modelo numérico STWAVE (STeady state spretral WAVE model), versión 4.0 desarrollado por el US Army Corps of Engineers (USACE), el

software SMS (Surface Water Modelling System) que es la interfaz gráfica del modelo STWAVE y la batimetría obtenida de la digitalización de las cartas náuticas del sector.

Para la obtención de los parámetros de la zona de interés, se calculó la potencia promedio según el método desarrollado en el paper "Evaluation of the Potential of Wave Energy in Chile"

(Monárdez y Acuña), la cual es definida como la tasa media de transferencia de energía por



■ Figura N°1: Metodología de estudio.

unidad de ancho, a través de un plano vertical perpendicular a la dirección del oleaje.

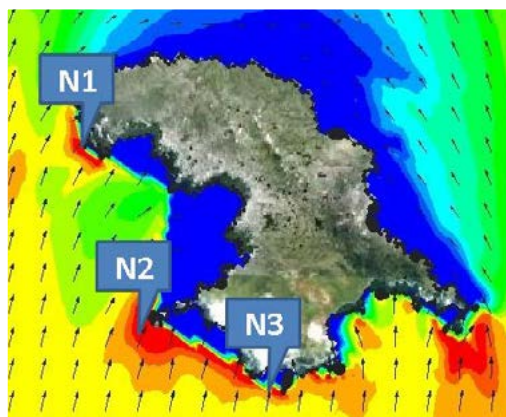
La potencia del oleaje fue calculada del espectro rearmado en aguas someras y la celeridad del grupo de olas, utilizando la expresión:

$$P = \rho g \int_0^{\infty} \int_0^{2\pi} S(f, \theta) C_g(f, h) df d\theta$$

Donde "P" es la potencia media,  $\rho$  el valor de densidad del agua de mar, "S" es la energía espectral como función de la frecuencia (f) y la dirección ( $\theta$ ),  $C_g$  es la celeridad del grupo de olas como función de la frecuencia y de la profundidad del agua en metros (h).

Finalmente se obtuvieron los siguientes parámetros en tres zonas de mayor potencial de energía por metro de frente de ola en isla Hornos, indicadas en la figura N°2.

Con el objetivo de validar la información entregada por el modelo, se compararon las mediciones in situ de altura de ola, en un punto cercano al lugar de estudio. Esta información de mediciones históricas, fue proporcionada



■ Figura N°2: Mapa de energía isla Hornos.

Nodo	Potencia promedio [kW/m]
N1	61,7
N2	68,2
N3	65,2

■ Tabla N°2: Potencias promedios en nodos de estudio.

por el CENDHOC (Centro Nacional de Datos Hidrográficos y Oceanográficos) a través de mediciones registradas por una boya Waverider, y a su vez, fueron comparadas con el modelo de transferencia efectuado (ver figura N°3).

Posteriormente, se eligieron los criterios de selección para determinar el lugar más apropiado de instalación del sistema. Un aspecto fundamental es el grado de exposición al oleaje, ya que la presencia de obstáculos genera zonas protegidas de baja altura de ola, que no son recomendables para instalar una central de energía undimotriz. Otro aspecto a considerar es la variación de la potencia del oleaje en zonas relativamente pequeñas en torno a un determinado punto producto de la configuración de la batimetría, que inducen fenómenos tales como la refracción. Otro elemento a tener en cuenta, es la distancia desde nuestro nodo de propagación a la línea de costa, la cual va variando de acuerdo a sus características morfológicas. Como ejemplo se puede mencionar el caso de las bahías, las que en general, se caracterizan por tener pendientes suaves, mientras que en torno a las puntas o salientes, la batimetría desarrolla pendientes más elevadas.

Los criterios básicos escogidos para evaluar el mejor sitio de instalación de un equipo undimotriz en una zona aislada, son los siguientes:

- Recurso energético de olas.
- Batimetría.
- Cercanía a la carga eléctrica.
- Zonas especiales.
- Distancia a lugares de interés turístico.
- Distancia a rutas de navegación.

Para poder seleccionar que tecnología de dispositivo undimotriz es la más adecuada para la zona de interés, se hace necesario realizar una valoración de las características más importantes de cada uno, con el propósito de ser capaz de evaluar en forma objetiva, cuál de ellos se adapta de mejor manera a las características del oleaje del sector.

Finalmente, se establecieron los siguientes criterios y subcriterios para la selección del tipo de tecnología undimotriz más adecuado para ser instalado en el sitio de selección en el Cabo de Hornos:

- Aspectos técnicos.
- Madurez tecnológica.

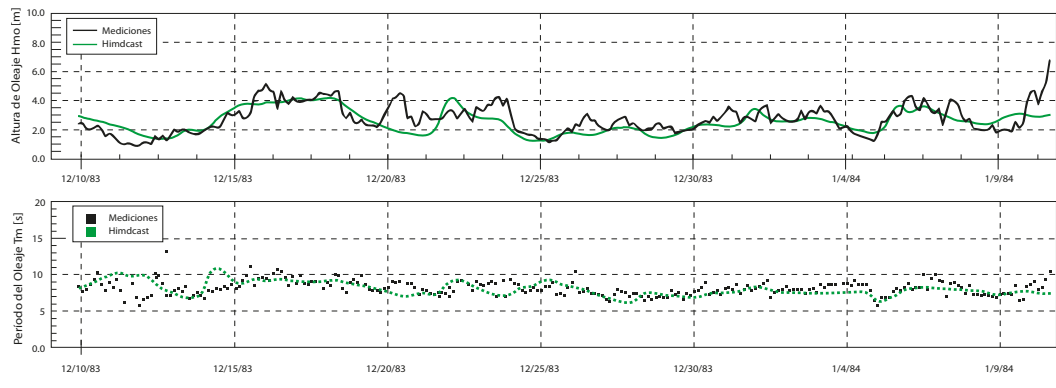


Figura N°3: Gráfico de comparación Modelo Transferencia de oleaje v/s Waverider.

- Supervivencia en condiciones atmosféricas adversas.
  - Máxima condición de ola.
  - Máxima condición de viento.
- Aplicación al sitio.
- Potencia de salida.
- Profundidad y distancia de costa.
- Prestigio del fabricante del dispositivo.

Una vez que se haya seleccionado el sitio y la tecnología de convertidor de energía de las olas a utilizar, se procede a desarrollar la configuración que más se ajuste a los objetivos propuestos del proyecto.

En el caso de lugares aislados del sistema interconectado, lo usual es que utilice un sistema de ERNC (Energía Renovable No Convencional) respaldado por un sistema basado en combustible fósil, como lo son generadores diesel. De esta manera, se pueden reducir los costos de operación de manera significativa. En el caso de la energía undimotriz se ha dicho que “la energía de las olas es entre cinco y diez veces más intensa que la proveniente del viento y el sol respectivamente, lo cual la convierte en una atractiva fuente de energía.”<sup>1</sup>

Un sistema híbrido de poder, es un sistema eléctrico de potencia que incluye más de un tipo de conversión de la energía en él. Existen diversos tipos de sistemas híbridos, los cuales implican diferentes alternativas de combinaciones de sistemas de ERNC, como

también, de energías no renovables y sistemas de almacenamiento varios (baterías, volante de inercia, celda de combustible de hidrógeno, etc.). El sistema híbrido de potencia es capaz de proveer la potencia requerida a las cargas conectadas con un control adecuado y una efectiva coordinación entre varios subsistemas.

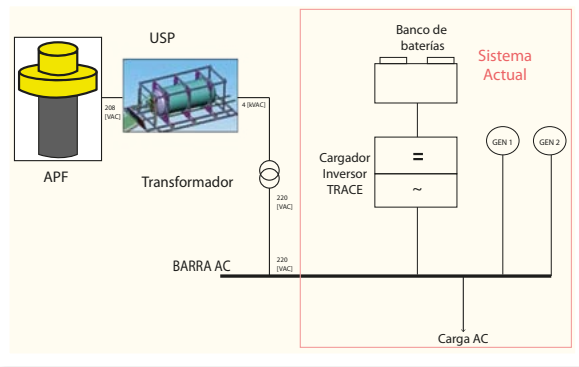
Algunas consideraciones a tener en cuenta para la conformación del sistema eléctrico híbrido:

- Variación de la energía: Debido a la irregularidad en la amplitud, fase y dirección de la ola es difícil obtener una máxima eficiencia en la conversión de energía.
- Problemas para acoplar el movimiento irregular de la ola a los generadores eléctricos.
- La función intermitente de la onda requiere de un sistema de almacenamiento de energía para alimentar las cargas de la red, sin tener perturbaciones y ruido, de esta manera, puede asegurar la estabilidad del voltaje del enlace de energía, la calidad de ésta y la confiabilidad.

Se propone un SHGEE (Sistema Híbrido de Generación de Energía Eléctrica) de baja potencia compuesto de un generador de energía undimotriz en combinación con un sistema de grupos generadores Diesel, tal como lo muestra la figura N° 4.

El SHGEE trabaja con un dispositivo de conversión de energía undimotriz, el cual, entrega energía eléctrica de 208 [VAC] y 60 [Hz] de frecuencia

1. Ozkop, E., Altas, I.H. y Sharaf, A.M. A Novel Fuzzy Logic Tansigmoid controller for wave energy converter-grid interfase DC energy utilization farm . s.l.: IEEE.



■ Figura N°4: SHGEE undimotriz para isla Hornos.

(por diseño). Luego, una subestación submarina eleva la tensión de salida a 4 [kVAC]. La energía en media tensión es transmitida por cables submarinos hacia la costa. Una vez en tierra, la energía es transmitida por cables subterráneos hacia la subestación reductora de la Alcaldía de Mar Cabo de Hornos. La subestación reduce la media tensión a 380 [VAC] trifásico. La energía eléctrica es distribuida en la barra AC de la Alcaldía. Finalmente, el cargador/inversor Trace será utilizado como convertidor bidireccional. En resumen, se puede alimentar la barra desde tres elementos, el generador undimotriz, el banco de baterías o de los generadores. A su vez, el banco de baterías, a

través del cargador/inversor actúa como carga de la barra AC, cargando el banco de baterías cuando éste se descargue bajo cierto punto.

Finalmente, es necesario estimar los costos involucrados, para esto se propone una evaluación económica preliminar. Entre los costos principales que se deben considerar en un proyecto de energía undimotriz, se encuentran: costos por inversión del equipo, instalación, conexión y transmisión de energía. Muchos de estos costos no son conocidos, debido al reciente desarrollo de

esta tecnología, por lo que se deben estimar.

Como factores que influyen en los costos de este tipo de proyectos, se encuentran: la falta de producción industrial en este tipo de dispositivos y sus altos costos de inversión inicial, lo que encarece sus valores, tendencia que debiera disminuir con el desarrollo tecnológico.

En resumen, deben ser considerados:

- Costos de inversión inicial.
- Costos por operación y mantenimiento.
- Costos por desmantelamiento al final de vida útil.

Finalmente, los costos fueron estimados en base a trabajos de ingeniería marítima y de costa.



■ Imagen del proyecto undimotriz Pelamiz, Portugal.

Ítem	Valor
Inversión inicial [USD]	6 697 732
Operación y mantenimiento [USD/año]	2416,13
Desmantelamiento año 30 [USD]	3200

■ Tabla N°3: Costos totales sistema undimotriz.

Por último, es necesario efectuar un flujo de caja, considerando un horizonte de evaluación de los años que considere el proyecto. De esta manera, se pueden obtener los indicadores de evaluación del proyecto de Valor Actual Neto (VAN) y Tasa Interna de Retorno (TIR), además de los costos de una central undimotriz. En este caso, utilizando una tasa de descuento del 8%, nos entrega un VAN negativo (USD -6 379 655) y una TIR no aplicable, considerando un horizonte de evaluación a 30 años.

## Conclusiones y recomendaciones

Se desarrolló un modelo para la especificación de un sistema de energía undimotriz para zonas aisladas, el cual incluye dimensionamiento de la carga eléctrica, modelo de transferencia de

oleaje, verificación de parámetros con datos de olas in situ, selección del sitio y tecnología undimotriz a instalar, configuración de un sistema de generación y desarrollo de especificación técnica del proyecto, para incluir finalmente su evaluación económica preliminar.

Se aplicó este modelo a la isla Hornos, siendo técnicamente viable la configuración de un sistema de generación undimotriz para esta zona.

Un sistema de generación a base de energía undimotriz para zonas aisladas, no es aún económicamente rentable. La tecnología todavía se encuentra en etapas tempranas de desarrollo, esto sumado a los altos costos de inversión inicial, producto de los distintos trabajos de ingeniería marítima, hacen difícil una reducción de éstos, sumado a la falta de una economía de escala mayor en su producción.

Para poder hacer costo-efectivo este tipo de proyectos en este tipo de zonas, es necesario reducir considerablemente los costos de inversión inicial e implementar políticas de economía de escala, logrando de esta manera, que la energía undimotriz entre a competir de igual a igual con otros tipos de ERNC, representando una solución energética para las comunidades aisladas en general.

\*\*\*

## BIBLIOGRAFÍA

1. *Technologies, Ocean Power. Ocean Power Technologies. [En línea] 2014. <http://www.oceanpowertechnologies.com/spain.html>.*
2. *Smith, J.M., Sherlock, A.R., Resio, D. STWAVE: Steady State Spectral Wave Model User's Manual for STWAVE, Version 3.0. s.l. : US Army Corps of Engineers., 2001.*
3. *Monárdez, P., Acuña, H., Scott, D. Evaluation of the Potential of Wave Energy in Chile. Estoril: Proceedings of the ASME 27th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. OMAE, 2008.*
4. *Ozkop, E., Altas, I.H. y Sharaf, A.M. A Novel Fuzzy Logic Tansigmoid controller for wave energy converter-grid interfase DC energy utilization farm . s.l. : IEEE.*