SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XXIII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

OBSERVACIONES DE TURBULENCIA EN SITIOS ADECUADOS PARA LA EXTRACCION DE ENERGIA HIDROCINETICA

MARICARMEN GUERRA P.¹ JIM THOMSON²

RESUMEN

El recurso hidrocinético disponible en ríos y canales mareales es usualmente definido a partir de las velocidades promedio del flujo. Sin embargo, la turbulencia ambiental es igualmente indispensable, tanto para el diseño de las turbinas que extraerán dicha energía, como para el análisis de la recuperación de la estela generada por estas turbinas. En este trabajo se presentan una serie de mediciones de turbulencia ambiental en distintos sitios altamente energéticos aptos para la extracción de energía hidrocinética en Chile y en Estados Unidos. Las mediciones permiten caracterizar la turbulencia en términos espectrales, así como también la estimación de la producción y disipación de energía cinética turbulenta. Estos últimos parámetros son utilizados para estudiar el balance de energía cinética turbulenta en cada uno de los sitios. Las mediciones son de utilizad para extraer parámetros para el diseño de turbinas hidrocinéticas, generar modelos de turbulencia, y estudiar otros fenómenos como la difusión de contaminantes y el transporte de sedimentos.

¹Estudiante de Doctorado, Applied Physics Laboratory, University of Washington – mguerrap@uw.edu

²Principal Oceanographer/Associate Professor, Applied Physics Laboratory, University of Washington – jthomson@apl.washington.edu

1. INTRODUCCION

La energía hidrocinética es una forma de energía renovable y predecible disponible en ríos y canales mareales. En Chile, el Canal de Chacao y el Estrecho de Magallanes, han sido previamente identificados como sitios altamente energéticos y adecuados para la extracción de esta energía (Cruz et al., 2009). La extracción de esta energía requiere de la instalación de dispositivos, conocidos como turbinas hidrocinéticas, directamente en el flujo, por lo que una detallada caracterización de las condiciones hidrodinámicas es necesaria para cuantificar el recurso energético disponible, escoger los sitios adecuados para su extracción, y la ubicación específica de las turbinas (Lewis et al., 2015; Chamorro, 2013).

El diseño de turbinas hidrocinéticas requiere también de información sobre la turbulencia ambiental a la que estarán sometidas, ya que es conocido que las fluctuaciones turbulentas tienen un impacto en el desempeño y en la durabilidad de las componentes de cada turbina (Chamorro et al., 2013; Cavagnaro, 2014). Por ejemplo, ciertas escalas de turbulencia podrían interactuar con las turbinas provocando una mejora en su desempeño, mientras otras pueden provocar su ruptura (Chamorro et al., 2013). Al mismo tiempo, la turbulencia ambiental tiene un efecto en la extensión y evolución de la estela que generan las turbinas (Blackmore et al., 2014). Por lo tanto, además de las condiciones hidrodinámicas promedio que revelan el potencial energético en cada sitio, es necesario considerar una caracterización detallada en el tiempo y en el espacio de la turbulencia ambiental en la evaluación del recurso energético de un sitio de interés

La caracterización de las fluctuaciones turbulentas en el tiempo requiere de mediciones a alta frecuencia de muestreo. Los instrumentos acústicos basados en el efecto Doppler son ampliamente utilizados para capturar turbulencia tanto en ríos como en el océano. Entre ellos, los Velocímetros Acústicos Doppler (ADV, por su nombre en inglés) permiten medir velocidades a altas frecuencias de muestreo con bajo ruido, logrando capturar un amplio rango de escalas turbulentas, pero en un solo punto en la columna de agua (Kilcher et al., 2017). Al mismo tiempo, una nueva generación de perfiladores acústicos Doppler, específicamente el Signature1000 de Nortek (llamado AD2CP para diferenciarse de las previas generaciones de perfiladores), permite medir velocidades turbulentas a lo largo de la columna de agua a alta frecuencia con una precisión cercana a la de un ADV (Guerra y Thomson, 2017).

Este trabajo presenta mediciones de turbulencia ambiental en sitios altamente energéticos, como el Canal de Chacao en Chile, Admiralty Inlet y Rich Passage en el estado de Washington, EEUU, y el río Kvichak en el estado de Alaska, EEUU; todos adecuados para la extracción de energía hidrocinética. Las mediciones son realizadas utilizando distintos instrumentos acústicos Doppler (ADV y AD2CP) sobre plataformas adecuadas para cada sitio, los que permiten caracterizar la turbulencia ambiental en el tiempo y en el espacio. Los datos son analizados en términos de la energía cinética turbulenta, espectros de frecuencia, y en términos del balance de energía cinética turbulenta, el cual explica la evolución de la turbulencia, donde es producida, y donde es disipada. Las mediciones obtenidas son de utilidad para modelos de turbulencia utilizados en el diseño de turbinas hidrocinéticas como TURBSIM (Jonkman, 2009).

2. SITOS Y METODOS DE MEDICION

Las mediciones se llevaron a cabo en cuatro sitios, tres canales mareales y un río. Los sitios y la ubicación de los puntos de medición se muestran en la Figura 1. Todos los sitios han sido previamente identificados como adecuados para la extracción de energía hidrocinética, y sus características promedio (i.e. velocidades medias y potencia disponible) han sido estudiadas previamente mediante extensas campañas de medición. Cabe mencionar que los sitios de medición ubicados en canales mareales son bien mezcladas, con niveles de estratificación débiles o nulos (Cáceres et al., 2003; WA Department of Ecology, 2015).



Figura 1. Sitios de estudio: a) Ubicación de los sitios en América, b) Admiralty Inlet (Puget Sound), c) Rich Passage (Puget Sound), d) Canal de Chacao, e) Río Kvichak. Los puntos rojos indican la ubicación específica de los instrumentos.

Canal de Chacao, Chile

El Canal de Chacao se encuentra al norte de la Isla de Chiloé (41° S; 73° O). El Canal tiene aproximadamente 40 km de largo y 2.5 km de ancho en su parte más angosta (Roca Remolinos). El canal exhibe un comportamiento mareal, con corrientes en la dirección este-oeste que pueden sobrepasar los 4 m/s durante mareas de sicigia. Las mediciones de turbulencia se llevaron a cabo en el sitio Young (41° 45.746' S; 73° 40.949' O) frente a Carelmapu, a 38 m de profundidad. En este sitio se utilizó la plataforma Tidal Turbulence Mooring (TTM), la cual posiciona dos ADVs, modelo Vector de Nortek, en medio de la columna de agua, aproximadamente a 10 m del fondo marino, donde se posicionaría una turbina hidrocinética (Kilcher et al., 2017). Los ADVs midieron velocidades turbulentas durante 2.5 días entre el 11 y el 14 de Febrero de 2013 (marea de sicigia, suficiente para observar aproximadamente 6 ciclos mareales), a una frecuencia de muestreo de 16 Hz. Estas mediciones requieren de la remoción de la contaminación asociada al movimiento de la TTM, el cual es caracterizado utilizando sensores inerciales de movimiento (IMU por sus siglas en inglés).

Admiralty Inlet, Puget Sound, WA:

Admiralty Inlet se localiza en la parte norte del Puget Sound (48.14° N; 122.71° O), en el estado de Washington, Estados Unidos. El canal tiene un ancho de 6.5 km, y corresponde al punto de conexión entre el Puget Sound y el Estrecho de San Juan de Fuca. El flujo en Admiralty Inlet es principalmente controlado por las mareas, con velocidades del orden de 3 m/s, la dirección principal del flujo es aproximadamente noroeste-sureste (Polagye y Thomson, 2013). Las mediciones de turbulencia fueron tomadas en el extremo norte del canal, cercano a la punta conocida como Admiralty Head, a 50 m de profundidad. Los datos fueron tomados durante el 11 y 12 de Mayo de 2015 (previo a la marea de cuadratura) utilizando un nuevo perfilador acústico Doppler, el Signature1000 AD2CP de Nortek, el cual tiene 5 beams (cuatro oblicuos y uno vertical) y permite medir velocidades turbulentas a 8 Hz cuando se utilizan los 5 beams (Guerra y Thomson, 2017). En este caso, el AD2CP se instaló sobre un trípode Oceanscience (Figura 2b), y se tomaron mediciones de velocidad en 20 puntos de la columna de agua espaciados por 1 m, comenzando desde los 1.4 m desde el fondo. La frecuencia de muestro fue de 8 Hz, y se midió en intervalos de 10 minutos de duración cada 10 minutos.

Rich Passage, Puget Sound, WA:

Rich Passage se encuentra al sur de la Isla Bainbridge, en medio del Puget Sound (47.59° N; 122.56° O), en el estado de Washington, Estados Unidos. En el sitio de medición, la profundidad es de 28 m, el canal es de aproximadamente 500 m de ancho y se orienta en la dirección norestesuroeste. Las velocidades máximas observadas en Rich Passage son del orden de 2.5 m/s. Las velocidades turbulentas en este canal fueron medidas durante el 17 y el 18 de Mayo de 2015 (durante marea de sicigia) utilizando el perfilador Signature1000 de Nortek instalado sobre un trípode Oceanscience (Figura 2b). En este caso se tomaron mediciones en 15 puntos a lo largo de la columna de agua espaciados por 1 m, comenzando desde los 1.4 m desde el fondo. La frecuencia de muestro fue de 8 Hz, y se midió en intervalos de 10 minutos de duración cada 20 minutos con el fin de hacer más eficiente el uso de la batería del instrumento.

Kvichak River, AK:

El río Kvichak ubicado en el suroeste de Alaska, Estados Unidos, fluye en dirección suroeste desde el lago Iliamna hacia la Bahía Bristol. El sitio de estudio se encuentra justo aguas abajo de la villa de Iguigig (59.32 N; 155.91 O). En el sitio de estudio, el rio es de aproximadamente 5 m de profundidad, y la velocidad máxima es de 2.5 m/s al centro del río. Los datos fueron recolectados entre el 8 y el 13 de Julio de 2015 previo a la instalación y conexión a la red eléctrica de la turbina RivGen de Ocean Renewable Power Company (ORPC). Esta campaña, diferente a las tres anteriores, tuvo por objetivo caracterizar espacialmente el flujo medio en el río y la turbulencia, para luego estudiar los efectos dejados por la turbina y la extracción de energía (no presentados en este trabajo). La velocidad superficial del río y las variaciones de la velocidad a lo largo de la columna de agua fueron medidas utilizando el derivador lagrangeano

Swift v4 β . Esta versión beta de la boya SWIFT (Thomson, 2012), consiste en una boya de disco que sostiene el Signature1000 de Nortek mirando hacia abajo (de la superficie hacia el fondo del río), y dos GPS para medir la posición del derivador y la velocidad a la que deriva por la superficie del río (Figura 2c). El Signature1000 midió velocidades turbulentas a 8 Hz en 14 puntos a lo largo de la columna de agua separados por 0.5 m, comenzando 0.5 m bajo la superficie libre. El campo tridimensional de velocidades fue caracterizado a partir de más de 150 transectos en los que el derivador flotó libre siguiendo líneas de corriente a lo largo del río, cubriendo el ancho del río un y área desde 200 m aguas arriba hasta 200 m aguas abajo de la posición de la turbina.



Figura 2. Instrumentos y Plataformas: a) ADVs instalados en el vano de la TTM previo a la instalación en el Canal de Chacao, b) Signature1000 AD2CP de Nortek sobre un trípode Oceanscience para instalación en Admiralty Inlet y en Rich Passage, y c) Swift v4β, Signature1000 mirando hacia abajo sobre una boya, más GPS para localización.

3. ANALISIS DE DATOS

Las campañas de medición en canales mareales estudian el comportamiento temporal de la turbulencia, mientras que las mediciones en el río se enfocan en caracterizar espacialmente el flujo medio y la turbulencia. La calidad de todos los datos es controlada mediante métodos de remoción de peaks (Goring y Nikora, 2002); mediciones con baja correlación y amplitud son removidas de acuerdo a las recomendaciones del fabricante de cada instrumento. En el caso de las mediciones en el Canal de Chacao, el ruido asociado al movimiento de la TTM es removido siguiendo el método presentado en Kilcher et al. (2017).

Series de Tiempo

Las series de tiempo de turbulencia recolectadas en los canales mareales son procesadas en intervalos de tiempo cortos con el fin de asegurar la estacionaridad de las mediciones y al mismo tiempo capturar las escalas espaciales más largas de turbulencia (i.e. tener una velocidad promedio estable, pero una serie de tiempo suficientemente larga que garantice buenos estadísticos de turbulencia) (McCaffrey et al., 2015). En este caso las mediciones del Canal de

Chacao son procesadas en intervalos de 5 minutos, y las de Admiralty Inlet y Rich Passage, en intervalos de 10 minutos.

La Figura 3 muestra las series de tiempo de velocidad en la dirección principal de la corriente recolectadas en el Canal de Chacao (3a), en Admiralty Inlet (3b), y en Rich Passage (3c). Todas las mediciones presentadas se localizan aproximadamente a 10 m del fondo. En las figuras, la línea negra corresponde a la velocidad media estimada en cada intervalo de 5 o 10 minutos, según corresponda, mientras que los puntos plomos corresponden a las fluctuaciones turbulentas. Como se observa en las figuras, para todos los sitios la velocidad media presenta un comportamiento harmónico típico de las corrientes mareales. En el Canal de Chacao las corrientes observadas varían entre los 0 y 3 m/s en llenante y vaciante (valores positivos y negativos respectivamente), mientras que en Admiralty Inlet y Rich Passage las velocidades observadas varían entre los 0 y 2 m/s. En todos los sitios se pudo observar al menos un ciclo mareal completo de 12 horas.

La intensidad turbulenta (IT) corresponde a la razón entre la desviación estándar de las fluctuaciones turbulentas y la velocidad media, y es uno de los parámetros más utilizados para describir el nivel de turbulencia en un sitio. En estos sitios de medición, la intensidad turbulenta tiene valores similares, y varía entre un 5 y 20% de acuerdo al ciclo mareal.



Figura 3. Series de tiempo de velocidad en la dirección principal del flujo y fluctuaciones turbulentas en a) Canal de Chacao, b) Admiralty Inlet, c) Rich Passage.

Análisis Espectral

La distribución de energía cinética turbulenta (k) entre los vórtices de distinto tamaño (y frecuencia) es representada a través del espectro de energía cinética turbulenta. Estos espectros entregan información acerca del tamaño (i.e. frecuencias) de las fluctuaciones turbulentas que podrían interactuar con la infraestructura instalada en el flujo. Las series de tiempo de velocidades turbulentas medidas en los tres canales mareales son utilizadas en el análisis espectral de turbulencia.

Los espectros son calculados utilizando el método de promedio de segmentos superpuestos de Welch. Para el caso del Canal de Chacao se utilizan series de tiempo de 5 minutes y los espectros resultantes tienen 16 grados de libertad, mientras que para los datos de Admiralty Inlet y Rich Passage, se utilizan series de tiempo de 10 minutos y los espectros tienen 45 grados de libertad. Los espectros calculados son luego promediados de acuerdo a la velocidad horizontal promedio

en intervalos de 0.5 m/s. La Figura 4 presenta espectros de frecuencia, promediados de acuerdo a la velocidad del flujo, correspondientes a las fluctuaciones turbulentas verticales (w'). En los tres casos los espectros se organizan bien de acuerdo a la velocidad promedio, observándose una mayor densidad espectral de k a medida que la velocidad media aumenta (i.e. mayor energía cinética turbulenta total a mayor velocidad promedio).

En los tres casos se distinguen tres regiones en los espectros, las que representan distintos modos de turbulencia. El peak de energía se observa en las bajas frecuencias, región que corresponde a vórtices anisotrópicos, cuya magnitud debe estar limitada por la profundidad en los sitios de medición. Luego, en frecuencias intermedias, se observa una región de turbulencia isotrópica, en la que es posible observar la cascada de energía que sigue la pendiente clásica de $f^{5/3}$ representativa del rango inercial derivado por Kolmogorov (Kolmogorov, 1941). En esta región la energía es transferida desde vórtices de gran escala hacia vórtices más pequeños, hasta que la energía es disipada por la viscosidad. A altas frecuencias, los espectros son afectados por el ruido blanco propio de los instrumentos, el cual es del orden de $10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}^2/\text{Hz}$. Cabe destacar que el bajo ruido del Signature1000 hace posible la observación de la cascada de energía en Admiralty Inlet y Rich Passage, la cual ere típicamente oscurecida por el alto ruido de las antiguas generaciones de perfiladores acústicos.



Figura 4. Densidad espectral de fluctuaciones turbulentas verticales: a) Canal de Chacao, b) Admiralty Inlet, c) Rich Passage. Los espectros son promediados de acuerdo a la velocidad promedio. Los gráficos b) y c) son modificados de Guerra y Thomson (2017). La línea punteada corresponde a la pendiente clásica de la cascada de energía cinética turbulenta.

Distribución Espacial

A diferencia de los sitios mareales, en el Río Kvichak, las mediciones tienen la intención de capturar la distribución espacial de las corrientes y de los estadísticos de la turbulencia. Todos los datos recolectados por la Swift v4 β son organizados en una grilla horizontal de 2 x 2 m², y de 0.5 m de resolución en la vertical. Todas las mediciones tomadas dentro de cada volumen son utilizadas para generar un solo valor de cada parámetro estudiado, como por ejemplo la velocidad media, la energía cinética turbulenta total, la disipación de energía cinética turbulenta, etc. Este método permite reconstruir los perfiles verticales de velocidad a partir de la velocidad capturada por los GPS y las variaciones observadas por el Signature1000.

La Figura 5a presenta los resultados de velocidad media en el área estudiada a 2.5 m bajo la superficie libre del río, profundidad a la que se ubicaría el rotor de la turbina. La velocidad máxima observada es aproximadamente 2.5 m/s al centro del río, cercana a la posición de la turbina (demarcada con rectángulo negro en la figura). Se observa una distribución de velocidades típica de río, con altas velocidades al centro donde es más profundo y más bajas hacia los bancos.

La energía cinética turbulenta total es definida como:

$$k = \frac{1}{2} \left(\overline{u^{\prime 2}} + \overline{v^{\prime 2}} + \overline{w^{\prime 2}} \right) \tag{1}$$

dónde k corresponde a la energía cinética turbulenta total, u, v, y w, a las componentes de velocidad, las primas denotan fluctuaciones turbulentas, y las barras un promedio temporal. Las mediciones con el AD2CP permiten la estimación directa de k utilizando la metodología propuesta en Dewey y Stringer (2007). La Figura 5b presenta la distribución espacial de energía cinética turbulenta en el mismo plano horizontal (2.5 m bajo la superficie libre). Se observan altos valores en los bancos del río, lo que es esperado para turbulencia generada al fondo. Cabe mencionar que todas las mediciones han sido validadas con mediciones tomadas con ADVs estacionarios en distintos puntos del río (no mostrado en este trabajo).



Figura 5. Distribución de velocidades media (a) y de energía cinética turbulenta (b) en el área del Río Kvichak cubierta por las mediciones. Plano horizontal a 2.5 m bajo la superficie libre. La posición de la turbina es representada por el rectángulo negro. La flecha negra denota la dirección del flujo. Las áreas plomas corresponden a los bordes del río.

4. BALANCE DE ENERGIA CINETICA TURBULENTA

El análisis del balance de energía cinética turbulenta identifica la relación entre las fuentes de producción, de disipación, y de transporte de energía cinética turbulenta. A partir de este tipo de mediciones de turbulencia es posible estimar tanto la producción como la disipación de energía cinética turbulenta, su comparación revela si existe un balance entre ellos, o si los términos de transporte son de importancia en estos sitios.

Producción de energía cinética turbulenta

En ambientes marinos con poca influencia de agua fresca (ausencia de estratificación), la energía cinética turbulenta es principalmente producida por el gradiente de la velocidad media y la correlación entre las fluctuaciones turbulentas. Si los gradientes horizontales son despreciables, la producción de energía cinética turbulenta puede ser aproximada como:

$$P \approx -\overline{u'w'}\frac{\partial\overline{u}}{\partial z} - \overline{v'w'}\frac{\partial\overline{v}}{\partial z} - \overline{w'w'}\frac{\partial\overline{w}}{\partial z}$$
(2)

dónde P es la producción de energía cinética turbulenta, u, v y w corresponden a las tres componentes de velocidad, las primas denotan fluctuaciones turbulentas, y las barras un promedio temporal.

El cálculo de la producción requiere conocer los gradientes verticales de las tres componentes de velocidad. Esto es posible con las mediciones obtenidas con el Signature1000, el cual provee mediciones a lo largo de la columna de agua. Al mismo tiempo, el uso de 5 beams, permite estimar directamente los esfuerzos de Reynolds si se retienen las velocidades crudas medidas por el instrumento (Guerra y Thomson, 2017).

A pesar de que las mediciones puntuales de ADV permiten la estimación de los esfuerzos de Reynolds, éstas no permiten la estimación simultánea de los gradientes de velocidad, por lo que para el caso del Canal de Chacao la producción es aproximada como:

$$P \approx -\overline{u'w'}\frac{\partial\overline{u}}{\partial z} = \frac{u_*^3}{\kappa z}$$
(3)

dónde u_* corresponde a la velocidad de fricción, κ es la constante de Von Karman igual a 0.41, y z es la ubicación en la vertical. Esta aproximación supone que el esfuerzo de corte producido por el fondo es constante (Basset et al., 2015), y relaciona el esfuerzo de Reynolds con la velocidad de fricción a través del esfuerzo de corte de fondo. La velocidad de fricción es obtenida a partir del ajuste logarítmico a perfiles verticales de velocidad promedio (en intervalos de 10 minutos) obtenidos previamente en el mismo sitio utilizando un ADCP tradicional. Luego, la estimación de producción está asociada a la velocidad promedio de flujo.

Disipación de energía cinética turbulenta

Dependiendo de la naturaleza de los datos disponibles, da disipación de energía cinética turbulenta puede ser estimada a partir de dos métodos basados en las hipótesis de turbulencia de Kolmogorov: uno a partir del espectro de energía cinética turbulenta (Lumley y Terray, 1983), y un segundo método a partir de la estructura espacial de turbulencia (Wiles et al., 2006). Ambos métodos requieren la observación de la porción isotrópica de las fluctuaciones turbulentas.

Disipación a partir de espectros

La tasa de disipación de energía cinética turbulenta, ε , se relaciona a la porción isotrópica del espectro de frecuencia de energía cinética turbulenta como:

$$S_w(f) = \alpha \varepsilon^{2/3} f^{-5/3} \left(\frac{\bar{u}}{2\pi}\right)^{2/3}$$
 (4)

dónde α es una constante igual a 0.69 cuando se trata del espectro de las fluctuaciones verticales, ϵ corresponde a la disipación de energía cinética turbulenta, y \bar{u} corresponde a la velocidad promedio en la dirección principal del flujo.

Para todos los casos de estudio presentados en este trabajo, los espectros son multiplicados por $f^{5/3}$ con el fin de obtener un espectro compensado (supuestamente horizontal en el rango isotrópico), para luego resolver la ecuación (4) modificada y encontrar el valor de la disipación en cada intervalo de 5 o 10 minutos según corresponda.

Disipación a partir de la función de estructura de turbulencia

En el caso de las mediciones espaciales, en las cuales no se cuenta con una serie de tiempo continua para generar un espectro, la disipación puede ser estimada utilizando la función de estructura de turbulencia de segundo orden (Wiles et al., 2006). La función de estructura relaciona mediciones de velocidad en un mismo eje b_i , pero separadas por una distancia r, y es definida como:

$$D(z,r) = \overline{(b_l(z+r) - b_l(z))^2}$$
(5)

dónde b_i corresponde a una fluctuación turbulenta en el eje *i*, *z* es la posición de la medición original, y *r* es la distancia entre las mediciones. La barra denota un promedio temporal.

En el rango isotrópico de turbulencia, la función de estructura se relaciona con la disipación de energía cinética turbulenta como:

$$D(z,r) = C_{\nu}^{2} \varepsilon^{2/3} r^{-2/3}$$
(6)

dónde C_v^2 es una constante igual a 2.1 (Wiles et al., 2006). Al igual que con los espectros, las funciones de estructura son calculadas utilizando las fluctuaciones turbulentas verticales medidas con el Signature1000. De la misma forma, las funciones de estructura son multiplicadas primero

por $r^{2/3}$, y luego se resuelve la ecuación (6) modificada para obtener la disipación en cada punto en el espacio. Esta metodología es aplicada a las mediciones en el Río Kvichak.

La Figura 6 presenta los resultados de producción y disipación en el Canal de Chacao, Admiralty Inlet y en Rich Passage. Debido a que en el Canal de Chacao los cálculos de producción y disipación no son simultáneos, la Figura 6a presenta una comparación entre producción y disipación para distintas velocidades promedio. En esta figura, los puntos celestes representan estimaciones de la producción, mientras que los puntos naranjos corresponden a estimaciones de disipación, las líneas discontinuas representan el mejor ajuste de estos parámetros a \bar{u}^3 . En esta figura se observa que la disipación se relaciona a la velocidad promedio de acuerdo a la teoría de similitud de Kolmogorov (1941), en la cual $\varepsilon \sim \bar{u}^3/L$, donde *L* es típicamente una escala de longitud definida por la distancia al fondo (en ausencia de estratificación). A pesar de que las estimaciones de producción son más ruidosas que las estimaciones de disipación, ambas estimaciones concuerdan y son del mismo orden de magnitud. Esto sugiere que en el sitio de medición, la turbulencia es producia localmente en el fondo por los esfuerzos de corte, en vez de ser producida en otro lugar y ser transportada al sitio de estudio.

Las Figuras 6b y 6c presentan una comparación directa entre producción (Eje Y) y disipación (Eje X, estimada a partir de los espectros) en Admiralty Inlet y en Rich Passage respectivamente, utilizando toda la información disponible (todos los intervalos de tiempo a todas las profundidades). En estos gráficos se observa una correlación entre las mediciones a lo largo de varios órdenes de magnitud, a pesar de la dispersión presente en las mediciones. Los puntos negros corresponden a valores promediados en los intervalos de velocidad. En Admiralty Inlet se observa, en promedio, un balance 1:1 aproximadamente durante las condiciones más energéticas; durante las condiciones menos energéticas, la producción sobrepasa a la disipación, sugiriendo que en esas condiciones el transporte de k es de importancia. En Rich Passage, los valores promedio indican un balance entre producción y disipación durante todas las condiciones.



Figura 6. Estimaciones de producción y disipación de energía cinética turbulenta: a) En el Canal de Chacao, producción (celeste) y disipación (naranjo) para distintos flujos medios. Las líneas azul y roja representan el mejor ajuste de P y ε a u^3 . b) y c) Estimaciones de producción y disipación en Admiralty Inlet y en Rich Passage, respectivamente. Los puntos negros representan promedios de P y ε , mientras que la línea roja corresponde a la pendiente 1:1. Estos gráficos son reproducidos de Guerra y Thomson (2017).

Las Figuras 7a y 7b presentan estimaciones de producción vertical y de disipación de energía cinética turbulenta en la porción del Río Kvichak cubierta por las mediciones. Para ambos parámetros se observan mayores valores en las zonas de menor profundidad (bancos) de acuerdo a lo esperado para turbulencia generada en fondo rugoso. Al mismo tiempo, se observa en el mapa de producción (8a), un aumento en la producción hacia el banco izquierdo (mirado desde aguas arriba hacia aguas abajo), este aumento podría deberse a cambios en la batimetría, ya que el cambio coincide con una disminución de la profundidad. En este sitio se observa que la producción vertical es de un mayor orden de magnitud que la disipación, sugiriendo que el transporte de energía cinética turbulenta por el flujo medio es de importancia en ese sitio.



Figura 7. a) Producción y b) disipación de energía cinética turbulenta en el Río Kvichak a partir de las mediciones recogidas por la Swift v4β. La posición de la turbina está definida por el rectángulo negro. La flecha negra denota la dirección del flujo.

4. CONCLUSIONES

Este trabajo presenta observaciones de turbulencia en distintos sitios altamente energéticos propuestos para la extracción de energía hidrocinética. Se han utilizado instrumentos acústicos Doppler que permiten capturar un amplio rango de escalas turbulentas con bajo ruido utilizando distintas plataformas para cada sitio. Se ha demostrados que las técnicas de medición son adecuadas para la medición de turbulencia en estos sitios, y que son capaces de entregar información temporal y espacial para el diseño de turbinas hidrocinéticas. Estos métodos pueden ser combinados en futuras campañas de medición.

Las mediciones permiten observar un amplio rango de escalas turbulentas. El espectro de energía cinética turbulenta permite conocer las escalas más energéticas que podrían interactuar con las turbinas hidrocinéticas, y con otras estructuras, presentes en el flujo. Particularmente la observación de la porción isotrópica de turbulencia tanto en los espectros como en las funciones de estructura, permite obtener estimaciones de la disipación de energía cinética turbulenta. Al mismo tiempo, la configuración de los instrumentos junto a mediciones previas de velocidades medias, permite estudiar la producción de energía cinética turbulenta. La obtención de estos parámetros permite analizar el balance de energía cinética turbulenta. Este análisis indica que la producción es aproximadamente balanceada por la disipación en la mayoría de los escenarios, sin embargo hay situaciones en que este balance no se observa, probablemente debido a las condiciones batimétricas de cada lugar.

Las mediciones obtenidas son de utilizad para el diseño y la predicción del desempeño de turbinas hidrocinéticas que se podrían instalar en estos sitios. Los resultados también entregan información para mejorar modelos de cierre de turbulencia incluidos en modelos hidrodinámicos altamente utilizados como ROMS o FVCOM. Los métodos pueden ser también aplicados para

estudiar otros fenómenos hidrodinámicos como plumas de río, difusión de contaminantes, el transporte hidráulico de sólidos, rompimiento de oleaje, entre otros.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el financiamiento recibido de ONR Global y de FONDEF de Conicyt (D09i1052) para las mediciones en el Canal de Chacao, de NAVFAC para la mediciones en Admiralty Inlet y Rich Passage, y del Departamento de Energía de Estados Unidos y ORPC para las mediciones en el Río Kvichak. Además, Maricarmen Guerra agradece el patrocinio de Fulbright y Becas Chile de Conicyt.

REFERENCIAS

Bassett C., J. Thomson y B. Polagye. 2013. Sediment generated noise and bed stress in a tidal channel, Journal of Geophysical Research: Oceans 118, 1–17.

Blackmore, T., W. Batten, and A. Bahaj. 2014. Influence of turbulence on the wake of a marine current turbine simulator. In Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 470.

Cáceres, M., A. Valle-Levinson y L. Atkinson. Observations of cross-channel structure of flow in an energetic tidal channel. 2003. Journal of Geophysical Research, 108, C4, 3114.

Cavagnaro, R. J. 2014. Impact of turbulence on the control of a hydrokinetic turbine. In International Conference on Ocean Energy, Halifax, Canada.

Chamorro, L., C. Hill, S. Morton, C. Ellis, R. Arndt, y F. Sotiropoulos. 2013. On the interaction between a turbulent open channel flow and an axial-flow turbine. Journal of Fluid Mechanics, 716, 658–670.

Cruz, J., M. Thomson, E. Stavroulia, y R. Rawlinson-Smith. 2009. Preliminary site selection: Chilean marine energy resources. Report for the Interamerican Development Bank, Technical Report Garrad Hassan and Partners.

Dewey, R., y S. Stringer. 2007. Reynolds stresses and turbulent kinetic energy estimates from various ADCP beam configurations: Theory. Unpublished, 1–35.

Goring, D. y V. Nikora, 2002. Despiking acoustic doppler velocimeter data. Journal of Hydraulic Engineering, 128 (1), 117–126.

Guerra, M. y J. Thomson. 2017. Turbulence measurements from 5-beam acoustic doppler current profilers. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 34(6), 1267-1284.

Jonkman, B. J. 2009. TurbSim user's guide: Version 1.50. National Renewable Energy Laboratory, Colorado, EEUU.

Kilcher, L., J. Thomson, S. Harding, y S. Nylund. 2017. Turbulence Measurements from Compliant Moorings, Part II: Motion Correction. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 34(6), 1249-1266.

Kolmogorov, A. (1941). Dissipation of energy in the locally isotropic turbulence. Dokl. Akad. Nauk SSR 30, 301–305

Lewis M., S. Neill, P. Robins y M. Hashemi. 2015. Resource assessment for future generations of tidal-stream energy arrays. Energy, 83, 403–415.

McCaffrey, K., B. Fox-Kemper, P. Hamlington y J. Thomson. 2015. Characterization of turbulence anisotropy, coherence, and intermittency at a prospective tidal energy site: Observational data analysis. Renewable Energy, 76, 441–453.

Polagye, B. y J. Thomson. 2013. Tidal energy resource characterization: methodolgy and field study in Admiralty Inlet, Puget Sound, USA. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy 227 (3), 352–367.

Thomson, J. 2012. Wave breaking dissipation observed with "SWIFT" drifters. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 29, 1866-1882.

Thomson, J., B. Polagye, V. Durgesh, y M. Richmond. 2012. Measurements of turbulence at two tidal energy sites in Puget Sound, WA. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 37(3), 363–374.

Thomson, J. et al. 2013. Tidal turbulence spectra from a compliant mooring. In Proceedings of the 1st Marine Energy Technical Symposium (METS), Washington D.C.

Washington State Department of Ecology. 2015. Marine Water Quality Monitoring Program.

Wiles, P. J., T. P. Rippeth, J. H. Simpson, y P. J. Hendricks. 2006. A novel technique for measuring the rate of turbulent dissipation in the marine environment. Geophysical Research Letters, 33(21).