

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**OPEN SEA LAB: UN PROYECTO DE ENERGIA MARINA UNDIMOTRIZ A
ESCALA REAL EN CHILE.**

JAIME CORTÉS.¹
LEANDRO SUAREZ.²
FELIPE LUCERO.³
CRISTIAN ESCAURIAZA.⁴

RESUMEN

Los avances en las tecnologías de generación de energía a partir del oleaje han permitido el desarrollo de plataformas integradas de medición alimentadas por el movimiento del agua. Esto permite poder tener instrumentos de medición de largo plazo, y al mismo tiempo poder analizar la generación de tecnología a partir de energías marinas y estudiar su interacción con el entorno y la vida marina. En este trabajo, se presentan los principales resultados del Open Sea Lab (OSL), el primer observatorio de la costa alimentado por la energía de las olas en latino américa, durante el periodo que estuvo instalado. Se muestran las diferentes etapas del proyecto y los datos obtenidos, de la instalación y operación del sistema, la generación de energía, y las mediciones físicas realizadas por los diversos instrumentos. Estos datos pioneros permiten seguir avanzando hacia el desarrollo en energías marinas en la región.

¹ Ingeniero de investigación, Marine Energy Research and Innovation Center (MERIC) - email: jaime.cortes@meric.cl

² Ingeniero de investigación, Marine Energy Research and Innovation Center (MERIC) - email: leandro.suarez@meric.cl

³ Coordinador I+D, Marine Energy Research and Innovation Center (MERIC) - email: felipe.lucero@meric.cl

⁴ Profesor Asociado, Depto. Ing. Hidráulica y Ambiental UC. cescauri@uc.cl

1. INTRODUCCION

Chile tiene una gran conexión con el mar y sus 4,000 km de costa, con un potencial de energías de olas del orden de 30 kW/m en la zona central de Chile (Lucero et al., 2017). Esta conexión privilegiada también conlleva grandes desafíos, debidos a la creciente actividad humana y la presión sobre ecosistemas costeros, y la dificultad para poder obtener mediciones oceanográficas en la costa de alta resolución, para poder mejorar nuestra comprensión de los procesos costeros.

Para poder avanzar en la caracterización de la costa chilena, se ha creado el Centro Tecnológico MERIC (Marine Energy Research & Innovation Center), un consorcio público-privado donde confluyen el Ministerio de Energía, CORFO, la ANID, Naval Group, Enel Green Power Chile, la Pontificia Universidad Católica de Chile y la Universidad Austral de Chile. Este consorcio desarrolla proyectos de investigación relacionados a la energía marina como: evaluación de recurso, caracterización de sitios, evaluación de corrosión marina, evaluación de desarrollo de biofouling, estudios sobre adaptación de tecnologías a condiciones y restricciones locales, todos ellos a escala de simulaciones y modelos matemáticos, en laboratorios y bancos de prueba en mar abierto.

El proyecto Open Sea Lab se enmarca en el centro MERIC de manera transdisciplinar, para poder probar un equipo a escala real capaz de producir energía eléctrica, y consiste en la implementación de una boya de monitoreo autoabastecida por energía de las olas, que servirá de plataforma para el estudio de la interacción entre este tipo de dispositivo y el ambiente marino chileno. El objetivo principal del proyecto consiste en estudiar el potencial de la energía marina renovable y los efectos de la interacción entre los dispositivos de conversión de energía con el medioambiente chileno en condiciones de mar real. Adicionalmente, los datos generados por este sistema son disponibles para ser utilizados por otros actores relacionados al ámbito marítimo, tales como comunidades costeras, entidades públicas y otras instituciones de investigación.

Este artículo presenta las distintas características del proyecto Open Sea Lab, así como su implementación, y los datos que se recolectaron.

2. MATERIAL Y METODOS

2.1 Esquema general

El Open Sea Lab se encuentra ubicado en la comuna del Tabo, IV región, en la cercanía de la bahía de Cartagena, y a proximidad del Área Marina Costera Protegida de la Estación Costera de Investigaciones Marinas (ECIM) de la Pontificia Universidad Católica de Chile, tal como se puede ver en la Figura 1. El instrumento principal consiste en una boya oceanográfica autoabastecida por energía undimotriz, fabricada por Ocean Power Technologies (OPT), modelo PowerBuoy3 (PB3) (Parsa et al., 2017). Este tipo de dispositivo ha sido instalado en distintos lugares del mundo, demostrando su robustez para operar bajo condiciones extremas. Su principio de funcionamiento se basa en el

movimiento lineal relativo entre la parte flotante (float) y el cuerpo de la boya (spar), el que es convertido por un sistema mecánico a movimiento rotativo, conectado a un generador eléctrico. Esta boya permite abastecer diversos instrumentos en el agua, que es complementada por mediciones en tierra.



Figura 1. Ubicación del proyecto, frente al área marina costera protegida de ECIM, comuna del Tabo, IV Región.

2.2 Boya e instrumentación

En la Tabla 1 se indican las características principales del dispositivo y en la Figura 2 se muestra una imagen referencial del mismo.

Los datos obtenidos por los sensores de la boya, alimentados por la energía del oleaje, son transmitidos en tiempo real (por WiFi de largo alcance) a la estación en tierra. Esta información, complementada con la información de la estación en tierra, es almacenada y transmitida en tiempo real a un servidor web. Este servidor pone a disposición la data recolectada a los usuarios mediante una página web.

Respecto al sistema de fondeo y su instalación, éste consiste en tres líneas, con sus respectivos muertos o anclas, dependiendo del tipo de fondo marino. Además, cuenta con tres boyas auxiliares (Figura 3).

Tabla 2. Características técnicas de la boya OPT PB3

DIMENSIONES	PARTE ELECTRICA
Altura: 13.3 m	Potencia Continua de la Carga Útil: 850 W
Calado: 9.28 m	Potencia Peak : 3 kW
Diámetro parte fija (mástil): 1 m	Capacidad de batería: 50 kWh
Diámetro parte móvil (Flotador): 2.65 m	Salida 24 Vcc
Peso: 8,300 kg	ANCLAJE
	Anclaje de 3 puntos, con boyas intermedias y anclas. Profundidad mínima 25 m.

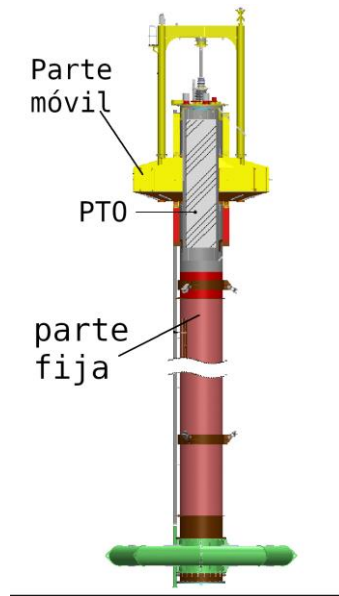


Figura 2. Boya OPT PB3 Con la parte fija gracias a las anclas, el Power Take Off (PTO) que genera la energía y la parte móvil que se mueve con el oleaje

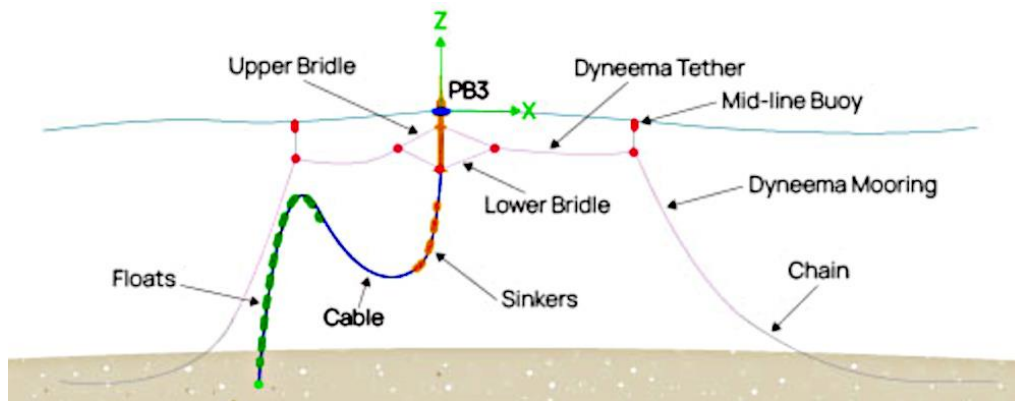


Figura 3: Sistema de fondeo de la boya PB3

El proyecto Open Sea Lab cuenta con una serie de sistemas de monitoreo, En las Tablas 2 y 3 se muestran los equipos que se instalaron en mar y en tierra durante el proyecto, respectivamente.

Tabla 2. Sistemas de monitoreo en mar

SISTEMA	DESCRIPCIÓN
Sensores ambientales	Sensores ambientales a 5 y 15 m de profundidad: Temperatura, Conductividad, pH, Oxígeno disuelto, Turbidez, Clorofila, Amonio, Nitrato, Gases disueltos (TDG)
ADCP	ADCP conectado por cable a OPT PB3
Celdas de carga	Celdas de carga en líneas de fondeo para monitoreo de fuerzas ejercidas en ellas.
Porta probetas	Porta probetas para monitoreo de biofouling y biocorrosion

Tabla 3. Sistemas de monitoreo en tierra

SISTEMA	DESCRIPCIÓN
Radar banda X	Monitoreo de oleaje en tiempo real, en un radio de hasta 4 km.
Estación meteorológica	Mediciones de variables climáticas, ejemplo: velocidad del viento, temperatura, etc.
Cámara(s)	Monitoreo de la boya undimotriz, desde tierra.
Sistema de respaldo y distribución de datos	Servidor para almacenamiento y distribución de los datos obtenidos.

2.3 Condiciones de oleaje

Las condiciones de oleaje a proximidad de la boyas se estiman a partir de una base de datos de oleaje en aguas profundas obtenida por modelación numérica y validada por mediciones de boyas y ADCP en varias zonas de Chile. Estos datos son propagados a zonas costeras por un método de transferencia espectral que ha sido validado (Lucero et al., 2017).

Los datos de aguas profundas se obtienen a partir de un hindcast global con datos sintéticos generados por Fugro Oceanor AS a partir de un reanálisis con el modelo WAM, validado con datos de boyas de oleaje. Los datos sintéticos consideran un periodo de 22 años en el periodo 1989-2013 en ocho puntos localizados en aguas profundas, entre las latitudes 33°S y 42°S.

Los datos sintéticos de aguas profundas son entonces utilizados para poder propagar los climas de oleaje hacia aguas someras. Para poder obtener datos espectrales por un periodo de 20 años en cualquier punto de la zona considerada, se utiliza un método de reconstrucción del espectro del oleaje en aguas someras con el objeto de reducir los costos computacionales. Este método consiste en combinar linealmente espectros unitarios propagados en los puntos de interés. Estos espectros unitarios consideran un espectro de tipo JONSWAP con $\gamma = 3.3$ y un factor de escala para que la altura de ola significativa sea $H_{m0} = 1$ m para la frecuencia peak deseada.

Los espectros unitarios son propagados espectralmente a través del modelo numérico SWAN, e incluye los procesos de generación, disipación y redistribución de la energía. En aguas profundas, modela los procesos de generación por viento, whitecapping y quadruplet wave-wave interaction, en aguas someras incluye los procesos de fricción, asomeramiento, y triadas wave-wave interaction.

Para la modelación global se prepararon grillas con 3 niveles de resolución, la primera de 500 metros de resolución, la segunda más cerca de la costa con 100 metros de resolución y la tercera grilla con 25 metros de resolución, tal como se aprecia en la Figura XX, para así poder propagar los nodos obtenidos de la base de datos de aguas profundas hacia la costa y poder validar la propagación del oleaje hacia la costa con datos ADCP (Lucero et al., 2017).

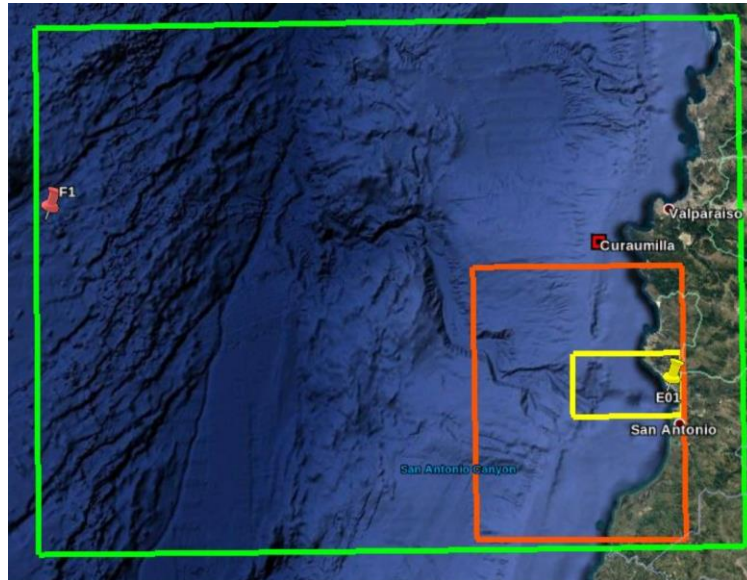


Figura 4: Límites de las grillas usadas para la propagación del oleaje con el modelo numérico SWAN. El rectángulo verde representa la grilla de resolución 500 metros, el rojo la grilla de resolución 100 metros y el amarillo la grilla de resolución 25 metros. El punto F1 corresponde al dato sintético de aguas profundas, el cuadrado rojo cerca de Curaumilla indica la posición de la boya donde se validaron los datos, el punto E01 indica la posición de la zona de estudio.

En relación con el clima operacional presente en la zona, este contiene un gran porcentaje (sobre 80%) de oleaje proveniente del Sur-Oeste (220-240°) lo cual es lo habitual en los climas de oleaje presentes en el país; estos climas presentan alturas significativas entre 1 y 2 metros con periodos peaks entre los 11 y 19 segundos, y periodos energéticos entre 10 y 14 segundos.

El clima extremo se estimó utilizando la metodología Peak Over Threshold, considerando un umbral de 2,0 metros correspondiente al cuantil 85 de la serie completa de altura significativa y con un espaciamento de tormentas de 7 días. De esta, se estimó el periodo de retorno de 100 años para la altura significativa obteniendo un valor de 4,1 metros, con la distribución que presentó el mejor ajuste (Weibull, $k = 1,4$)

La potencia teórica del oleaje P_0 del oleaje se estima a través de la altura significativa H_{m0} y el periodo energético T_e con la formula siguiente:

$$P_0 = \frac{\rho g^2}{64 \pi} T_e H_{m0}^2 \quad (1)$$

Para el sitio considerado, se pueden observar los diagramas bivariados en las Figuras 5 y 6. El rango de potencias es menor a 30 kW/m en un 87% de los casos, siendo predominante (40%) la potencia entre 10-20 kW/m. La media es cercana a los 15 kW/m, presentando más del 90% potencias sobre los 7 kW/m y en un 10% potencias de 32 kW/m, teniendo como

máximo potencias de 100 kW/m. En relación con la potencia mediana mensual, esta presenta máximos de 20 kW/m con variaciones no significativas entre meses. Finalmente, en relación con la variabilidad estacional está indica tener una baja variabilidad entre la potencia media mínima y máxima de 20-30%.

Hs\Tp	7 - 9	9 - 11	11 - 13	13 - 15	15 - 17	17 - 19	19 - 21	21 - 23	23 - 25	25 - 27	% Total
0.25 - 0.5	0	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0	0.1%
0.5 - 0.75	0.0	0.1	0.6	0.4	0.2	0.3	0.0	0	0	0	1.7%
0.75 - 1	0.1	0.5	2.2	2.1	1.1	0.9	0.2	0	0	0	7.1%
1 - 1.25	0.4	1.0	3.9	4.9	3.5	2.3	0.3	0.0	0	0	16.3%
1.25 - 1.5	0.3	1.8	3.6	6.2	5.4	3.3	0.4	0.0	0	0	21.0%
1.5 - 1.75	0.1	1.8	3.3	4.8	6.3	4.3	0.5	0.0	0	0	21.1%
1.75 - 2	0.0	1.0	2.2	2.9	5.2	5.1	0.4	0.0	0	0	16.8%
2 - 2.25	0	0.5	1.0	1.3	2.8	3.6	0.4	0	0	0	9.5%
2.25 - 2.5	0	0.1	0.4	0.4	1.1	1.7	0.2	0	0	0	3.8%
2.5 - 2.75	0	0.0	0.2	0.2	0.4	0.7	0.1	0	0	0	1.6%
2.75 - 3	0	0	0.0	0.1	0.2	0.3	0	0	0	0	0.6%
3 - 3.25	0	0	0	0.0	0.1	0.1	0	0	0	0	0.2%
3.25 - 3.5	0	0	0	0	0.0	0.1	0	0	0	0	0.1%
3.5 - 3.75	0	0	0	0	0	0.0	0	0	0	0	0.0%
3.75 - 4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0%
% Total	1.0%	6.9%	17.6%	23.1%	26.3%	22.8%	2.3%	0.1%	0.0%	0.0%	100.0%

Figura 5. Diagrama bivariado de altura significativa Hs y periodo peak Tp

Hs\Dp	200 - 220	220 - 240	240 - 260	260 - 280	280 - 300	300 - 320	% Total
0.25 - 0.5	0	0.1	0	0	0	0	0.1%
0.5 - 0.75	0.2	1.4	0.1	0.0	0	0	1.7%
0.75 - 1	0.5	5.9	0.6	0.1	0.0	0	7.1%
1 - 1.25	0.8	14.1	1.1	0.2	0.0	0	16.3%
1.25 - 1.5	0.9	18.5	1.4	0.2	0.1	0	21.0%
1.5 - 1.75	0.4	19.2	1.1	0.2	0.1	0	21.1%
1.75 - 2	0.1	15.5	1.0	0.2	0.1	0	16.8%
2 - 2.25	0.0	8.7	0.6	0.1	0.1	0	9.5%
2.25 - 2.5	0.0	3.5	0.2	0.0	0.1	0	3.8%
2.5 - 2.75	0.0	1.4	0.1	0.0	0.0	0	1.6%
2.75 - 3	0	0.5	0.1	0.0	0.0	0	0.6%
3 - 3.25	0	0.2	0.0	0.0	0.0	0	0.2%
3.25 - 3.5	0	0.1	0.0	0.0	0.0	0	0.1%
3.5 - 3.75	0	0.0	0.0	0.0	0.0	0	0.0%
3.75 - 4	0	0	0	0	0	0	0.0%
% Total	3.0%	88.9%	6.4%	1.1%	0.6%	0.0%	100.00%

Figura 6. Diagrama bivariado de altura significativa Hs y dirección peak Dp

3. OPERACION Y MANTENCION

3.1 Instalación de la boya – 2020

La fecha original de despliegue del proyecto era abril 2020, sin embargo, con la llegada de la pandemia por COVID19 en marzo de ese mismo año a Chile y su consecuente cuarentena total, no permitieron instalar el proyecto en esa fecha. En noviembre 2020, con la pandemia un poco más controlada, se decide programar la instalación para diciembre de ese mismo año.

A partir de la segunda semana de diciembre, se iniciaron los trabajos en el puerto de San Antonio y en las instalaciones de la Estación Costera de Investigaciones Marinas (ECIM), de la Pontificia Universidad Católica de Chile, ubicada en Las Cruces, Región de Valparaíso, donde se realizaron los siguientes trabajos:

En el puerto de San Antonio:

- Ensamblaje final del PB3
- Conexión de cable umbilical y cajas de uniones
- Prueba de comunicación y funcionamiento.

En ECIM:

- Instalación y configuración de radar de banda X
- Instalación de antena wifi
- Instalación de 2 racks con servidores, monitores, módems, equipos de almacenamiento, entre otros.

3.2 Instalación de la boya – 2021

Debido al alza de los contagios y la cercanía de las fiestas de fin de año, se decidió no instalar los equipos en mar, esperando una mejora en la situación del país. Luego de algunos meses de negociaciones para poder terminar el despliegue completo del Open Sea Lab en Las Cruces, se programaron los trabajos en el mar a partir del 6 de abril. Desde esta fecha y hasta el Domingo 18 de abril, se ejecutaron los siguientes trabajos (Figuras 7,8,9):

- Pruebas de tracción con 3 anclas, en 3 posiciones diferentes
- Instalación de 3 anclas y sus líneas, con boyas auxiliares de superficie
- Instalación de la boya PB3
- Pruebas de comunicación y funcionamiento

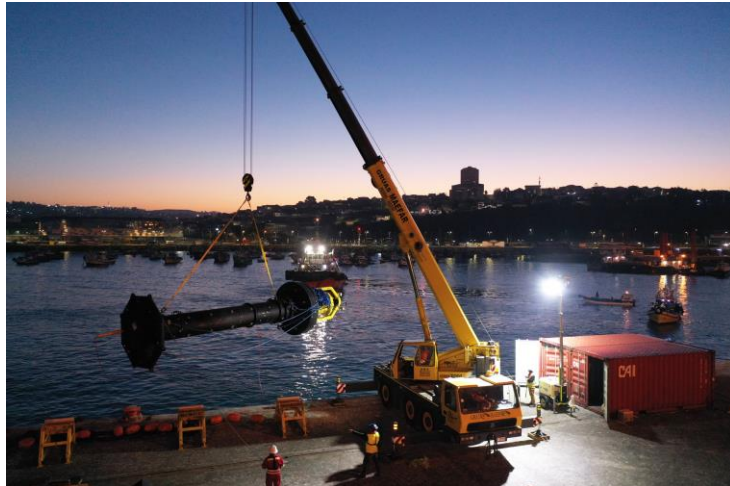


Figura 7. La boya PB3 en el puerto de San Antonio

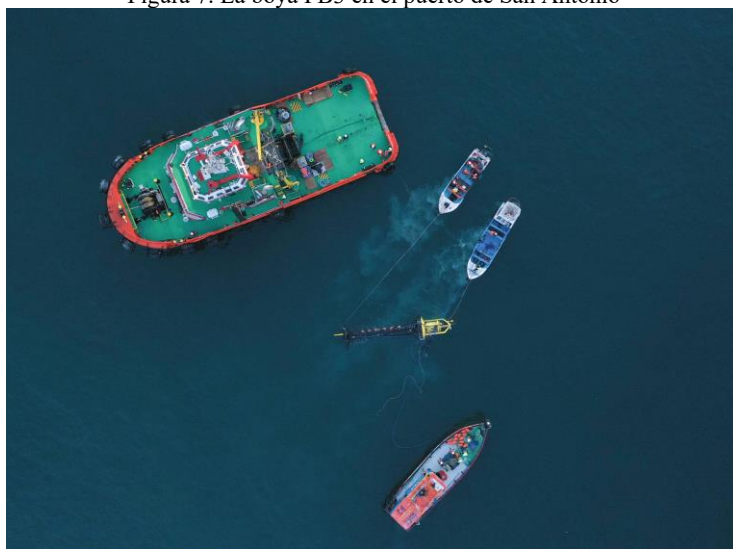


Figura 8. La boya PB3 es llevada a su sitio de despliegue frente al ECIM.



Figura 9. La boya PB3 en posición vertical, lista para generar energía a partir del oleaje.

3.3 Operación de la boya – 2021-2023

La boya estuvo generando energía eléctrica desde 2021 hasta 2023, a la excepción de periodos de mantención. De este punto de vista, el proyecto ha permitido obtener datos sobre la generación en un lugar expuesto al oleaje, en la zona central de Chile.

En cuanto a la instrumentación, los sensores en tierra funcionaron bien durante todo el periodo, pero los sensores en el mar tuvieron problemas, a pesar de tener energía suficiente para funcionar, debido al cable de conexión y transmisión de datos, que impidió obtener datos durante parte del proyecto.

Finalmente, en el invierno 2023, la boya se retiró del agua para revisión, y llevada de vuelta a Estados Unidos, por el fin de esta etapa del proyecto.

4. RESULTADOS

Respecto de la producción total, esta se puede entregar de forma adimensionalizada, por temas de confidencialidad, y se ve su variación horaria en el periodo en que se pudieron recabar datos de la boya, entre abril de 2021 y junio de 2023 en la Figura 10. Se puede notar una gran variabilidad horaria, lo que muestra que, si bien la boya produce de manera continua, la distribución del oleaje implica que existe una gran variabilidad dentro del mismo día. Esta variabilidad se ve también reflejada en la altura significativa y el periodo energético. Es necesario también recabar que la boya no ha dejado de producir con oleaje mayor, con alturas de olas significativas superiores a 3 m.

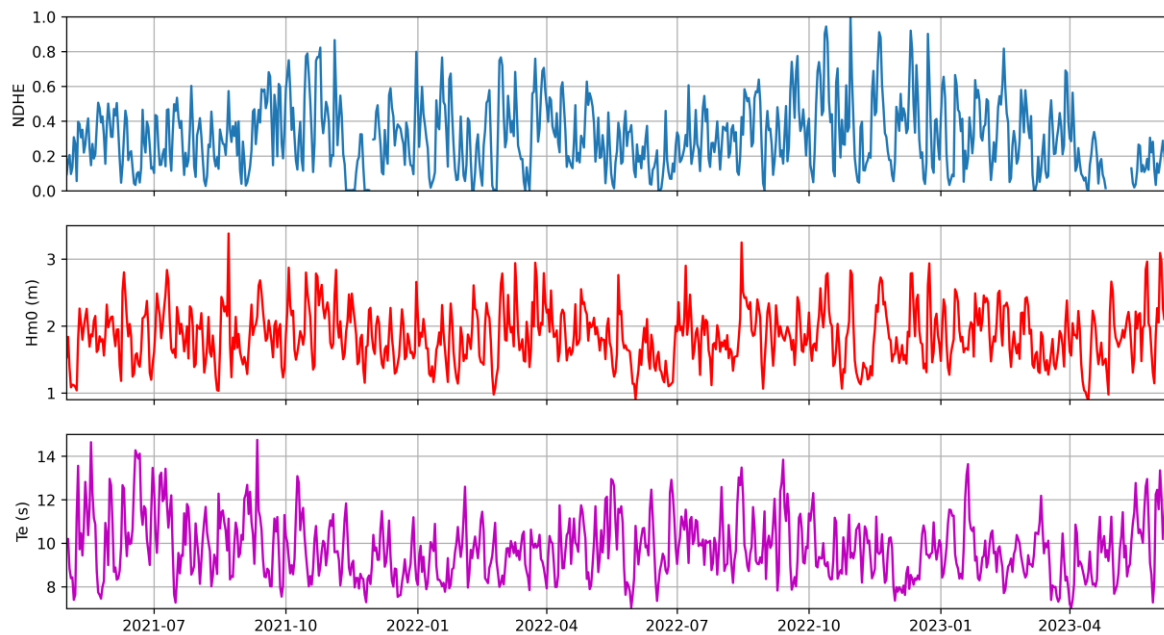


Figura 9. Energía producida a nivel horario adimensionalizada (NDHE), altura significativa (Hm0) y periodo energético (Te) obtenidos de un hindcast del modelo Swan (Lucero et al., 2017).

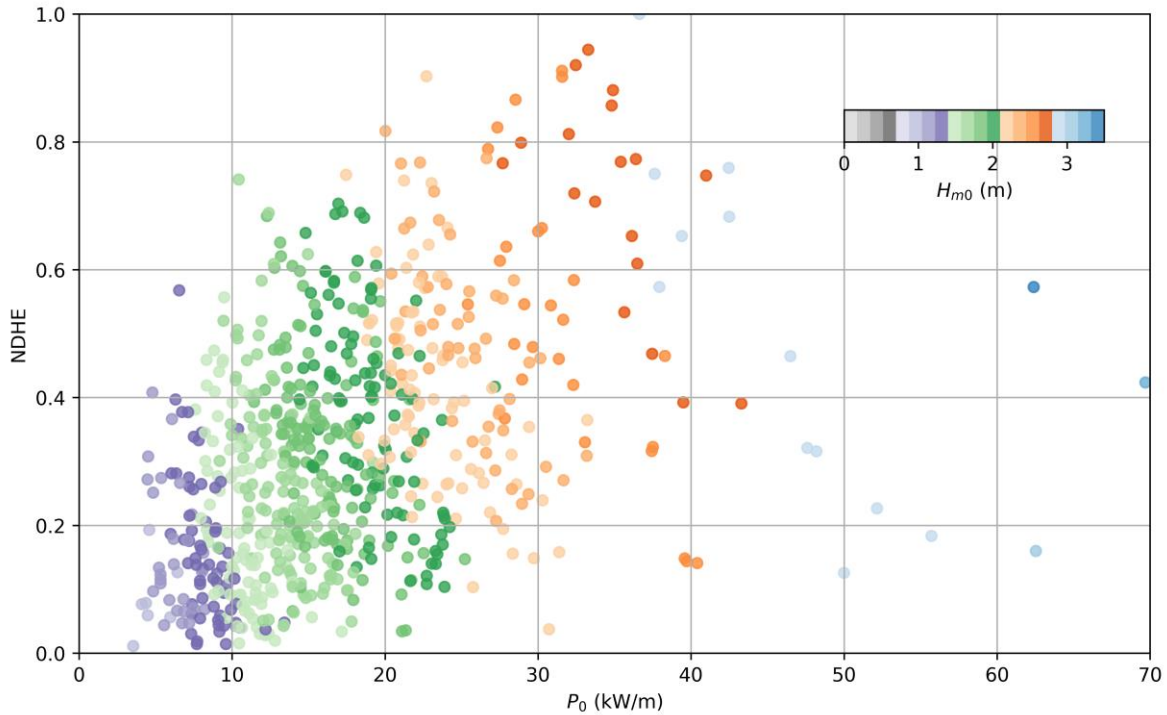


Figura 10. Energía producida a nivel horario adimensionalizada (NDHE) y potencia teórica P_0 , considerando la altura significativa (H_{m0}) en color obtenidos de un hindcast del modelo Swan (Lucero et al., 2017).

En la Figura 10, se puede comparar la Energía producida a nivel horario adimensionalizada y la potencia teórica del oleaje, considerando la altura significativa. La potencia generada aumenta linealmente con la potencia teórica, con una dispersión en cuanto a valores. La producción de la boya fue máxima para alturas significativas del orden de 2.7 m y una potencia teórica de 35 kW/m. Eso sí, cuando la altura significativa y la potencia teórica aumenta, la producción de la boya disminuye. En cuanto a diversidad de generación, tenemos una generación NDHE de 0.4 para climas de oleaje desde 1 m con 5 kW/m hasta 2.7 m con 45 kW/m, y un outlier a 3.4 m con 70 kW/m. Para una generación NDHE de 0.6 tenemos climas de oleaje desde 1.7 m con 12 kW/m de potencia teórica hasta 2.7 m con 37 kW/m.

Estos resultados muestran que es necesario indagar con más detalles las variables que influyen en la generación de la boya. Si bien la energía generada tiende a aumentar con el aumento de la potencia teórica, existe un rango bastante grande de climas de oleaje para una energía generada definida, y los climas más energéticos, sobre 3 m de altura significativa y 40 kW/m no son los que generan más energía. Para más adelante, sería bueno poder estudiar más en detalles los climas de oleaje, sobre todo el oleaje de tipo swell y de tipo mar de viento para poder ver su influencia en la generación de energía.

5. CONCLUSIÓN

El proyecto Open Sea Lab ha demostrado que es posible generar energía a partir del oleaje de manera constante por un largo periodo de tiempo, y también ha permitido recabar experiencia sobre la instalación y operación de un dispositivo de este tipo en el mar chileno. Los datos y las experiencias que ha surgido de este proyecto transdisciplinar han marcado un hito en cuanto a la generación de energía a partir del mar, y ha abierto un camino que puede seguir, sea con oleaje, orrientes de marea o eólicas flotantes.

AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue conducido bajo el soporte parcial de MERIC—Marine Energy Research and Innovation Center (CTI230003). Powered@NLHPC: Esta investigación fue parcialmente soportada por la infraestructura de supercomputo del NLHPC (ECM-02).

REFERENCIAS

Cortés, J.; Lucero, F.; Suarez, L.; Escauriaza, C.; Navarrete, S.A.; Tampier, G.; Cifuentes, C.; Cienfuegos, R.; Manriquez, D.; Parragué, B.; et al. Open Sea Lab: An integrated Coastal Ocean Observatory Powered by Wave Energy. *J. Mar. Sci. Eng.* 2022, 10, 1249. <https://doi.org/10.3390/jmse10091249>

Lucero, F., Catalán, P. A., Ossandón, Á., Beyá, J., Puelma, A., & Zamorano, L. (2017). Wave energy assessment in the central-south coast of Chile. *Renewable Energy*, 114, 120-131.

Parsa, K.; Mekhiche, M.; Sarokhan, J.; Stewart, D. Performance of OPT's Commercial PB3 PowerBuoy™ During 2016 Ocean Deployment and Comparison to Projected Model Results. *Proceedings of the ASME 2017 36th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. Volume 10: Ocean Renewable Energy. Trondheim, Norway. (25–30 June 2017).* <https://doi.org/10.1115/OMAE2017-62008>