

**SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**  
**XXIV CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA**

**MODELACIÓN NUMÉRICA A DISTINTAS ESCALAS DE LOS PROCESOS  
HIDRODINÁMICOS INVOLUCRADOS EN LA GENERACIÓN DE ENERGÍA  
MAREOMOTRIZ**

**CRISTIÁN ESCAURIAZA M. <sup>1</sup>**  
**KARINA SOTO-R. <sup>2</sup>**  
**JORGE SANDOVAL U. <sup>3</sup>**  
**CLEMENTE GOTELLI A. <sup>4</sup>**  
**LEANDRO SUÁREZ. <sup>5</sup>**

**RESUMEN**

Hoy en día, las Energías Renovables No Convencionales (ERNC) han suscitado gran interés por parte de la comunidad, ya que representan una alternativa para la generación de energía eléctrica de manera sustentable y con un menor impacto sobre el medio ambiente.

Dentro de estas ERNC, Chile posee un gran potencial en energías marinas, tanto en oleaje como en corrientes de mareas. El desarrollo de tecnología para el aprovechamiento de este recurso impone la necesidad de avanzar en la comprensión de los procesos físicos involucrados en la conversión de energía y entender la naturaleza multiescala de estos para su correcta modelación.

En este trabajo se presenta la investigación realizada en el centro I+D MERIC (Marine Energy Research and Innovation Center) sobre la modelación de estos procesos hidrodinámicos a distintas escalas, así como los mecanismos que gobiernan la interacción entre estos. Las escalas involucradas van desde los procesos de circulación oceánica (escala regional) hasta la interacción entre el flujo y las aspas de las turbinas mareomotrices (escala local).

---

<sup>1</sup> Profesor Asociado, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, PUC, cescauri@ing.puc.cl

<sup>2</sup> Alumna de doctorado, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, PUC, knsoto@uc.cl

<sup>3</sup> Alumno de doctorado, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental, PUC, jcsandov@uc.cl

<sup>4</sup> Ingeniero de Investigación, Marine Energy Research & Innovation Center (MERIC), clemente.gotelli@meric.cl

<sup>5</sup> Ingeniero de Investigación, Marine Energy Research & Innovation Center (MERIC), leandro.suarez@meric.cl

## 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, tanto el mundo académico como la industria han realizado esfuerzos y avances significativos en la investigación y desarrollo tecnológico de dispositivos de generación basados en Energías Renovables No Convencionales (ERNC). Esto se ha debido principalmente al aumento sostenido de la demanda energética a nivel global, a los compromisos de los países de transitar de soluciones basadas en combustibles fósiles a fuentes de generación renovables y a la necesidad de diversificar la matriz de generación. En este contexto, la energía proveniente de las corrientes de marea constituye una de las fuentes más promisorias y confiables, debido a su predictibilidad y periodicidad (Gajardo et al., 2019).

En el caso chileno, históricamente la generación de energía eléctrica ha estado principalmente basada en la hidroelectricidad. Sin embargo, debido a las variaciones en el ciclo hidrológico observadas en los últimos años, así como a la adhesión de las autoridades a los compromisos internacionales de movilización de la matriz hacia fuentes renovables, se ha puesto énfasis en la investigación del potencial energético basado en ERNC existente en el país. Si bien dentro de las ERNC, las más conocidas y desarrolladas son las energías solar y eólica, en Chile existe un gran potencial para las energías marinas, tanto basadas en oleaje (energía undimotriz) (Lucero et al., 2017), como en corrientes de mareas (energía mareomotriz), como es el caso del canal de Chacao o el estrecho de Magallanes (Guerra et al., 2017). Para poder avanzar en la investigación y desarrollo de las energías marinas en Chile, se creó en el año 2015 el centro MERIC (Marine Energy Research and Innovation Center). En este centro, se busca caracterizar, a través de diferentes enfoques basados en ciencia (ingeniería, ecología marina, sociología, entre otros), el potencial de generación de la costa chilena y sus impactos sobre el entorno natural de los sitios de interés, así como evaluar los efectos de la introducción de la energía marina en la industria energética nacional y las comunidades.

Para el caso de la energía mareomotriz, la extracción de energía se lleva a cabo a través de turbinas hidrocineéticas marinas (THM). El desarrollo de esta tecnología impone la necesidad de avanzar en la comprensión de los procesos físicos involucrados en la conversión de energía desde el flujo a la turbina, así como en los efectos generados en el ambiente circundante debido a la interacción entre las corrientes y los dispositivos. Estos procesos físicos se producen mediante interacciones hidrodinámicas complejas y abarcan un amplio rango de escalas, tanto espaciales como temporales, que van desde la escala global (mareas) y regional (corrientes) hasta escalas locales del orden de los dispositivos (interacción flujo-turbina, interacción entre turbinas) e incluso menores (capa límite del flujo sobre las aspas, transporte de sedimento).

Debido a esta gran cantidad de escalas y al hecho de que cada una de ellas aporta componentes relevantes a la comprensión de la dinámica de los procesos involucrados, es que la caracterización del potencial energético en el caso mareomotriz requiere un enfoque multiescala. Así, mediante distintos modelos matemáticos basados en los mecanismos físicos que gobiernan el flujo y a través de simulaciones numéricas, se busca capturar adecuadamente los procesos hidrodinámicos involucrados. De esta forma, se puede estimar el desempeño de los proyectos de generación mareomotriz.

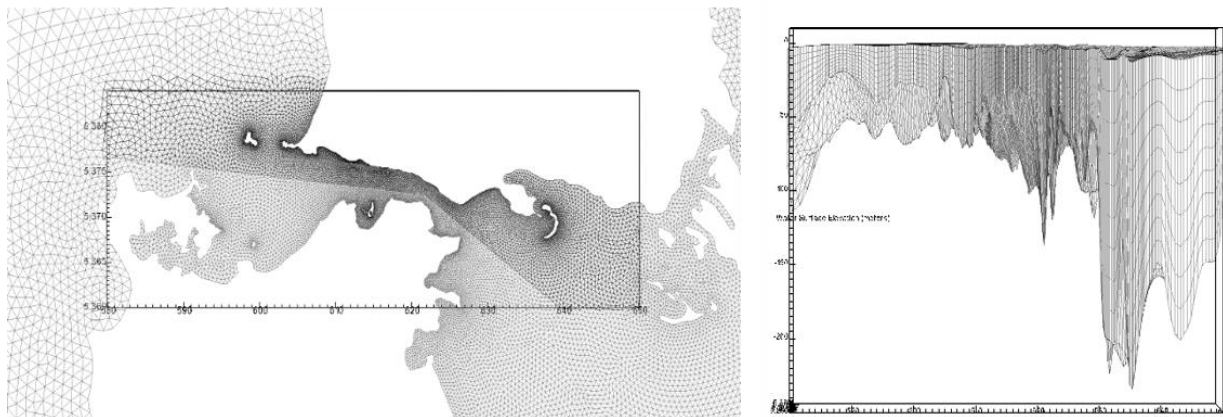
En este trabajo se presentan los distintos modelos utilizados en este proceso: para la caracterización de la circulación oceánica a escala regional, se utiliza el modelo FVCOM (Finite-Volume, primitive equation Community Ocean Model) (Chen et al., 2003). Luego, para modelar los dispositivos de extracción de energía a escala de la turbina, se presentarán y compararán tres modelos actuadores de distinta complejidad, conocidos como ADM (Actuador Disk Model), BEM (Blade-Element Momentum) y ALM (Actuador Lines Model) (Sandoval et al., 2019). Finalmente se estudiará de qué manera se puede incorporar el efecto de los dispositivos de extracción de energía en la dinámica de los modelos de circulación oceánica (interacción a través de escalas) (Soto-Rivas, 2019).

## 2. METODOLOGÍA

### Caracterización del recurso energético mediante el uso de FVCOM

Para poder estimar el recurso disponible de corrientes de mareas, se utiliza el modelo regional, Finite-Volume Community Ocean Model (FVCOM; Chen et al., 2003). Este es un modelo hidrodinámico tridimensional de volúmenes finitos de malla no estructurada, que utiliza capas sigma en la vertical para resolver las ecuaciones primitivas de circulación oceánica. El modelo FVCOM es ampliamente utilizado en el estudio de procesos físicos y biológicos en regiones costeras caracterizadas por complejas batimetrías y diversas forzantes (como las mareas, viento, descargas de ríos, entre otros).

Para este estudio, se analiza la modelación realizada para el Canal de Chacao por Guerra et al (2017). Este modelo fue forzado a partir de las mareas astronómicas y fue validado a través de mediciones de alturas de nivel del mar con mareógrafos y mediciones de perfiles de velocidad con obtenidos mediante ADCPs (*Acoustic Doppler Current Profiler*).



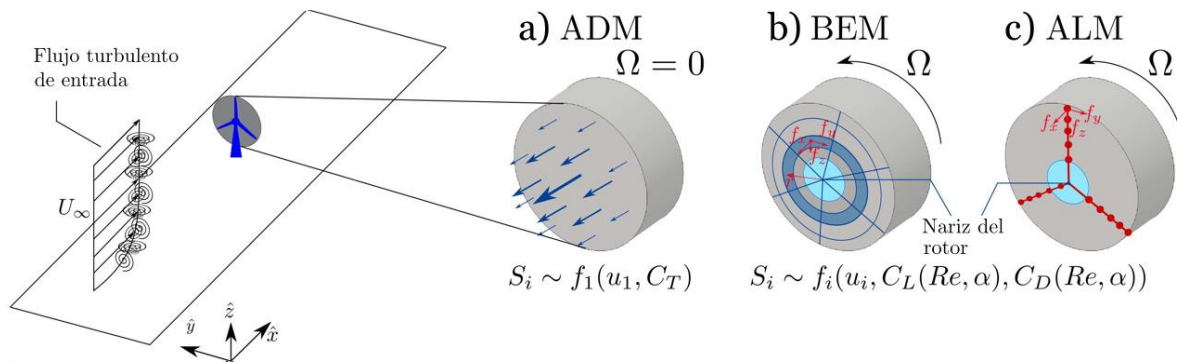
**Figura 1.** Malla no estructurada utilizada en el modelo FVCOM. Izquierda: grilla en la cercanía del canal de Chacao. Derecha, vista de perfil de las capas sigma utilizadas en el modelo.

## Simulación numérica de alta resolución de turbinas hidrocineéticas marinas (THM)

Para la simulación numérica de la interacción entre el flujo y las THM a la escala del dispositivo, se utiliza un modelo acoplado que resuelve el flujo tridimensional instantáneo e incorpora el efecto de las turbinas. Esto se realiza mediante una parametrización de la fuerza que este experimenta por el flujo debido a la presencia de las turbinas en el dominio. Las ecuaciones que gobiernan este proceso son las ecuaciones promediadas de Reynolds (URANS por su sigla en inglés) para las cuales se utiliza un modelo de turbulencia que permite resolver la dinámica de las estructuras coherentes que dominan el flujo (para detalles del modelo, se le sugiere al lector revisar Escauriaza et al., (2011)). Para representar las THM, acoplamos las ecuaciones URANS con tres tipos de modelos actuadores (ADM, BEM y ALM por sus siglas en inglés). Todos ellos están basados en la incorporación de un término fuente de momentum en las ecuaciones URANS, el cual es parametrizado, en distintos niveles de complejidad, en base a las características geométricas de las turbinas (Sandoval et al., 2019). A pesar de que este enfoque no resuelve explícitamente el flujo alrededor de los dispositivos, se ha demostrado ampliamente la capacidad de estos modelos de proveer información detallada de la dinámica de la estela generada por las turbinas (Kang et al., 2014). Las ecuaciones del modelo acoplado son las siguientes:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{Re} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \langle u'_i u'_j \rangle + S_i \quad (1)$$

Donde el término  $S_i$  corresponde a la fuerza por unidad de volumen (adimensional) experimentada localmente por el flujo debido a la presencia de la turbina. La forma en la que se parametriza este término depende del modelo actuador escogido. Una representación esquemática de cada modelo se incluye en la Figura 2.



**Figura 2.** Modelos actuadores para la representación de THM. **a)** En ADM, la fuerza experimentada por el flujo es horizontal y la parametrización no incorpora la rotación de las aspas. **b)** En BEM, la parametrización de la fuerza incorpora la rotación de las aspas de manera implícita, ya que la fuerza es distribuida en anillos concéntricos. **c)** En ALM, el movimiento de las aspas es incorporado explícitamente en el flujo.

El método de los discos actuadores (ADM, por su sigla en inglés), es la forma más sencilla de modelar dispositivos THM, ya que representa el efecto de estos mediante una fuente de momentum

en el sentido del flujo. Este momentum es distribuido en el área que cubre la turbina, por lo que la geometría del dispositivo se reduce a un disco. En este método tampoco se representa el giro del rotor, sin embargo, ha sido demostrado que puede capturar la dinámica de las estelas lejos de las turbinas (Stevens et al., 2018).

La fuerza,  $f_1$  correspondiente a los discos actuadores se calcula de la siguiente manera,

$$f_1 = \frac{1}{2} U_\infty^2 A_d C_T \quad (2)$$

Donde  $U_\infty$  es la velocidad no perturbada aguas arriba de los dispositivos,  $A_d$  es el área del disco, y  $C_T$  es el coeficiente de empuje, el cual es obtenido empíricamente. Sin embargo, en el caso de granjas de turbinas, el valor de la velocidad no perturbada no es claro, por lo que se prefiere usar la velocidad en el disco,  $U_d$ , en vez de  $U_\infty$ . Para ello, se debe usar un coeficiente de empuje modificado  $Ct' = C_T / (1 - a)^2$ , donde  $a$  es el coeficiente de inducción (Burton et al., 2001).

El enfoque del modelo *Blade Element Momentum (BEM)* representa un grado de complejidad adicional al compararlo con el método ADM recién descrito. Ambos modelos se asemejan en que representan las turbinas como un disco, el cual usualmente representa el rotor del dispositivo. La diferencia está en que, en vez de aplicar una fuerza calculada en base al coeficiente de empuje como en ADM, en el enfoque BEM se calcula la fuerza en base a la velocidad local del flujo en contacto con el disco, los coeficientes de arrastre ( $C_D$ ) y sustentación ( $C_L$ ) del aspa en base al ángulo de ataque local, el número de Reynolds, y las características geométricas del aspa de la turbina representada. Estas fuerzas se aplican instantáneamente en cada nodo dentro del anillo actuador, pero se distribuye el efecto promedio de todas las aspás en dicha región (ver figura 2.b).

Las fuerzas de sustentación y arrastre experimentadas localmente por el flujo corresponden a

$$(f_L, f_D) = \frac{1}{2} \rho u_{rel}^2 c(r) (C_L(Re, \alpha) \hat{l} + C_D(Re, \alpha) \hat{d}) \quad (3)$$

Donde  $\rho$  es la masa específica del agua,  $u_{rel}$  es la velocidad relativa entre el flujo y la velocidad de rotación de las aspás (la cual se incorpora de forma implícita en el modelo),  $Re$  es el número de Reynolds y  $\alpha$  es el ángulo de ataque local.  $\hat{l}$  y  $\hat{d}$  son las direcciones de las fuerzas de sustentación y arrastre experimentada por el aspa localmente.

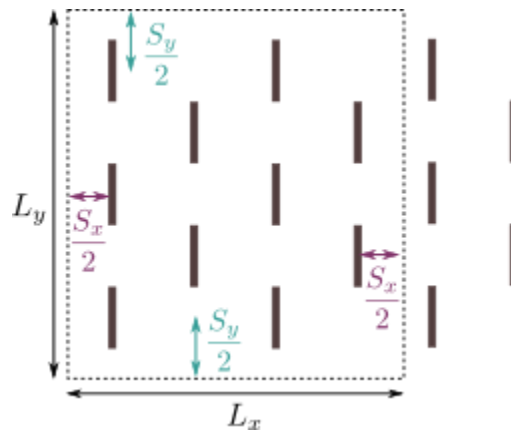
Finalmente, el método de líneas actuadoras (ALM por su sigla en inglés) representa las aspás de las turbinas mediante líneas compuestas por un número determinado de puntos. Estas líneas se mueven en el tiempo, donde se calculan las fuerzas de arrastre y sustentación en cada uno de los puntos que las componen, de la misma forma que en el caso de BEM. La incorporación explícita de la rotación en el modelo permite capturar la dinámica de las estructuras helicoidales generadas por la interacción local del flujo con las aspás, las cuales tienen gran influencia en la dinámica de los mecanismos de recuperación de velocidad en la estela.

## Integración del efecto de granjas de turbinas en modelos regionales

Dado el alto nivel de detalle que entregan los modelos descritos anteriormente, estos no pueden ser usados directamente en modelos de circulación oceánica, ya que esto implicaría costos computacionales excesivos. Es por esto que en este trabajo se describe la metodología propuesta por Soto-Rivas et al., (2019) para parametrizar el efecto de una granja completa de turbinas en FVCOM. Esta parametrización consiste en derivar un coeficiente de empuje,  $C_{tGranja}$  que dependa de la disposición espacial del grupo de turbinas en el flujo.

Inicialmente se propuso que el coeficiente  $C_{tGranja}$  dependería de la separación entre los dispositivos en el sentido del flujo y en el sentido lateral,  $S_x$  y  $S_y$ , respectivamente. Además, la razón entre la profundidad y la altura del centro de la turbina,  $H/Z_{centro}$ , también debiese ser una variable a considerar, ya que los dispositivos podrían interactuar con la superficie libre. Finalmente, se propuso que el tamaño de la granja en el sentido del flujo,  $L_x$ , y en el sentido lateral,  $L_y$ , son variables influyentes en el cálculo del nuevo coeficiente global.

Para calcular el nuevo coeficiente  $C_{tGranja}$  se utilizó el modelo de los discos actuadores, ya que permite la simulación de múltiples dispositivos con un costo computacional relativamente bajo. Con esto, se simuló una granja de quince turbinas distribuidas de manera escalonada (es decir una fila de tres turbinas, seguida de una de dos). Usando diferentes volúmenes de control dentro de cada granja (como se muestra en la Figura 3) se calculó la fuerza resultante,  $F_{tDES}$  que ejercen los diferentes arreglos de turbinas. Finalmente, usando dicha fuerza, se calculó el coeficiente  $C_{tGranja}$  para cada caso.



**Figura 3.** Esquema de la distribución de dispositivos para el estudio del coeficiente  $C_{tGranja}$ . La línea punteada indica el tamaño del volumen de control variable utilizado para el cálculo de la fuerza resultante ejercido por cada grupo de turbinas.

Para calcular el comportamiento de  $C_{tGranja}$  se simularon siete casos cuyas características son resumidas en la siguiente Tabla.

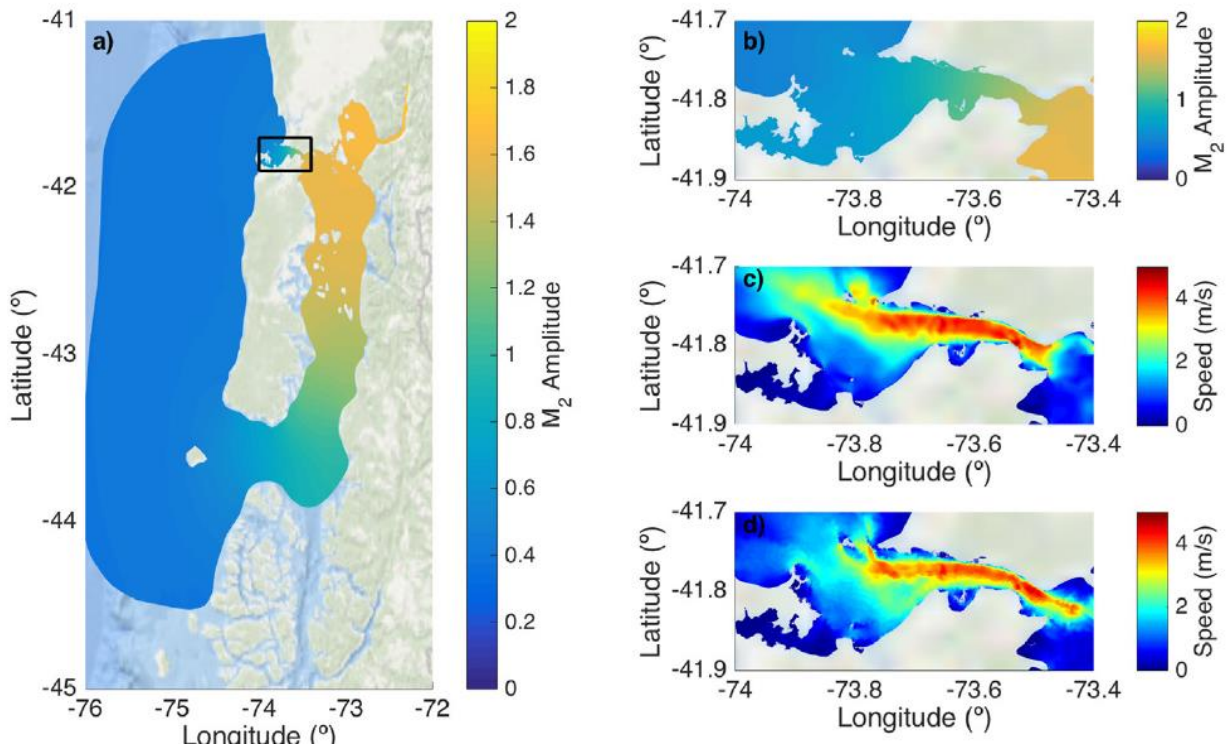
**Tabla 1.** Características de los casos simulados para el cálculo de  $C_{tGranja}$

Caso	$S_x/D$	$S_y/D$	$H/Z_{centro}$
C.1	5	4	4.2
C.2	7	4	4.2
C.3	3	4	4.2
C.4	5	2	4.2
C.5	5	6	4.2
C.6	5	4	3.3
C.7	5	4	5.0

### 3. RESULTADOS

En esta sección se presentarán parte de los resultados obtenidos de la modelación de diferentes casos de estudio que forman parte de las líneas de investigación de MERIC.

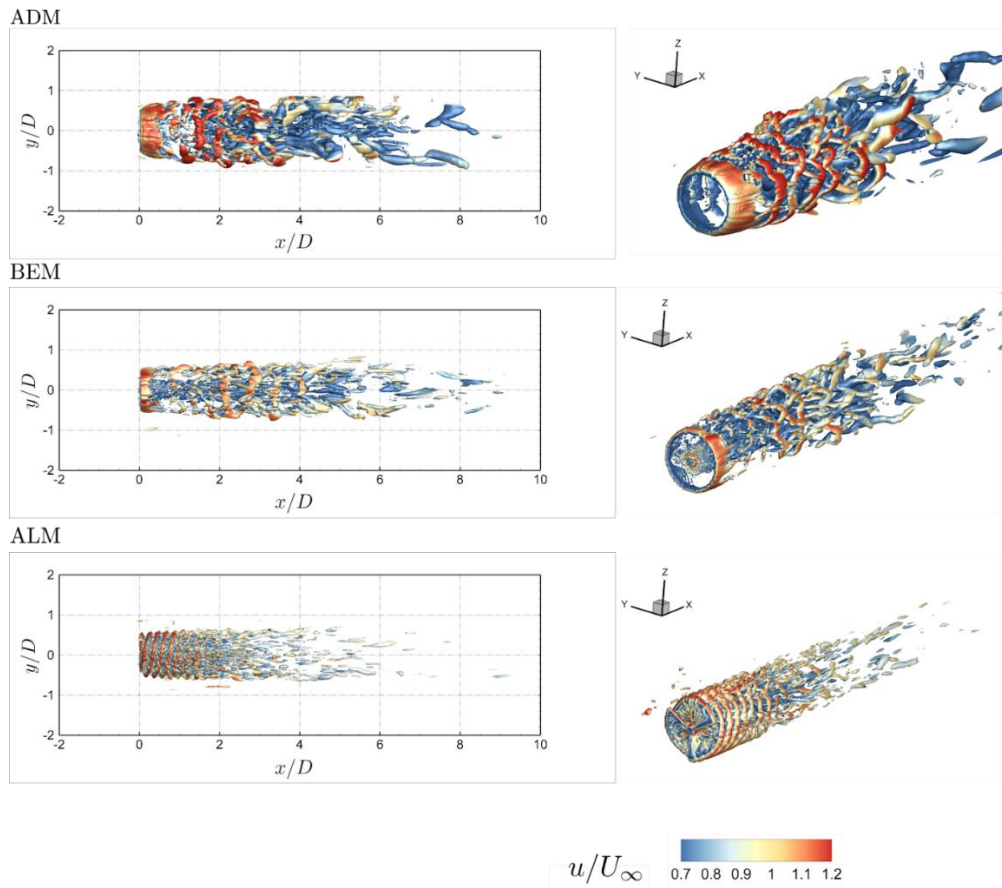
Para el caso de los modelos regionales, se presentan las simulaciones de la circulación oceánica para el canal de Chacao mencionado previamente. Para la caracterización del recurso energético en el canal de Chacao, se utilizaron modelos numéricos validados anteriormente. Estas simulaciones permitieron obtener una estimación del recurso energético mareomotriz disponible en esta región (Guerra et al., 2017).



**Figura 4. a) y b):** Amplificación de la onda de marea astronómica M2 en el canal de Chacao. **c) y d):** velocidades obtenidas en el canal de Chacao a partir del modelo FVCOM. (de Guerra et al., 2017)

Por otro lado, los modelos actuadores para representar la interacción entre el flujo y los dispositivos han sido aplicados a diversos casos de estudio (Gajardo et al., 2019; Gotelli et al., 2019, Soto-Rivas et al., 2019; Sandoval et al., 2019) y han sido validados con datos experimentales para distintos tipos de THM. Estos han permitido caracterizar la dinámica del flujo en diferentes condiciones de operación y en distintas disposiciones espaciales (turbinas solas y en arreglos o granjas de turbinas). A partir de las simulaciones se ha podido determinar la dinámica de la recuperación de velocidad en la estela, así como los efectos sobre el desempeño de los arreglos (Gajardo et al., 2019) y los esfuerzos de corte sobre el lecho (Gotelli et al., 2019).

En la Figura 5, se presentan los resultados de las simulaciones realizadas a partir de los experimentos de Stallard et al., (2013). En la figura se muestra una captura instantánea de las estructuras coherentes de la estela, obtenida a partir de cada modelo. Los resultados muestran que a medida que mejoramos la representación de la turbina, la complejidad espacial de las estructuras obtenidas también aumenta. Esta mejora en la representación de los procesos físicos (como la incorporación explícita de la rotación en el caso de ALM) permite una caracterización más detallada de la dinámica local y esto mismo conlleva a una descripción más exhaustiva del flujo a escalas mayores, sin embargo, esto inherentemente conlleva un mayor costo computacional.



**Figura 5.** Visualización de las estructuras coherentes del flujo instantáneo para los distintos modelos actuadores.



Finalmente, con respecto a la parametrización de un grupo de turbinas usando discos actuadores, en el trabajo de Soto-Rivas et al., 2019 se muestra que el parámetro  $C_{tGranja}$  se ve levemente afectado ante un aumento de columnas de turbinas. Esto es debido a que, en promedio, el flujo se enfrenta a la misma densidad de turbinas, es decir a la misma razón entre área del disco, sobre área ocupada por cada dispositivo. Otro factor que no produce alteraciones significativas en el coeficiente de la granja es la profundidad del canal, sobre la altura de los dispositivos. Sin embargo, en esta investigación solo se estudian valores de  $H/Z_{centro} < 3.3$ , por lo que no se puede asegurar que esta variable no sea significativa para menores valores.

Los resultados de  $C_{tGranja}$  muestran principalmente dos casos:

- Para granjas con dos filas,  $C_{tGranja}$  es inversamente proporcional a la separación lateral  $S_y/D$ . Este valor puede ir desde  $S_y/D=1$  para turbinas que están juntas lateralmente, hasta  $S_y/D \rightarrow \infty$ , donde las estelas no interactúan debido a que los dispositivos están muy separados.
- Para granjas con más de dos filas,  $C_{tGranja}$  sigue siendo inversamente proporcional a  $S_y/D$ , pero además decae de manera exponencial con la distancia entre los dispositivos en la dirección del flujo  $S_x/D$ . Se propuso una función exponencial, ya que esta tiende a cero cuando  $S_x/D \rightarrow 0$  (es decir los dispositivos tienden a juntarse), lo que refleja el hecho de que el flujo no puede penetrar en la granja. Por otro lado, cuando los dispositivos se separan en la dirección del flujo,  $C_{tGranja}$  se vuelve independiente de esta variable.

Finalmente, se obtuvo una ecuación de la siguiente forma:

$$\frac{C_{tGranja}}{C_t'} = \begin{cases} \beta \frac{D}{S_y} + \gamma, \frac{L_x}{S_x} = 2 \\ \left(1 - \exp\left(-\alpha \frac{S_x}{D}\right)\right) \left(\frac{D}{S_y}\right) + \zeta, \frac{L_x}{S_x} > 2 \end{cases} \quad (4)$$

Donde los parámetros  $\beta = 0.39$ ,  $\gamma = 0.72$ ,  $\alpha = 0.25$ , y  $\zeta = 0.57$  son coeficientes calculados de manera empírica, minimizando el error entre los datos obtenidos y la fórmula propuesta.

Con esta expresión, se puede calcular fácilmente la fuerza resultante de una granja de turbinas determinada, sin la necesidad de correr costosas simulaciones numéricas. El nuevo coeficiente  $C_{tGranja}$  puede ser incorporado en la ecuación de momentum del modelo de circulación oceánica FVCOM para representar grupos de dispositivos THM en condiciones reales, considerando la batimetría y corrientes de marea de una zona específica.

## 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se presentó la investigación realizada en MERIC sobre la modelación de los procesos hidrodinámicos involucrados en la generación de energía mareomotriz a distintas escalas, así como la interacción entre estas. Esta investigación busca contribuir a la caracterización del potencial energético de la costa chilena a escala regional, así como generar avances en la comprensión de los procesos físicos involucrados en la interacción entre el flujo turbulento y los dispositivos a la escala de la turbina. Finalmente se presentó una metodología que permite retroalimentar a los modelos regionales de información sobre los efectos de las granjas de turbinas en el flujo, mediante una parametrización determinada por la disposición espacial del arreglo. El nivel de detalle incorporado en cada etapa de la modelación responde directamente a la pregunta científica que se busca responder y a los procesos físicos que se busca representar mediante cada modelo.

En esta investigación, se ha pretendido proveer un marco conceptual robusto que permita el estudio y análisis de la generación de energía mareomotriz desde un enfoque hidrodinámico y sus implicancias en el entorno a diferentes escalas.

## AGRADECIMIENTOS

Esta investigación se realizó gracias al apoyo del proyecto *Marine Energy Research & Innovation Center (MERIC)* (14CEI2-28228). Se agradece igualmente al proyecto Fondef/Conicyt D09i1052 para la obtención de los datos necesarios a las modelaciones numéricas. Powered@NLHPC: Esta investigación fue parcialmente apoyada por la infraestructura de supercómputo del NLHPC (ECM-02).

## REFERENCIAS

- Chen, Ch., 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 & Oceanic Technology*, Vol. 20, pp. 159-186.
- Burton, T., Sharpe, D., & Jenkins, N. (2001). *Handbook of wind energy*. John Wiley & Sons.
- Escauriaza, C., & Sotiropoulos, F. (2011). Initial stages of erosion and bed form development in a turbulent flow around a cylindrical pier. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 116(F3).
- Gajardo, D., Escauriaza, C., & Ingram, D. M. (2019). Capturing the development and interactions of wakes in tidal turbine arrays using a coupled BEM-DES model. *Ocean Engineering*, 181, 71-88.
- Gotelli, C., Musa, M., Guala, M., & Escauriaza, C. (2019). Experimental and Numerical Investigation of Wake Interactions of Marine Hydrokinetic Turbines. *Energies*, 12(16), 3188.

- Guerra M., Cienfuegos R., Thomson J., Suarez L. (2017). “Tidal energy resource characterization in Chacao Channel, Chile”. *International journal of marine energy*, 20 (2017): 1-16
- Kang, S., Yang, X., & Sotiropoulos, F. (2014). On the onset of wake meandering for an axial flow turbine in a turbulent open channel flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 744, 376-403.
- Lucero F., Catalán P., Ossandón A., Beyá J., Puelma Andrés, Zamorano L. (2017). “Wave energy assessment in the central-south coast of Chile”. *Renewable Energy*, 114 (2017): 120-131.
- Sandoval, J., Gotelli, C., Soto-Rivas, K., Escauriaza, C. Coherent Structure Dynamics of the wake developed downstream horizontal hydrokinetic tidal turbines using three coupled DES-Actuator Model approaches. Enviado a: *Energies*
- Simón-Moral, A., Santiago, J. L., Krayenhoff, E. S., & Martilli, A. (2014). Streamwise versus spanwise spacing of obstacle arrays: parametrization of the effects on drag and turbulence. *Boundary-layer meteorology*, 151(3), 579-596.
- Soto-Rivas, K., Richter, D., & Escauriaza, C., (2019). A formulation of the thrust coefficient for representing finite-sized farms of tidal energy converters. Enviado a: *Energies*
- Stallard, T., Collings, R., Feng, T., & Whelan, J. (2013). Interactions between tidal turbine wakes: experimental study of a group of three-bladed rotors. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 371(1985), 20120159.
- Stevens, R. J., Martínez-Tossas, L. A., & Meneveau, C. (2018). Comparison of wind farm large eddy simulations using actuator disk and actuator line models with wind tunnel experiments. *Renewable energy*, 116, 470-478.