## SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

## XXV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

## CARACTERIZACIÓN DEL RECURSO ENERGÉTICO MAREOMOTRIZ EN EL ESTRECHO DE MAGALLANES

## LEANDRO SUAREZ<sup>1</sup> CAROLINA RUÍZ<sup>2</sup> MARICARMEN GUERRA<sup>3</sup> CRISTIÁN ESCAURIAZA<sup>4</sup> MEGAN WILLIAMS<sup>5</sup>

#### RESUMEN

La industria de la energía mareomotriz está alcanzando madurez comercial, con varios proyectos piloto que demuestran la capacidad de las turbinas hidrocinéticas para generar electricidad. A medida que las turbinas mareomotrices se vuelven más confiables, es importante evaluar detalladamente el recurso mareomotriz en sitios locales con alto potencial energético. El Estrecho de Magallanes, en la Patagonia Chilena, es un canal natural que conecta los océanos Pacífico y Atlántico, y que presenta fuertes corrientes de marea que podrían ser aprovechadas para la generación de electricidad. En esta investigación se presenta una evaluación cuantitativa del recurso energético mareomotriz disponible en la Primera y Segunda Angostura del Estrecho de Magallanes a partir de datos de velocidad medidos con perfiladores acústicos de corriente Doppler (ADCP). Luego, la información de terreno es utilizada para construir, calibrar, y validar un nuevo modelo hidrodinámico tridimensional de todo el Estrecho de Magallanes. Los datos recolectados indican que las corrientes en la segunda Angostura del Estrecho superan 1 m/s más del 50% del tiempo a 20 m desde el fondo, y que la densidad de potencia media disponible en esta zona es aproximadamente 1.5 kW/m<sup>2</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Coordinador I+D, Marine Energy Research and Innovation Center (MERIC) - email: leandro.suarez@meric.cl

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> Ingeniera Civil, Universidad de Concepción – email: carolruiz@udec.cl

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Profesora Asistente, Departamento Ingeniería Civil, Universidad de Concepción – email: marguerra@udec.cl

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Profesor Asociado, Departamento Ingeniería Hidráulica y Ambiental, P. Universidad Católica de Chile – email: cescauri@ing.puc.cl

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Profesora Asistente, Departamento de Obras Civiles, Universidad Santa María – email: megan.williams@usm.cl

## 1. INTRODUCCIÓN

La energía mareomotriz, definida como la energía cinética disponible en canales mareales generada a partir de cambios periódicos en el nivel del mar, es altamente predecible al estar relacionada con la interacción periódica entre la Tierra, la luna y el sol. Castillo (2018) estudió lugares potenciales de Chile para la extracción de energía mareomotriz, señalando que existen dos sectores con velocidades de corriente mareales suficientemente altas para ser aprovechables: el Canal de Chacao y el estrecho de Magallanes. Sin embargo, para avanzar en el desarrollo de la energía mareomotriz en esta zona remota de la región de Magallanes es necesario evaluar cuantitativamente el recurso energético disponible.

El estrecho de Magallanes es un canal ubicado en la región chilena de Magallanes (52,6°S; 70°O), separando la Patagonia chilena (al norte) de la isla de Tierra del Fuego (al sur). El estrecho conecta en dirección este-oeste el océano Pacífico con el océano Atlántico, y se extiende alrededor de 560 km desde su boca occidental en el Pacífico hasta la boca, relativamente ancha y poco profunda, en el lado Atlántico (Fig. 1). El estrés producido por las industrias de la navegación, del petróleo y del carbón, junto con las consecuencias del cambio climático antropogénico y el crecimiento de la población local, hacen que la región sea compleja y relevante para la industria de la energía marina.

En el extremo Atlántico del canal el rango de mareas se encuentra entre 7 y 9 m, mientras que en el extremo Pacífico del canal, el rango de mareas es de aproximadamente 1 m. Esta gran diferencia en la amplitud de las mareas entre los extremos del Estrecho de Magallanes da lugar a fuertes corrientes potencialmente atractivas para la extracción de energía hidrocinética. Se han observado corrientes máximas de hasta 4,5 m/s en dos de las constricciones del Estrecho, conocidas como Primera y Segunda Angostura (Figs. 1 y 2) (Medeiros y Kjerfve, 1988; Combes y Matano, 2018; Brun et al., 2020). Sin embargo, la dinámica de este sistema controlado principalmente por la amplitud de las mareas en su extremo Atlántico permanece aún sin explorar cuantitativamente para fines de extracción de energía mareomotriz.

El principal objetivo de esta investigación es realizar una evaluación detallada del potencial energético de las mareas del Estrecho. Mediciones de terreno son combinadas con simulaciones numéricas utilizando el modelo FVCOM (Finite Volume Community Ocean Model (Chen et al., 2003)) para evaluar el potencial de energía de las mareas y comprender los complejos aspectos físicos del sistema. Este modelo ha sido ampliamente utilizado y validado para la estimación de los recursos energéticos de las corrientes de marea (Guerra et al., 2017; Wang y Zang, 2017; Cowles et al., 2017; Yang et al., 2021). A pesar de la existencia de otros modelos numéricos de la zona patagónica chilena (Sassi y de Palma, 2006), hasta donde sabemos, este es el primer modelo numérico en 3 dimensiones centrado en la evaluación del potencial energético mareomotriz para el Estrecho de Magallanes.

Se realizaron dos campañas de terreno durante 2019 para caracterizar el flujo en la Segunda Angostura del Estrecho (Fig. 2). Los datos recopilados son fundamentales para comprender los factores que controlan la dinámica del flujo en esta sección del canal y para estimar el potencial energético mareomotriz. El modelo FVCOM desarrollado ampliará el conocimiento espacial y temporal obtenido por las mediciones y permitirá estimar el recurso energéticos mareomotriz en todo el Estrecho de Magallanes, y al mismo tiempo evaluar los impactos que las variaciones climáticas tendrán sobre las condiciones de la zona.



Fig. 1. Área de interés del Estrecho de Magallanes, que conecta el Océano Pacífico por el oeste y el Atlántico por el este. Hay dos estrechos en el estrecho de Magallanes con altas velocidades potencialmente aptas para la energía marina.Las estación de mareas de Punta Arenas en Cyan (PTAR) y San Gregorio en verde (GREG) están representadas.



Fig. 2. Dimensiones del tramo este del Estrecho de Magallanes, incluidos los dos estrechos. El rectángulo rojo muestra el área del estudio de terreno.

# 2. MÉTODOS

## 2.1 Mediciones de Terreno

Las mediciones de terreno fueron realizadas en la Segundo Angostura del estrecho (rectángulo rojo en la Fig. 2) durante marzo y abril de 2019. El detalle de las mediciones de terreno se muestra en la Fig 3.



Fig. 3. Ubicación de las mediciones realizadas en la Segunda Angostura del Estrecho de Magallanes. Las líneas de contorno representan las isobatas en metros, La ubicación del ADCP montado en el fondo se indica con un círculo blanco y el mareógrafo de San Gregorio (estación GREG) se indica con un cuadrado verde. Las líneas rojas representan los transectos cubiertos por el ADCP móvil y los diamantes blancos representan la posición de las mediciones de CTD (conductividad, temperatura, y profundidad).

Se midieron una variedad de parámetros hidráulicos y oceanográficos durante los experimentos. Se instaló un perfilador de corrientes acústico Doppler (ADCP) montado en el fondo (moored ADCP) para medir turbulencia y las velocidades medias del flujo. Se empleó un ADCP montado en una embarcación para medir las velocidades a lo largo de múltiples transectos cubriendo la sección transversal de la Segunda Angostura del estrecho. Además, se realizaron múltiples perfiles verticales con un instrumento de tipo Conductivity-Temperature-Depth (CTD) junto con perfiles de microestructura turbulenta. Este artículo se enfoca en las mediciones con el ADCP montado en el fondo, los cuales son utilizados para evaluar el potencial energético mareomotriz local y para la validación de las simulaciones numéricas en FVCOM.

Durante marzo y abril de 2019 se midieron velocidades utilizando un ADCP Nortek Signature de 500 kHz montado en el fondo marino (52,664° S; 70,238° W), a una profundidad media de 47 m. El ADCP muestreó velocidades horizontales a 1 Hz durante 87 segundos cada 30 minutos, utilizando 30 celdas de 1 m. Los valores de cada intervalo de 87 s se promedian para disminuir la incertidumbre o ruido Doppler, obteniéndose un perfil vertical de velocidades tridimensional en coordenadas geográficas cada 30 minutos. El sensor de presión incorporado al ADCP entregó observaciones de las variaciones del nivel del mar. Estos datos fueron post procesados siguiendo métodos convencionales y utilizando los parámetros de calidad y de estimación del potencial energético presentados en Guerra *et al.* (2017).

#### 2.2 Modelo Numérico

Para estimar el recurso energético disponible en la región del estrecho de Magallanes se desarrolló un modelo numérico basado en FVCOM (Finite Volume Coastal Ocean Model), el cual ha sido usado ampliamente para la modelación de sistemas costeros con batimetrías complejas. Este modelo entrega una predicción detallada de las variaciones de nivel del mar por mareas y de las corrientes dentro del estrecho de Magallanes, para así poder evaluar el potencial de la energía de corrientes en esta zona, y detectar sitios de interés para el desarrollo de la energía mareomotriz. El dominio computacional y la malla no estructurada desarrollada para el modelo numérico se presentan en la Fig. 4. El dominio incluye el estrecho de Magallanes desde su extremo en el Océano Pacifico hasta su extremo en el Océano Atlántico, incluyendo múltiples canales y bahías relevantes. La extensión del modelo hacia aguas afuera es necesaria para aplicar condiciones de bordes en mar abierto, donde las no-linealidades inducidas por las aguas someras son mínimas. La malla no estructurada tiene aproximadamente 18.000 nodos y 31.000 celdas, y la resolución de las celdas triangulares varía desde 5.000 metros en los bordes hasta llegar a 100 metros en las zonas de la Primera y Segunda Angostura. La batimetría del modelo numérico se basa en datos obtenidos de GEBCO (GEBCO, 2020) y en las cartas náuticas del SHOA (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile).



Fig 4. Extensión de la malla del modelo numérico. El borde Pacífico es representado por la línea naranja, el borde Atlántico es representado por la línea azul.

El modelo numérico es forzado por las mareas astronómicas, obtenidas a partir del modelo TPXO 7.2 (Egbert y Erofeeva, 2002). Las variaciones de la marea en los bordes se presentan en la Fig. 5. El rango mareal del lado del Pacífico es de aproximadamente 1 metro, mientras que el rango mareal en el borde Atlántico llega a los 8 metros. Este rango mareal en el borde

Atlántico es el principal motor de las corrientes que se generan en la primera y la segunda angostura del estrecho de Magallanes. El modelo se corrió por dos meses, coincidiendo con el periodo de medición del ADCP fijo. Los datos obtenidos del modelo fueron procesados usando el set de herramientas PyFVCOM (Cazenave *et al.*, 2018).

![](_page_5_Figure_1.jpeg)

Fig. 5. Forzantes de marea astronómica para el borde Pacífico en naranja, y el borde Atlántico en azul del modelo hidrodinámico del Estrecho de Magallanes.

## 3. RESULTADOS

#### 3.1 Variaciones del nivel del mar y velocidad media

Las variaciones de nivel del mar (obtenida del registro de presión ADCP) y las velocidades promediadas en la vertical medidas por el ADCP de fondo se muestran en la Fig. 6. En estos gráficos, las velocidades positivas son hacia el este y las velocidades negativas son hacia el oeste. Durante las mareas de sicigia, el rango de la marea es de aproximadamente 4 m, y durante la cuadratura el rango de la marea es de alrededor de 2 m. Se observa una fuerte asimetría en las mediciones de velocidad. Durante sicigia, el flujo es más fuerte hacia el oeste, con velocidades promediadas en la vertical de hasta 2.4 m/s, mientras que la velocidad máxima es de 1.6 m/s en la dirección este. Durante las mareas de cuadratura, la magnitud de la asimetría del flujo se reduce, con velocidades similares hacia el oeste y el este de aproximadamente 1 m/s. Como se ve en el registro, la dirección del flujo varía de ~75° (este) a ~ =255° (oeste), acorde con la geometría y la orientación del canal en la zona de estudio.

Fig. 6. Panel de la izquierda: Elevación de la marea η, magnitud de la velocidad promediada en profundidad (depth avg U) y dirección del flujo (direction) de las mediciones del ADCP montadas en el fondo. Las

![](_page_6_Figure_0.jpeg)

velocidades negativas están hacia el oeste. El panel de la derecha representa un acercamiento a un periodo de 3 días.

A partir de las mediciones se observa que aproximadamente a 20 m sobre el fondo las velocidades son superiores a 1 m/s (umbral de importancia para la generación de energía) un 51.6% del tiempo en dirección este y un 57.1% del tiempo, con un 8.6% de los valores sobre velocidades de 2 m/s, en la dirección oeste. La asimetría este/oeste indica que las corrientes hacia el oeste alcanzan valores un 50 % mayores que las corrientes hacia el este.

La densidad de potencia, P, es estimada como:

$$P = \frac{1}{2}\rho U^3 \tag{1}$$

donde  $\rho$  es la densidad del fluido y *U* es la velocidad horizontal del flujo para cada instante de tiempo. Durante el periodo de medición, la densidad de potencia media es de aproximadamente 1 kW/m<sup>2</sup> a 20 m del fondo marino. En el punto más alto medido, a 36 m sobre el fondo, la densidad de potencia aumenta hasta 2 kW/m<sup>2</sup> en la dirección oeste. En comparación, los valores de densidad de potencia hidrocinética en el Canal de Chacao son de aproximadamente 4 kW/m<sup>2</sup> a 30 m por encima del fondo del mar (Guerra *et al.*, 2017). En general, la densidad de potencia supera los 1.5 kW/m<sup>2</sup> aproximadamente el 35% del tiempo a profundidad media en la ubicación del ADCP.

La Fig. 7 presenta una estimación de perfiles de densidad de potencia disponible utilizando las mediciones del ADCP asociados a distintas velocidades medias observadas a 20.3 m del fondo marino. Este gráfico muestra la distribución este y oeste de la potencia calculada con rangos de hasta 13 kW/m<sup>2</sup> en dirección oeste y hasta 3 kW/m<sup>2</sup> en dirección este. Un análisis detallado del recurso energético disponible a partir de los datos del ADCP fijo se encuentra disponible en Ruiz (2021).

![](_page_7_Figure_0.jpeg)

Fig. 7: Perfiles verticales de densidad de potencia media por rango de velocidad en la ubicación del ADCP fijo, distribución de potencia en dirección oeste (derecha) y distribución de potencia en dirección este (izquierda). El color indica la magnitud de la velocidad a 20.3 m del fondo como referencia

#### 3.2 Modelo Numérico

El modelo numérico es validado en términos del nivel de marea en 3 localidades, en el ADCP fijo y dos estaciones de la IOC-UNESCO localizadas en la bahía de San Gregorio (entre las dos angosturas) y en Punta Arenas (Fig. 8). Se puede ver que el comportamiento del modelo es similar a los datos en cuanto a rangos de mareas tendiendo a subestimar el rango mareal en San Gregorio y en el lugar del ADCP fijo.

![](_page_7_Figure_4.jpeg)

Fig. 8. Comparación entre los resultados del modelo (en naranja) y los datos de cada mareógrafo (en gris): San Gregorio (panel superior), Punta Arenas (panel central) y el ADCP fijo.

La Fig. 9 compara la magnitud y dirección de las corrientes observadas con las predicciones del modelo numérico. El modelo numérico tiende a subestimar la magnitud de las corrientes,

pero la variación temporal es correctamente capturada. Estas diferencias se pueden explicar por la posición del ADCP fijo, el cual se ubicó en una zona con fuertes gradientes de batimetría, y en las cercanías de una punta, accidentes geográficos difíciles de reproducir por la malla utilizada en el modelo numérico. A pesar de las diferencias en magnitud se destaca el buen comportamiento del modelo en cuanto a la representación de la dirección de las corrientes.

![](_page_8_Figure_1.jpeg)

Fig. 9. Magnitud de la corriente (panel superior) y dirección de la corriente (panel inferior) (promediadas en la vertical) medidas por el ADCP fijo en gris y predichas por el modelo numérico en naranja. Las velocidades positivas se orientan hacia el este y las velocidades negativas se orientan hacia el oeste.

Las diferencias se pueden también observar en las componentes armónicas principales de la corriente (Fig. 10). La amplitud de las componentes de mareas semidiurnas M2, S2 y N2 son subestimadas por el modelo, pero las fases son reproducidas de manera satisfactoria, lo que indica que la dinámica de las corrientes está bien representada.

![](_page_8_Figure_4.jpeg)

Fig 10. Comparación de los principales constituyentes armónicos para la velocidad promediada en la vertical. Panel izquierdo: amplitud del eje mayor de la elipse de marea. Panel derecho: fase de la elipse de marea.

Dado que la dinámica de las corrientes está bien representada, es posible obtener una estimación de la variación de la densidad de potencia utilizando el modelo numérico. En la Fig. 11 se presentan las magnitudes medias de corriente promediadas en la vertical obtenidas por el modelo numérico. En los mapas de la figura los colores más intensos resaltan las áreas del canal adecuadas para la extracción de energía mareomotriz. En la Primera Angostura, ubicada entre -69,7° y -69,3° de longitud, las velocidades medias son superiores a 1,5 m/s, durante flujos hacia el este y flujos hacia el oeste. En el caso del Segunda Angostura, ubicada entre -70.5° y -70.1° de longitud, las velocidades medias son espacialmente uniformes y de magnitud 1 m/s, con velocidades más altas observadas hacia el oeste (acorde a las mediciones de terreno).

En términos de densidad de potencia media (Fig. 11, derecha), la primera angostura presenta densidades de potencia más altas, hasta 7 kW/m<sup>2</sup> en promedio, mientras que la segunda angostura muestra densidades de potencia de hasta 4 kW/m<sup>2</sup>. La alta densidad de potencia dentro de las dos angosturas es consistente tanto para los flujos hacia el este como hacia el oeste, lo que significa que la extracción de energía mareomotriz podría ser factible durante todo el ciclo mareal.

![](_page_9_Figure_2.jpeg)

Fig 11. Izquierda: Magnitud de corriente promediada en profundidad media en m/s, promediada durante 40 días para los flujos hacia el este (panel superior) y flujos hacia el oeste (panel inferior). Derecha: Densidad de potencia promediada en profundidad promedio en kW/m<sup>2</sup>, promediada durante 40 días para los flujos hacia el este flujos (panel superior) y flujos hacia el oeste (panel inferior).

#### 4. CONCLUSIONES

Este es el primer estudio destinado a evaluar el recurso energético mareomotriz en el Estrecho de Magallanes, que combina tanto observaciones de campo como simulaciones numéricas. Las mediciones de terreno con ADCP tanto fijo como móviles permiten la validación de un modelo hidrodinámico FVCOM de todo el Estrecho de Magallanes. Los resultados numéricos proporcionan una evaluación preliminar en dos de las principales angosturas del Estrecho de Magallanes. La Segunda Angostura muestra velocidades altas y persistentes junto a una alta densidad de potencia, con profundidades de aproximadamente 60 m, y una sección transversal de 7 km, siendo un sitio atractivo para la extracción de energía mareomotriz. La primera angostura si bien presenta mayores velocidades y mayor densidad de potencia que la segunda, es más profunda (hasta 80 m) y más angosta (4 km).

Un análisis detallado de las corrientes y evaluación del potencial energético extraíble a partir de las mediciones de terreno se encuentra disponible en Ruiz (2021). El trabajo futuro se centrará en ampliar la validación del modelo numérico y en las interacciones de los procesos físicos y ambientales que pueden ayudar a promover un desarrollo sostenible de las energías marinas en la parte sur del continente.

Este trabajo aporta a las metas 7.b de los Objetivos de Desarrollo Sustentable 7.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido financiado por el Marine Energy Research & Innovation Center (MERIC), proyecto CORFO14CEI2-28228 y por el fondo VRI PUC 1566. Powered@NLHPC: Esta investigación fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercomputadores del NLHPC (ECM-02).

### REFERENCIAS

Castillo, C. 2018. Estudio de evaluación de las energías mareomotrices o undimotrices más convenientes para su aprovechamiento en Chile. Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Cartagena.

Medeiros, C. y Kjerfve, B. 1988. Tidal characteristics of the Strait of Magellan. Continental Shelf Research, 8(8):947–960.

Combes, V. y Matano, R. 2018. The Patagonian shelf circulation: Drivers and variability. Progress in Oceanography 167, 24-43.

Brun, A., Ramirez, N., Pizarro, O. y Piola, A. 2020. The role of the MagellanStrait on the southwest South Atlantic shelf. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 237:106661.

Chen, C., Liu, H. y Beardsley, R. 2003. An unstructured, finite-volume, three-dimensional, primitive equation ocean model: application to coastal ocean and estuaries, Journal of Atmospheric and Oceanic Technology 20 (2003) 159–186.

Sassi, M. y Palma, E. 2006, Modelo Hidrodinámico del Estrecho de Magallanes, Mecánica Computacional vol XXV, pp 1461-1477.

Guerra, M., Cienfuegos, R., Thomson, J., y Suarez, L. 2017. Tidal energy resource characterization in Chacao Channel, Chile, International Journal of Marine Energy 20, 1-16. Wang, T. y Yang, Z. 2017. A modeling study of tidal energy extraction and the associated impact on tidal circulation in a multi-inlet bay system of Puget Sound, Renewable Energy 114, 204-214.

Cowles, G., Hakim, A., y Churchill, J. 2017. A comparison of numerical and analytical predictions of the tidal stream power resource of Massachusetts, USA, Renewable Energy 114, 215-228.

Yang, Z., Wang, T., Branch, R., Xiao, Z., and Deb, M. 2021. Tidal stream energy resource characterization in the Salish Sea. Renewable Energy 172, 188-208.

GEBCO Compilation Group (2020). GEBCO 2020 Grid (doi:10.5285/a29c5465-b138-234d-e053-6c86abc040b9)

Egbert, G. y Erofeeva S., 2002, Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides, J. Atmos. Oceanic Technol. 19 (2) 183–204.

Cazenave, P. y mikebedington. (2019). pwcazenave/PyFVCOM 2.2.0 (2.2.0). Zenodo. https://doi.org/10.5281/zenodo.2671617

Ruiz, C. 2021. Evaluación del potencial energético mareomotriz en el Estrecho de Magallanes. Memoria de Título para optar al título de Ingeniero Civil, Universidad de Concepción.