

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXIV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

***“TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN DE SITIOS Y SU INTERACCIÓN CON
DISPOSITIVOS HIDROKINÉTICOS”***

JAIME CORTÉS V.¹
CLEMENTE GOTELLI A.²
FELIPE LUCERO R.³
CRISTIÁN ESCAURIAZA M.⁴

RESUMEN

Para la correcta caracterización de zonas con potencial de extracción de energía mareomotriz, en especial el efecto que tienen las turbinas hidrocinéticas en el lugar, es necesario estudiar tanto su hidrodinámica como el entorno físico donde será instalada. Así, en este trabajo se realiza una revisión de las diferentes técnicas y herramientas utilizadas por el equipo MERIC-PUC tanto en laboratorio como en la campaña de terreno desarrollada en 2019 en la Región de Magallanes y Antártica Chilena. Dentro de las herramientas utilizadas se incluyen dispositivos electrónicos realizados internamente por el equipo los cuales son capaces de realizar mediciones en laboratorio como en terreno de distintos parámetros físicos que son de vital importancia para la validación de modelos numéricos.

¹ Ingeniero de Investigación, Marine Energy Research & Innovation Center (MERIC), jaime.cortes@meric.cl

² Ingeniero de Investigación, Marine Energy Research & Innovation Center (MERIC), clemente.gotelli@meric.cl

³ Ingeniero de Investigación, Marine Energy Research & Innovation Center (MERIC), felipe.lucero@meric.cl

⁴ Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, PUC, cescauri@ing.puc.cl

1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la necesidad de fuentes alternativas de energía capaz de proporcionar conversión de manera sostenible ha provocado un interés científico y operacional significativo. Por ejemplo, varios países han emitido leyes que incluyen fechas límites y un plan de acción, incluidas las iniciativas mundiales (*Paris Agreement, United Nations Treaty Collection, 2016*). Chile no es una excepción y ha establecido, mediante la Ley 20.698 (2013), que el 20% de su generación debe basarse en Energía Renovable No Convencional (ERNC) para 2025.

Entre las posibles fuentes de ERNC, la energía marina parece ser una alternativa posible y en especial en Chile. Debido a su gran potencial tanto en energía de las olas (a lo largo de la costa) como también en energía mareomotriz (canal de Chacao y estrecho de Magallanes). Sin embargo, para identificar ubicaciones potenciales para el desarrollo de dispositivos de extracción es necesario caracterizar el recurso de manera adecuada mediante estudios específicos que sean capaces de cuantificar el potencial de generación.

En la actualidad, los dispositivos que se encuentran en un punto mayor de desarrollo operacional son los utilizados para la energía mareomotriz. Para este tipo de energía se utilizan turbinas hidrocinéticas las cuales tienen un funcionamiento similar a las turbinas eólicas, las principales compañías que desarrollan este tipo de dispositivos son: Sabella, Alstom, entre otros. En el caso de los dispositivos de energía de las olas (undimotriz) se encuentra algo más atrasado y aún no existe una convergencia de tecnología, por lo que se hace más difícil de determinar el potencial de generación en una zona específica.

Así, en el caso de la energía mareomotriz para caracterizar el funcionamiento de turbinas hidrocinéticas se deben considerar diversos aspectos como lo son: el rendimiento, su hidrodinámica, así como también su interacción con el medioambiente. Luego, para su correcta caracterización se utilizan distintas herramientas, tales como simulaciones utilizando modelos numéricos, mediciones en laboratorio y terreno; el uso de una técnica u otra dependerá de la escala a analizar como también del nivel de detalle que requiere la solución.

De esta manera, el desarrollo de este trabajo estará enfocado en la descripción de diferentes herramientas utilizadas por el equipo MERIC-PUC durante la primera etapa de este proyecto para distintos estudios realizados. Dentro de este trabajo se contemplan mediciones en laboratorio y terreno, estas últimas consideran también instrumentos de desarrollo propio.

2. METODOLOGÍA

En esta sección se describen las distintas herramientas utilizadas, tanto para los experimentos en el laboratorio como para los trabajos en terreno realizados por el equipo. En una primera parte se describen las técnicas e instrumentos experimentales frecuentemente utilizados (e.g. ADV, sensores láser y sonar) en laboratorio y en terreno. Parte de ambas áreas incluyen desarrollos realizados por el equipo para medir ciertos parámetros particulares que son de interés para la cuantificación del potencial de la energía mareomotriz.

Mediciones en Laboratorio

Las mediciones de laboratorio como herramienta para caracterizar el funcionamiento de turbinas hidrocinéticas es una de las principales formas utilizadas en esta área de la ingeniería. Dentro de las ventajas que presentan se encuentra la capacidad de realizar mediciones en ambientes controlados y a un nivel detalle que no puede lograrse en condiciones de terreno. Además, se tiene que los costos son mucho menores.

Instalaciones utilizadas

Los experimentos se llevaron a cabo en dos instalaciones distintas: el canal de pendiente variable del *Saint Anthony Falls Laboratory (SAFL)* de la Universidad de Minnesota en Estados Unidos; y el canal de flujo recirculante del Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental (DIHA) de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

El primer canal tiene dimensiones de 14,6 m de largo y 0,9 m de ancho, una pendiente ajustable que fue establecida en 0.1%, y fondo con sedimento de cuarzo móvil con $d_{50}=0,0018$ m. El canal disponible en el DIHA tiene 13 m de largo y 1 m de ancho, una pendiente fija de 0,1%, y fondo fijo de hormigón. Ambos canales poseen la capacidad de funcionar con un amplio rango de caudales, así como la de regular la altura de agua según sea requerido gracias a una compuerta abatible ubicada en el extremo aguas abajo de ambos canales. Además, los dos están equipados con un carro móvil de precisión submilimétrica capaz de portar instrumentos de medición de velocidad, altura de agua y captura de imágenes de alta resolución. Ver la Figura 1 para más detalles.



Figura 1: Canales utilizados para las mediciones experimentales. En ambas imágenes se puede apreciar el carro móvil utilizado para las mediciones con los distintos instrumentos y la configuración analizada.

Modelos a escala

El prototipo en el cual se basan los experimentos corresponde a la turbina marina hidrocinética *D10* de Sabella, un dispositivo de seis aspas, rotor de 10 m de diámetro, y una capacidad de

generación entre 0,5 y 1,1 MW de potencia para velocidades de flujo entre 3,0 y 4,0 m/s (Zhou, 2014). Para la realización de los experimentos se utilizaron 2 turbinas de este tipo impresas en 3D a diferentes escalas. El primer modelo es una versión a escala 1:108, la cual cuenta a su vez con un motor DC, con el que se puede medir el voltaje producido a una frecuencia de 200 Hz. La segunda turbina, en una escala 1:50, contiene en su interior dos sistemas principales desarrollados especialmente para la investigación. El primero está compuesto por un motor DC, potenciómetro, codificador óptico, y Arduino, los cuales en su conjunto posibilitan la medición y control de la velocidad de giro de la turbina. Por otro lado, el segundo sistema está compuesto por un microcontrolador Arduino nano, módulo wifi, batería, y un sensor de torque rotatorio. Ambos sistemas en conjunto permiten la medición de los esfuerzos a los que está sometido el dispositivo, a través del registro de los valores de torque en el eje de la turbina. En la Figura 2 se encuentra una vista en corte del segundo modelo a escala de la turbina, en distintos colores se muestran sus componentes principales.

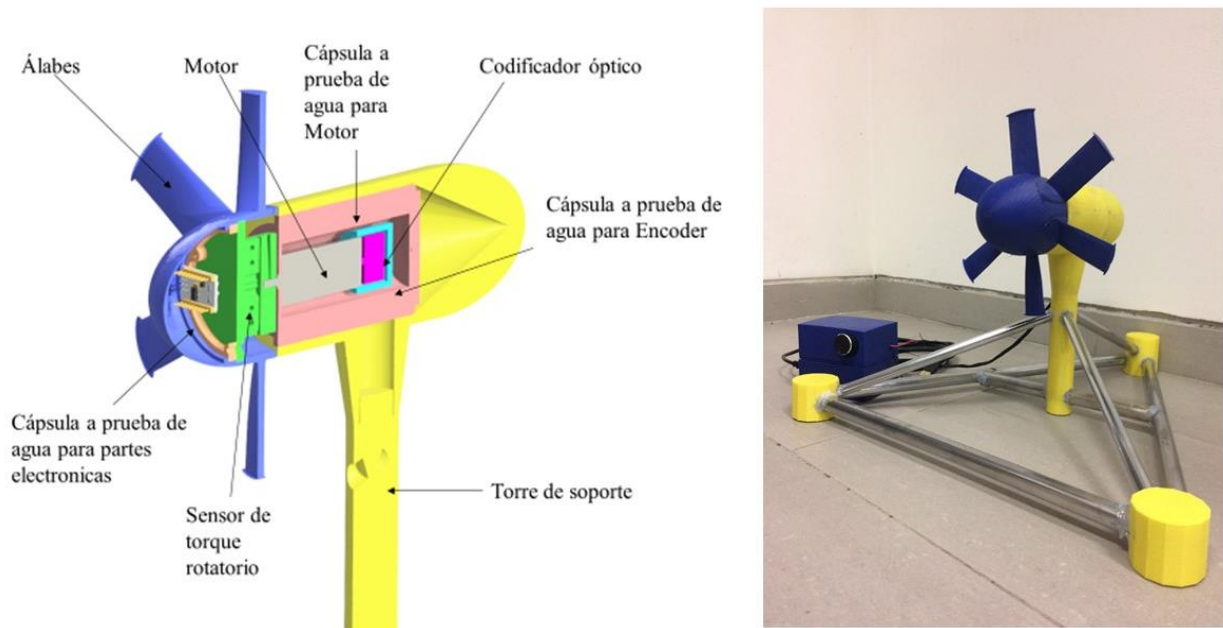


Figura 2: Turbina a escala utilizada para experimentos de medición de torque. Izquierda: componentes internos de la turbina. Derecha: fotografía del modelo a escala utilizado, impreso en 3D.

Configuración de ensayos realizados

Para el estudio de las turbinas hidrocinéticas en cuanto a la hidrodinámica, la variación en el rendimiento y los posibles efectos sobre el medio ambiente, los parámetros más comúnmente estudiados experimentalmente son 3: estadísticos del campo de velocidad en las cercanías de los dispositivos, torque en el eje de la turbina y voltaje producido, y erosión del lecho en la zona próxima a las turbinas. Estos tres parámetros han sido medidos experimentalmente de forma distinta para los dos modelos a escala, dependiendo de las variables que se podían controlar y medir con cada uno.

Con el modelo a escala 1:108 se realizaron mediciones del campo de velocidad en las cercanías de las turbinas, del voltaje producido por ellas, y la erosión provocada al fondo móvil del canal para dos casos distintos: (1) una turbina sola y centrada en la transversal del canal, y (2) dos turbinas alineadas y separadas entre sí por una distancia equivalente a 6 diámetros del rotor (60 cm aprox.). La turbina 1 que se observa en la Figura 2 para el caso de las dos turbinas alineadas es la que se utilizó para el caso (1), en la misma ubicación.

Con el modelo a escala 1:50 se realizaron ensayos para la medición del torque para distintas velocidades de giro del rotor, con el fin de obtener el coeficiente de potencia C_p de la turbina en función del *Tip-Speed Ratio* (TSR). Estos ensayos fueron llevados a cabo en el canal de flujo recirculante del DIHA, y la estimación del torque se logró utilizando un sistema inalámbrico de medición y registro de torque, el cual fue diseñado y construido en MERIC.

- Medición de velocidad, voltaje y erosión

Las mediciones de velocidad se llevaron a cabo con un *Acoustic Doppler Velocimeter* (ADV) a una frecuencia de 50 Hz durante 3 minutos para obtener un promedio, y durante 10 minutos para obtener el espectro de velocidad del flujo en cada punto. Luego, los resultados obtenidos se filtran para eliminar los datos *outliers* utilizando la metodología propuesta por Parsheh et al. (2010).

El registro del voltaje es una herramienta útil para caracterizar la respuesta de las turbinas ante distintas modificaciones en las condiciones de funcionamiento, las cuales la mayor parte de las veces escapan de las condiciones ideales en las que se basaron para el desarrollo del diseñado. El modelo a escala más pequeño cuenta en su interior con un motor DC pequeño que al conectarse a un dispositivo DAQ es capaz de registrar el voltaje producido por la turbina a una tasa de 200 Hz. La diferencia entre ambas series de tiempo de voltaje indica de forma estadística las diferencias sobre la generación eléctrica que son causadas por la presencia de un dispositivo ubicado aguas arriba de otro.

El efecto de las turbinas sobre el medio ambiente no es aún conocido completamente (Musa, 2018). Una de las repercusiones esperadas de su instalación en ambientes con lecho móvil es la modificación de la dinámica sedimentaria local en las cercanías de estos dispositivos. Para tener una idea previa de estos efectos es que se pueden llevar a cabo experimentos en condiciones controladas con un lecho móvil como arena. El dispositivo utilizado para el registro de la batimetría fue un láser Keyence K-200, el cual fue utilizado para obtener la altura del lecho en franjas longitudinales separadas cada 2 mm con una precisión en la vertical de décimas de milímetro.

- Medición de torque y velocidad de giro

La metodología general de este experimento consiste en escoger una velocidad que se mantendrá constante en el canal de flujo recirculante del DIHA, en este caso 0,2 [m/s], para la cual se mide el torque producido en el eje de la turbina de manera directa, para valores entre 0 a 5 de TSR con intervalos de 0,5, es decir, se mide torque para 10 valores distintos de velocidad de giro de la turbina.

Las mediciones de velocidad en el canal se llevaron a cabo mediante un *Vectrino Profiler*, con el cual se verifica una velocidad de 0,2 m/s en el canal, con una altura de agua de 60 [cm].

En cuanto a las mediciones de velocidad de giro de la turbina, se llevaron a cabo mediante la acción conjunta de un motor DC y codificador óptico, ambos ubicados en el interior de la turbina con el fin de obtener de manera directa las rpm de esta. Las mediciones de velocidad de giro son obtenidas con una frecuencia de 10 Hz. Con esta frecuencia de muestreo, y el uso manual de un potenciómetro, se logra mantener las rpm en los distintos valores solicitados por el experimento.

Finalmente, las mediciones de torque se obtienen mediante el uso directo de un sensor de torque diseñado y construido por parte de MERIC, con el fin de obtener una primera aproximación a la medición directa de torque en el eje de la turbina. Estas mediciones son realizadas con una frecuencia de 10 Hz, con lo cual se obtiene una lista de 600 mediciones de torque para cada valor velocidad de giro seleccionada.

Mediciones en Terreno

Las mediciones en terreno representan un trabajo a una escala distinta y en condiciones reales. Por ello, para poder obtener información útil y que sea complementaria a lo realizado en el laboratorio es necesario utilizar otro tipo de instrumentos. Estas mediciones serán un componente clave para validar los modelos numéricos utilizados para caracterizar la zona, con respecto a los instrumentos tradicionalmente utilizados para validar este tipo de modelos se encuentran: ADCP, mareógrafos, derivadores lagrangianos, CTD. Estos instrumentos miden principalmente: la corriente presente en la zona (perfil y superficial), la variación de altura de superficie del agua y por último la variación del perfil de salinidad, temperatura, oxígeno y densidad.

En el caso de las campañas de terreno desarrolladas por el equipo MERIC-PUC durante 2019 en la Región de Magallanes y Antártica Chilena, se contaba con ADCP, mareógrafos y CTD. Razón por la cual se determinó realizar un desarrollo interno de derivadores lagrangianos ya que su alto costo en el mercado hizo prohibitiva la compra de estos. Así, el objetivo de este desarrollo interno se enfocó en tener datos confiables de las corrientes superficiales utilizando dispositivos de bajo costo.

El desarrollo de este equipo comenzó con un primer piloto el cual se desarrolló con materiales reutilizados provenientes de *fitting* hidráulico y en donde sus componentes electrónicas consisten en un microcomputador (Raspberry pi ZeroW) y un módulo GPS unido a él. Este primer prototipo después de verificar el funcionamiento electrónico como su hermeticidad en laboratorio fue probado en la bahía de Cartagena, Región de Valparaíso, en donde permaneció durante 3 horas a la deriva y fue recuperado con sus componentes intactos.

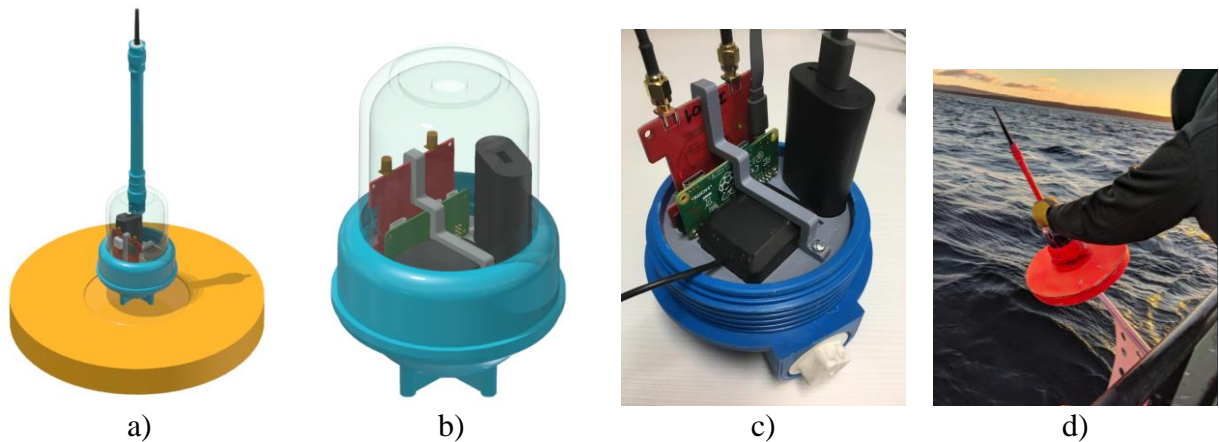


Figura 3: Diseño prototipo modelo 3D (panel a y b), Primer prototipo diseñado y lanzado en el canal Fitz-Roy (panel c y d).

En una segunda etapa se mejoraron los algoritmos de adquisición de la información GPS y automatización de los procesos, por otra parte, se incorporó un sistema de transmisión vía radio utilizando el protocolo LoRa para de esta manera contar con la localización de los derivadores en tiempo real. Este segundo prototipo, se utilizaron 2 equipos más una estación de recepción las cuales fueron probadas en la campaña de campo de marzo de 2019 que el equipo MERIC desarrollo en la segunda angostura del estrecho de Magallanes, en donde permaneció durante 5 horas a la deriva y posteriormente fue recuperado con todos sus componentes intactos.

Finalmente, con esta última retroalimentación obtenida en terreno, se realizó un nuevo diseño de las partes y piezas que mantenían en superficie a los componentes electrónicos con el objetivo de automatizar y facilitar la construcción de los derivadores. Utilizando este nuevo diseño, se fabricaron 7 equipos nuevos. Estos fueron probados en el canal Fitz-Roy en la campaña de campo de octubre de 2019 realizada también por el equipo MERIC (como se observa en la Figura 3).

3. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos en los experimentos utilizando las distintas técnicas de medición descritas en la sección anterior.

Análisis Mediante Ensayos de Laboratorio

Los ensayos de laboratorio permiten un estudio detallado de la hidrodinámica de los dispositivos estudiados. En particular, es de gran importancia la caracterización del campo de velocidades en las zonas cercanas a las turbinas. Los cambios que se generan en él debido a la interacción flujo-turbina sirven para obtener estimaciones del rendimiento de estos dispositivos hidrocineéticos, así como los efectos que puede causar su funcionamiento sobre el medio ambiente, principalmente en lo que se refiere al transporte de sedimentos y sus consecuencias en la topografía local alrededor de las turbinas.

El campo de velocidades y las modificaciones que este sufre por efecto de las turbinas es de gran importancia para entender la dinámica de estos dispositivos. Una variable típicamente utilizada para caracterizar el efecto de las turbinas sobre el flujo es el déficit de velocidad, definido como la variación de la velocidad (U) con respecto a la velocidad promedio sin perturbar (U_∞). La Figura 4 muestra una comparación del déficit de velocidad promedio entre el modelo DES-BEM, desarrollado por MERIC para el análisis numérico de turbinas marinas hidrocinéticas, y los resultados experimentales promedio obtenidos mediante el uso del ADV. Los resultados evidencian la capacidad en general del modelo desarrollado para capturar el efecto de la turbina sobre la velocidad promedio del flujo. Sin embargo, para valores cercanos a la turbina ($x/D \in [0,2]$) el modelo no tiene la capacidad de estimar correctamente la velocidad debido a las simplificaciones que se emplean, así como tampoco se logra capturar la asimetría presente en los perfiles transversales de velocidad longitudinal. Esta situación empeora si es que se analizan arreglos de turbinas, tal como se indica en el trabajo de Gotelli et al. (2019).

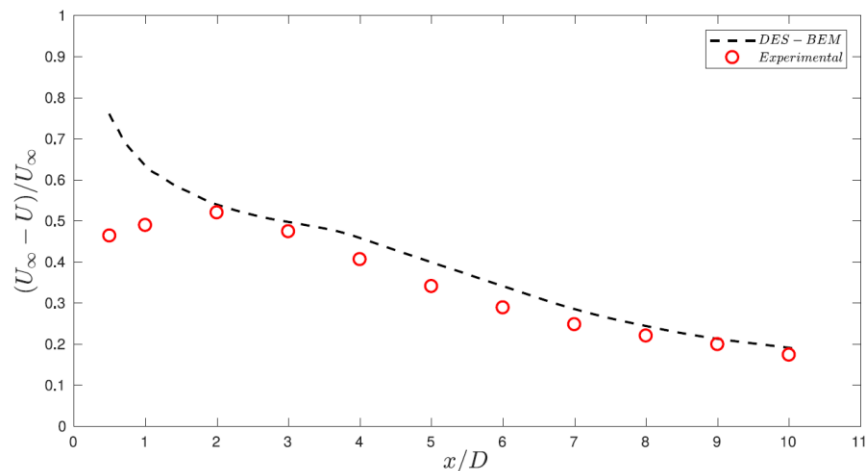


Figura 4: Comparación de déficit de velocidad promedio de los resultados del modelo DES-BEM con los registros experimentales obtenidos con ADV. Adaptado de Gotelli et al. (2019).

El espectro de las mediciones de voltaje instantáneo provee una visión adicional de las características de operación de la turbina. Aunque el voltaje obtenido con el motor DC instalado en el modelo a escala no es una correcta representación escalada de las condiciones del prototipo, las fluctuaciones de este parámetro se utilizaron para comprender cómo estos dispositivos responderían ante diferentes condiciones del flujo. En particular se comparan los casos (1) y (2) descritos en la sección Metodología.

De los experimentos se calcularon los espectros del voltaje obtenido para la turbina 1 para ambos casos estudiados, ver Figura 5. El primer *peak* de ambas curvas coincide con la frecuencia correspondiente de giro de cada turbina f_1 y f_2 , mientras que el resto de los peaks corresponden a los armónicos de estas mismas frecuencias. A menores frecuencias existen diferencias consistentes entre ambos espectros, las que se pueden explicar por la influencia del campo de velocidades que enfrenta la turbina 1 en ambos casos, tal como ha sido reportado previamente por Chamorro et al. (2013).

Los experimentos para estimación de la erosión fueron llevados a cabo en condiciones de “agua clara”, es decir con un esfuerzo de corte en el lecho menor al crítico para el tipo de sedimento utilizado, por lo tanto, cualquier modificación en el esfuerzo de corte del flujo, e.g. debido a la estela de la turbina o al efecto de la estructura de soporte, generaría cambios en la elevación del lecho con respecto a las condiciones iniciales del experimento. En la Figura 6 se muestra la elevación después de los experimentos con respecto a la elevación original. La estructura de soporte contribuye a la erosión en la zona cercana a los pilares del soporte, mientras que aguas abajo de la turbina se observa una zona de depositación de sedimentos inmediatamente aguas abajo del último soporte. La asimetría presente en la zona entre 4 y 6 diámetros aguas abajo se explica a la asimetría del perfil de velocidades

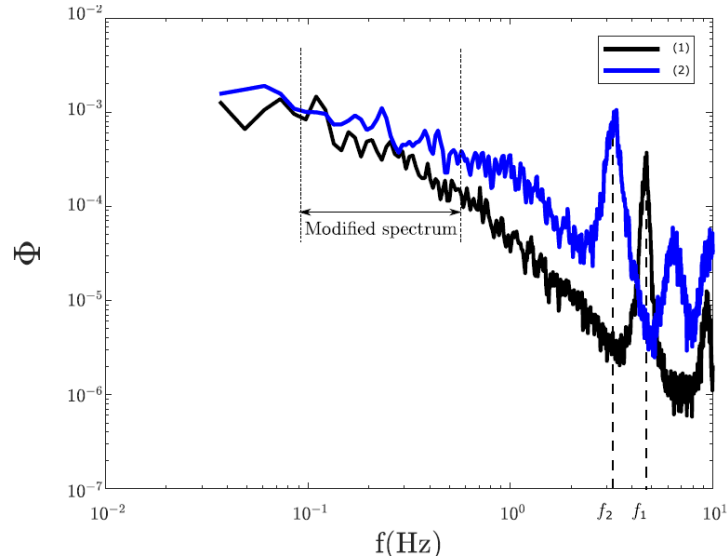


Figura 5: Espectros del voltaje registrado en la turbina 1 para ambos casos estudiados. Adaptado de Gotelli et al. (2019).

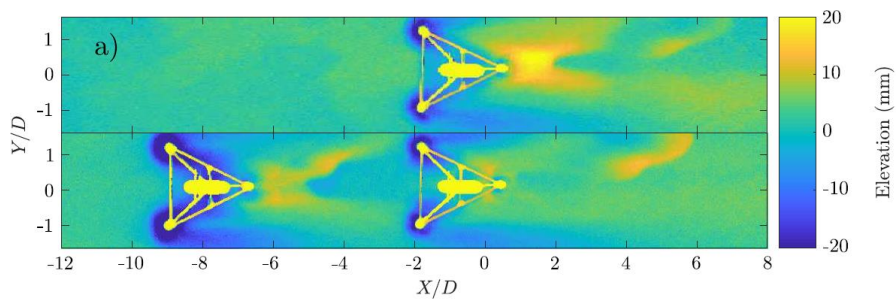


Figura 6: Batimetría del lecho móvil registrada después de las mediciones hechas en el canal de pendiente variable del SAFL. Adaptado de Gotelli et al. (2019).

Medición Torque y Velocidad de Giro

Performance de la Turbina

En cuanto a la performance de la turbina, es de vital importancia entender los efectos en términos de potencia según cambian parámetros o condiciones de funcionamiento. Una de las variables típicamente utilizada para caracterizar la performance de una turbina, es el coeficiente mecánico de potencia y estudiar su comportamiento en función del TSR. La Figura 7 muestra performance de la turbina hidrocínética D10 de Sabella en escala 1:50 para 10 configuraciones distintas de TSR. Los resultados muestran que para valores de TSR menores a 3, se visualiza un aumento del coeficiente de potencia mecánica a medida que aumenta el valor de TSR, luego, para valores de TSR mayores a 3, un aumento de TSR se traduce en una disminución del coeficiente de potencia. Estos resultados se condicen con lo reportado previamente por Frost et al, (2018). De manera anexa, en ningún caso el coeficiente de potencia es capaz de superar el límite teórico de 0,593. Los resultados evidencian la capacidad general del canal, instrumentos de medición y de la turbina a escala, de reproducir y caracterizar el comportamiento de una turbina hidrocínética.

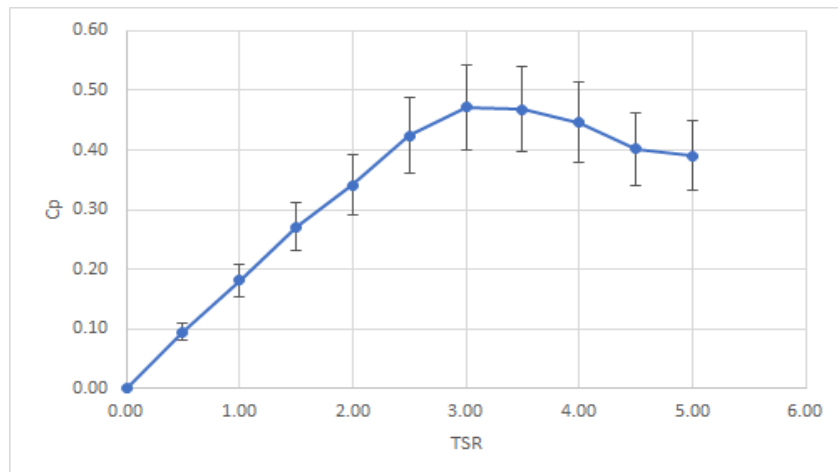
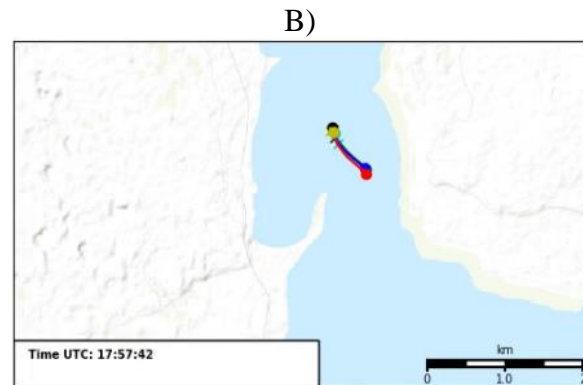
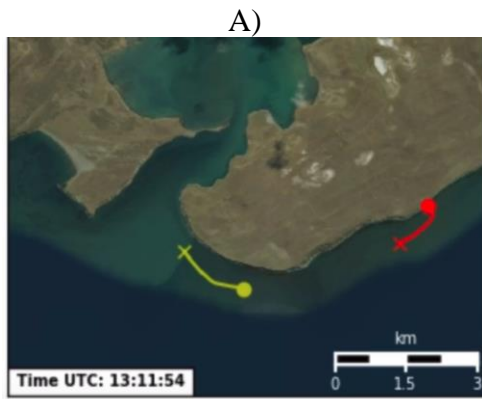


Figura 7: Performance turbina D10 de Sabella en escala 1:50 según coeficiente de potencia mecánica en función del TSR.



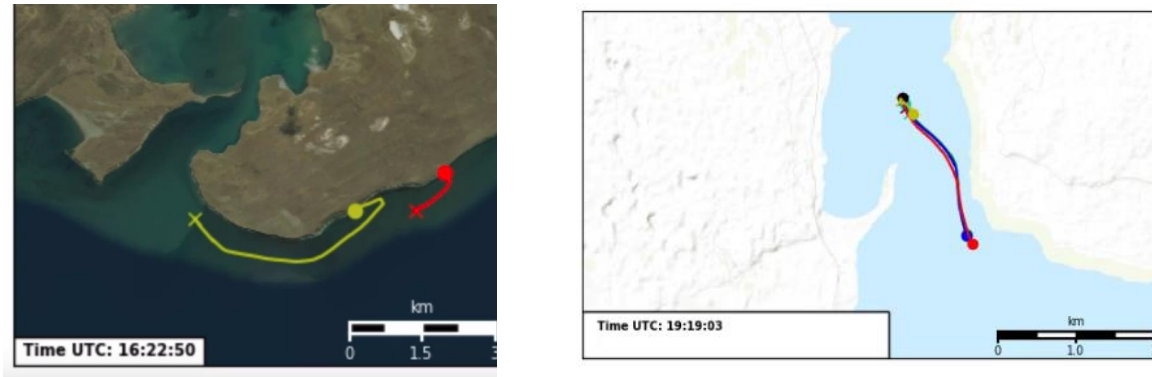


Figura 8: Pruebas de prototipo en terreno: A) Estrecho de Magallanes, segunda angostura (duración 5 horas), B) Canal Fitz-Roy (duración 3 horas).

Las pruebas en terreno de los derivadores lagrangianos realizados por el equipo se presentan en la Figura 8, en el panel A) se presenta la segunda prueba de los prototipos realizada en la segunda angostura del estrecho de Magallanes y en el panel B) realizada en el Canal Fitz Roy.

Para el caso A) se instalaron dos equipos durante aproximadamente 5 horas, tiempo en el cual se probaron los sistemas de transmisión de datos y la impermeabilidad de los equipos. En el caso B) se instalaron siete equipos durante 3 horas, en donde se puso a prueba principalmente el diseño de la estructura.

En relación con los resultados que entregan estos equipos, su objetivo es poder contrastarlos con modelos numéricos (i.e. FVCOM, CROCO, ROMS, etc.) para de esta manera poder validarlos. En estas dos pruebas, el objetivo principal fue analizar la performance e identificar las principales falencias que podrían tener los equipos. Sin embargo, se pudo observar que durante el tiempo que estos equipos estuvieron a prueba, se desplazaron a la deriva aproximadamente 2 km lo cual indica la presencia de fuertes corrientes superficiales en la zona.

4. CONCLUSIONES

En este trabajo se mostraron distintas técnicas utilizadas para la caracterización tanto del recurso energético marino en Chile como del funcionamiento de los dispositivos empleados para su extracción. Las herramientas empleadas se dividen en dos áreas principales que son complementarias, la primera es experimental y se lleva a cabo en el laboratorio con dispositivos escalados a partir de prototipos reales, y la segunda es en terreno y tiene como finalidad caracterizar el recurso real en el lugar donde se podrían instalar las turbinas.

Las técnicas experimentales tienen la principal ventaja del gasto económico reducido en comparación a un testeado de un prototipo real. Se utilizan principalmente para medir de forma certera ciertos parámetros que los modelos numéricos no pueden capturar de forma precisa producto de la complejidad computacional que representan. Además, las características del flujo pueden ser controladas, lo que permite testear el funcionamiento de las turbinas para distintas condiciones ambientales. Finalmente, hay parámetros que pueden ser medidos en el laboratorio, e.g. transporte de sedimentos, que en terreno o en los modelos numéricos es mucho más complejo.

La desventaja principal de estos métodos es que las condiciones al ser controladas a veces no logran representar todas las características del entorno real donde se podría instalar las turbinas. Por otro lado, también se tiene que las limitaciones de espacio y de recursos impide que los modelos sean escalados a tamaños más cercanos a los reales, y se generan ciertas limitaciones que coartan la obtención de resultados más ajustados a la realidad.

En relación con los dispositivos creados por el equipo, el desarrollo de estos fue útil para demostrar que bajo el actual auge del *IoT* es posible crear instrumentos de medición con datos confiables de manera sencilla. En donde no es necesario tener un *background* electrónico y/o computacional ya que gran parte de los *hardware* utilizados vienen listos para su uso. Por lo que para un trabajo futuro se piensa desarrollar otro tipo de dispositivos que sean capaces de medir otras variables marinas, lo cual se analizará con el equipo de *biofouling* de MERIC.

Con respecto a la instrumentación interna de las turbinas a escala, destacan dos aspectos generales. El primero tiene relación con la medición y control de la velocidad de giro, la cual posibilita una mayor cantidad y variedad de ensayos experimentales a realizar, sumado a una mayor precisión y certeza en las condiciones de operación de la turbina en los ensayos. El segundo tiene relación con el sensor de torque de la turbina, el cual demuestra ser una alternativa funcional a los actuales mini sensores de torque rotatorios, permitiendo así una caracterización más completa de las turbinas hidrocineéticas.

A modo de conclusión general se puede indicar que para tener una caracterización completa de las condiciones en que la energía marina puede ser extraída en Chile es necesario la utilización de distintas herramientas disponibles: mediciones experimentales en laboratorio, trabajo en terreno y modelos numéricos. El trabajo conjunto de estas tres ramas permite que la información sea complementaria, y que por ejemplo los modelos puedan ajustarse y compararse con las mediciones experimentales, o a partir de las mediciones en terreno obtener las condiciones de borde para modelos de oleaje o corrientes a grandes escalas.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el *Marine Energy Research & Innovation Center* (MERIC). Proyecto CORFO 14CEI2-28228. Agradecemos a Sabella por facilitar los datos de la turbina D10 para la construcción de los modelos a escala.

REFERENCIAS

Parsheh, Mehran and Sotiropoulos, Fotis and Porte-Agel, Fernando; Estimation of power spectra of acoustic-Doppler velocimetry data contaminated with intermittent spike, *Journal of Hydraulic Engineering*, 2010. V136N6, 368-378.

Musa, Mirko and Hill, Craig and Sotiropoulos, Fotis and Guala, Michele; Performance and resilience of hydrokinetic turbine arrays under large migrating fluvial bedforms, *Nature Energy*, 2018. V3N10, 839.

Chamorro, L. P. and Hill, C. and Morton, S. and Ellis, C. and Arndt, R. E. A. and Sotiropoulos, F; On the interaction between a turbulent open channel flow and an axial-flow turbine, *Journal of Fluid Mechanics*, 2013. V716, 658-670.

Frost, Carwyn and Benson, Ian and Jeffcoate, Penny and Elsäßer, Björn and Whittaker, Trevor; The Effect of Control Strategy on Tidal Stream Turbine Performance in Laboratory and Field Experiments, *Energies*, 2018. V11N6, 1533.

Zhou, Z., Sculler, F., Charpentier, J. F., Benbouzid, M., & Tang, T. (2014, November). An up-to-date review of large marine tidal current turbine technologies. In *2014 International Power Electronics and Application Conference and Exposition* (pp. 480-484). IEEE.