



**UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL**



**CARACTERIZACIÓN DEL CAMPO DE VELOCIDADES EN LA ESTELA PRODUCIDA
POR TURBINAS HIDROCINÉTICAS FLOTANTES.**

POR

Benjamín Andrés Troncoso Riquelme

Memoria de Título presentada a la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Concepción para
optar al título de Ingeniero Civil

Profesor Guía
Maricarmen Guerra Paris

Agosto 2022
Concepción (Chile)

© 2022 Benjamín Andrés Troncoso Riquelme

© 2022 Benjamín Andrés Troncoso Riquelme

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento.

DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mi familia, en especial a mis madre, padre y hermano por ayudarme y guiarme durante todo este largo proceso universitario. También quiero dedicar este proceso a quien siempre me ha dado su apoyo incondicional, mi pareja María Paz y a sus padres quienes me han acogido, aconsejado y motivado como un hijo más.

Además, quisiera dirigir este proyecto a Raquel y Matias por siempre estar presente en los momentos más importantes. A mis compañeros y grandes amigos de universidad, les agradezco por los días y noches de estudio donde el apoyo y las risas no faltaron. A Aruma. gracias por tu amor y por ser una fiel amiga. Finalmente agradecer a todas las personas que han formado parte de este proceso.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece la disposición y los datos brindados por el Laboratorio de Oceanografía Acústica de Dalhousie University, por Luna Sea Solutions Inc, y por Sustainable Marine Energy Canadá, para el desarrollo de esta Memoria de Título. También agradecer a la profesora patrocinante Maricarmen Guerra por motivarme y encantarme en esta área de investigación de la ingeniería, por su paciencia, apoyo y disponibilidad durante el desarrollo de este proyecto, ya que sin su enseñanza y dedicación los resultados de este estudio no serían los reflejados. De la misma manera agradecer a la comisión constituida por el profesor Oscar Link, por sus consejos y acotaciones para perfeccionar este trabajo. Finalmente agradecer a cada profesor de Ingeniería Civil por estos años, por la formación y apoyo para finalizar esta etapa.

RESUMEN

El uso de combustibles fósiles para la generación de energía ha demostrado no ser sostenible en el tiempo debido a su impacto negativo sobre el medio ambiente. La creciente demanda energética hace crítica la búsqueda de fuentes alternativas, en especial de fuentes de energía renovable no convencionales (ERNC). Dentro de ellas, sobresale la energía mareomotriz por su alta predictibilidad. Sin embargo, su desarrollo está actualmente en etapa pre-comercial, donde la investigación aplicada es incipiente.

Los sistemas utilizados para la extracción de energía mareomotriz corresponden a turbinas hidrocinéticas que se instalan directamente en el flujo mareal, principalmente en zonas estrechas como canales mareales, fiordos o estrechos, donde el recurso energético es mayor debido a las altas velocidades. Con el fin de maximizar la extracción de energía en un sitio determinado, se pretende generalmente instalar conjuntos o arreglos de turbinas. Para lograr una instalación adecuada de un arreglo de turbinas, es necesario contar con la caracterización del recurso disponible y una descripción de la estela que generan.

En esta investigación de campo se caracteriza la estela que genera un arreglo de cuatro turbinas de escala comercial, montadas en la plataforma energética flotante PLAT-I emplazada en el canal mareal Grand Passage en la bahía de Fundy ubicada al Este de Canadá. En la evaluación de la estela se utilizan datos de velocidad obtenidos por un perfilador de corriente acústica Doppler (ADCP) móvil. Los datos recolectados fueron organizados de acuerdo a su condición de marea y se dividieron en transectos transversales y longitudinales al flujo. Para cada transecto se identificó la región perturbada por las turbinas (estela) y las regiones del flujo no perturbadas, tanto al este como al oeste de la plataforma. Se compararon los perfiles verticales de velocidad en la estela con la velocidad del flujo aguas arriba de las turbinas obtenida con un correntómetro y con la velocidad de los flujos no perturbados. Los resultados muestran que la estela se manifiesta como un cambio de forma del perfil de velocidades y con una disminución de la velocidad en la profundidad cubierta por las turbinas. Se observó una disminución del 40% de la velocidad en la estela respecto del flujo aguas arriba de las turbinas. La disminución de velocidad fue sobre un 50% respecto del flujo no perturbado a los costados de la estela. Finalmente se observó una recuperación de la estela superior al 80% aproximadamente a 20 diámetros efectivos (287 m) desde la plataforma.

ABSTRACT

The use of fossil fuels for power generation has proven to be unsustainable over time, due to its negative impact on the environment. The growing energy demand makes the search for energy alternatives critical, especially of non-conventional renewable energy sources (NCRE). Among them, tidal energy stands out for its high predictability, however, its development is in a pre-commercial stage, where applied research is incipient.

The systems used for the extraction of tidal energy correspond to hydrokinetic turbines that are installed directly in the tidal flow, mainly in narrow areas such as tidal channels, fjords or straits, where the energy resource is greater due to high speeds. To maximize energy extraction at a given site, turbine developers intend to install turbine arrays or farms. To successfully install and operate a turbine array, it is necessary to characterize the available resource and a description to accurately describe the turbine array's wake.

In this investigation, the wake generated by an array of four commercial-scale turbines, mounted on the PLAT-I floating energy platform located in the Grand Passage tidal channel in the Bay of Fundy in eastern Canada, is characterized. Velocity data obtained by a mobile Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) is used in the evaluation of the wake. The collected data were organized according to their tidal condition and were divided into cross and longitudinal transects. For each cross transect, the region disturbed by the turbines, the wake, and the undisturbed flow regions were identified, both to the east and to the west of the platform. Vertical profiles of velocity in the wake were compared with the velocity of the flow upstream of the turbines obtained with a current meter and with the velocity of the unperturbed flows. The results show that the wake manifests as a change in the shape of the velocity profile and as a decrease in velocity in the depth covered by the turbines. A 40% decrease in velocity was observed in the wake relative to the flow upstream of the turbines. The speed decrease was about 50% with respect to the undisturbed flow on the sides of the wake. Finally, a recovery of the wake greater than 80% was observed approximately 20 effective diameters (287 m) from the platform.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 Motivación	1
1.2 Objetivos	3
1.2.1 Objetivo general	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 Plan de trabajo.....	3
1.4 Principales resultados	4
1.5 Organización de la memoria	5
CAPÍTULO 2 ESTELA DE TURBINAS HIDROCINÉTICAS	6
2.1 Introducción	6
2.2 Energía mareomotriz.....	6
2.3 Turbinas hidrocinéticas	7
2.4 Estela de una turbina	11
2.5 Conclusiones	15
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA	16
3.1 Introducción	16
3.2 Sitio de estudio	16
3.3 Plataforma de energía mareomotriz PLAT-I.....	17
3.4 Levantamiento de datos.....	19
3.5 Condiciones climáticas.....	21
3.6 Preproceso de datos.....	23
3.7 Procesamiento de los datos	24
3.7.1 Identificación de transectos.....	24
3.7.2 Identificación de la estela.....	26
3.8 Evaluación de la estela	28
3.9 Conclusiones	29
CAPÍTULO 4 RESULTADOS.....	30
4.1 Introducción	30
4.2 Calidad de los datos.....	30

4.3	Organización e identificación de transectos.....	31
4.4	Identificación del flujo perturbado.....	34
4.5	Perfiles verticales de velocidad promedio.....	36
4.5.1	Marea llenante.....	36
4.5.2	Marea vaciante.....	40
4.6	Evaluación de la estela.....	43
4.6.1	Disminución de Velocidad.....	45
4.7	Conclusiones.....	49
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES.....		51
REFERENCIAS.....		54
ANEXO 1.1 Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.....		57
ANEXO 4.1 MAPA ACÚSTICO DE CADA TRANSECTO.....		58
ANEXO 4.2 MAPAS E INFORMACION DE CADA TRANSECTO.....		59
ANEXO 4.3 MAPAS DE TRANSECTOS SELECCIONADOS.....		60

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1 Parámetros de la turbina SIT250.....	19
Tabla 3.2 Información y configuración del ADCP	20
Tabla 3.3 Registro horario de velocidad del viento (m/s), dirección del viento (°) y precipitación (mm) para las dos mediciones.....	22
Tabla 4.1 Información del transecto número 8	34
Tabla 4.2 Información del transecto número 6	38
Tabla 4.3 Información del transecto número 21	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Rangos de marea alrededor del mundo	7
Figura 2.2	Turbinas de eje horizontal	8
Figura 2.3	Turbinas de eje vertical	9
Figura 2.4	Turbina hidrocínética SeaGen S (izquierda) y turbina OpenHydro (derecha).....	10
Figura 2.5	Turbina hidrocínética Orbital O2 (izquierda) y turbina hidrocínética RivGen Power System (derecha).....	11
Figura 2.6	Reducción de la velocidad hacia aguas abajo de la turbina	13
Figura 2.7	Disminución de la velocidad en la estela a la profundidad del rotor de la turbina	14
Figura 2.8	Perfil longitudinal de la magnitud de la velocidad en distintas condiciones	15
Figura 3.1	Mapa del canal mareal Grand Passage coloreado por batimetría y en recuadro superior mapa de la bahía de Fundy.....	17
Figura 3.2	Diseño CAD de la plataforma energética flotante PLAT-I.....	18
Figura 3.3	Mapa satelital de Grand Passage y recorrido de mediciones	21
Figura 3.4	Predicción de la serie temporal del nivel del mar para el día 14 de octubre	22
Figura 3.5	Predicción de la serie temporal del nivel del mar para el día 17 de octubre.....	23
Figura 3.6	Vista en planta de un transecto representativo de los datos de marea llenante	26
Figura 3.7	Vista transversal de un transecto representativo de los datos de marea llenante	26
Figura 3.8	Perfil horizontal de velocidad para la celda cinco de un transecto representativo de los datos de marea llenante.....	27
Figura 3.9	Perfiles verticales de velocidad promedio para los tres flujos, de un transecto representativo de marea llenante	27
Figura 4.1	Respuesta acústica de los datos de marea vaciante (14 de octubre del 2020).....	31
Figura 4.2	Respuesta acústica de los datos de marea llenante (17 de octubre del 2020)	31
Figura 4.3	Serie temporal de velocidades obtenidas del correntómetro para el día 14 de octubre del 2020 en marea vaciante	32
Figura 4.4	Serie temporal de velocidades obtenidas del correntómetro para el día 17 de octubre del 2020 en marea llenante.....	32
Figura 4.5	Mapa de los transectos coloreados por la velocidad de la celda cinco, separados por condición de marea y por la velocidad de referencia del correntómetro	33
Figura 4.6	Vista en planta de la magnitud de la velocidad del transecto 8 (llenante)	35

Figura 4.7	Vista transversal de los perfiles verticales de velocidad norte (arriba), perfil horizontal de velocidad de la celda cinco del ADCP con respecto a la distancia recorrida (centro) y respuesta acústica (abajo) del transecto 8 de marea llenante	36
Figura 4.8	Perfiles verticales de velocidad promedio del transecto 8 para cada flujo: a) No perturbado lado oeste, b) Perturbado o estela, y c) No perturbado lado este, para marea llenante....	37
Figura 4.9	Vista en planta de la magnitud de la velocidad del transecto 6 (llenante)	38
Figura 4.10	Vista longitudinal de los perfiles verticales de velocidad horizontal del transecto 6 para marea llenante.....	39
Figura 4.11	Perfiles verticales de velocidad promedio a distintas distancias aguas abajo de las turbinas obtenidas del transecto longitudinal 6 (marea llenante).....	40
Figura 4.12	Vista en planta de la magnitud de la velocidad del transecto 21 (vaciante).....	41
Figura 4.13	Vista transversal de los perfiles verticales de velocidad norte (superior), perfil horizontal de velocidad de la celda cinco del ADCP con respecto a la distancia recorrida (intermedio) y respuesta acústica (inferior) del transecto 21 de marea vaciante	42
Figura 4.14	Perfiles verticales de velocidad promedio del transecto 21 para cada flujo: a) No perturbado lado oeste, b) Perturbado o estela, y c) No perturbado lado este, para marea vaciante. ...	42
Figura 4.15	Perfiles verticales de velocidad promediados dentro y fuera de la estela para los transectos 8, 47, 12, 50, 13, 15, 16 y 4 en marea llenante.....	44
Figura 4.16	Disminución de la velocidad entre correntómetro y flujo perturbado versus la distancia normalizada por el diámetro efectivo, para marea llenante. Panel izquierdo escala lineal y panel derecho escala logarítmica.....	46
Figura 4.17	Disminución de la velocidad entre flujo no perturbado oeste y flujo perturbado versus la distancia normalizada por el diámetro efectivo, para marea llenante. Panel izquierdo escala lineal y panel derecho escala logarítmica.....	46
Figura 4.18	Disminución de la velocidad entre flujo no perturbado este y flujo perturbado versus la distancia normalizada por el diámetro efectivo, para marea llenante. Panel izquierdo escala lineal y panel derecho escala logarítmica.....	47
Figura 4.19	Disminución de la velocidad normalizada en función de la velocidad del correntómetro versus la distancia aguas abajo en diámetros efectivos para el primer caso.....	48
Figura 4.20	Disminución de la velocidad normalizada en función de la velocidad del flujo no perturbado oeste versus la distancia aguas abajo en diámetros efectivos para el segundo caso	48

Figura 4.21	Disminución de la velocidad normalizada en función de la velocidad del flujo no perturbado este versus la distancia aguas abajo en diámetros efectivos para el tercer caso	49
Figura A.4.1	Vista en planta, vista transversal, perfil de velocidad horizontal en celda cinco, perfiles verticales promedio para cada zona e información básica del transecto 8.....	60
Figura A.4.2	Vista en planta, vista transversal, perfil de velocidad horizontal en celda cinco, perfiles verticales promedio para cada zona e información básica del transecto 47.....	61
Figura A.4.3	Vista en planta, vista transversal, perfil de velocidad horizontal en celda cinco, perfiles verticales promedio para cada zona e información básica del transecto 12.....	61
Figura A.4.4	Vista en planta, vista transversal, perfil de velocidad horizontal en celda cinco, perfiles verticales promedio para cada zona e información básica del transecto 50.....	62
Figura A.4.5	Vista en planta, vista transversal, perfil de velocidad horizontal en celda cinco, perfiles verticales promedio para cada zona e información básica del transecto 13.....	62
Figura A.4.6	Vista en planta, vista transversal, perfil de velocidad horizontal en celda cinco, perfiles verticales promedio para cada zona e información básica del transecto 15.....	63
Figura A.4.7	Vista en planta, vista transversal, perfil de velocidad horizontal en celda cinco, perfiles verticales promedio para cada zona e información básica del transecto 16.....	63
Figura A.4.8	Vista en planta, vista transversal, perfil de velocidad horizontal en celda cinco, perfiles verticales promedio para cada zona e información básica del transecto 4.....	64

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN

1.1 Motivación

En el último tiempo se ha evidenciado que la energía en base a combustibles fósiles no es sostenible para el medio ambiente. El cambio climático es uno de los mayores retos de esta era, pero la necesidad de asegurar acceso a la energía para tener calidad de vida y desarrollo económico es igualmente importante (Foster y Elzinga, 2013). Debido a esto, en las últimas décadas se ha observado un aumento en el desarrollo de las energías renovables, alcanzando un 28,6 % de la generación de electricidad mundial en el año 2020 y una meta de un 60% para el año 2030, de acuerdo a lo establecido por la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2021). Una alternativa para suplir esta demanda de energía son las fuentes de energía renovable no convencionales (ERNC), de las cuales las más destacadas son la eólica y solar. Sin embargo, el desarrollo de estas energías es limitado, principalmente porque ya se han desarrollado los mejores proyectos en los mejores sitios o por la oposición de los interesados locales (Boudet, 2019, citado en Robertson et al., 2021). Para suplir la demanda de energía actual se ha puesto foco en fuentes de energía alternativas, siendo el océano uno de los últimos recursos de energía renovable significativo sin explotar (Robertson et al., 2021).

La energía mareomotriz es un tipo de energía marina renovable no convencional que se destaca por su alta predictibilidad. El recurso mareomotriz es determinado por las mareas, las que a su vez son gobernadas por la interacción gravitacional periódica entre el sol, la luna y la tierra. Para la extracción de esta energía, se han desarrollado turbinas hidrocínéticas que se instalan directamente en el flujo, sin la necesidad de un embalse, siendo las turbinas de eje horizontal las más utilizadas. Estas turbinas extraen la energía cinética del flujo de manera similar a una turbina eólica, pero las turbinas hidrocínéticas son de menor diámetro debido a que la densidad del agua es mayor a la densidad del aire (European Marine Energy Centre [EMEC], 2021). Estas turbinas generalmente se instalan en plataformas flotantes o en el fondo marino, comprenden conjuntos o granjas de turbinas y se diseñan en base al recurso disponible y a la turbulencia ambiental, la cual afecta su desempeño y tiempo de vida útil. La instalación de este tipo de turbinas y la extracción de energía produce una estela aguas abajo de esta, la cual se caracteriza por ser de menor velocidad y mayor intensidad turbulenta que el flujo no perturbado, (Mycek et al., 2014). Además, la presencia de una o más turbinas genera impactos

en el ambiente marino, afectando el hábitat de las especies marinas que las rodean, potencialmente produciendo cambios en la mezcla y en el transporte físico y biogeoquímico (Yang y Wang, 2017).

Para asegurar una instalación exitosa de turbinas, se requiere de una descripción precisa del flujo que permita caracterizar el recurso disponible y la estela que producen. Observaciones de campo de velocidad son generalmente realizadas utilizando un perfilador de corriente acústicos Doppler o ADCP por sus siglas en inglés, el cual es un instrumento que permite medir la velocidad del flujo en distintos puntos de la columna de agua. Los estudios de campo sobre la estela de turbinas de escala comercial son escasos principalmente porque el desarrollo de la energía mareomotriz está en etapa pre-comercial y existen solo algunos dispositivos y granjas actualmente funcionando en el mundo (EMEC, 2020). Sin embargo, conocer el campo de velocidades en la estela permite optimizar la ubicación de turbinas adicionales aguas abajo, cuantificar los efectos hidrodinámicos de la extracción de energía, y calibrar y validar modelos numéricos típicamente utilizados en el estudio de estelas (Sandoval *et al*, 2021; Gajardo *et al*, 2019; Gotelli *et al*, 2019).

La bahía de Fundy al este de Canadá, es uno de los sitios con mayor disponibilidad energética mareomotriz del mundo, al presentar grandes rangos de marea y fuertes corrientes (Garrett, 1972 citado en Guerra *et al.*, 2021). Sin embargo, extraer esta energía de un flujo tan fuerte es difícil, debido a la alta turbulencia presente en algunas zonas de la bahía. Así, se han instalado dispositivos hidrocinéticos en zonas con corrientes menos fuertes que permiten generar energía para pequeñas localidades en los alrededores de la Bahía de Fundy (Hay *et al.*, 2013 citado en Guerra *et al.*, 2021). En el canal mareal Grand Passage, ubicado al sureste de la Bahía de Fundy (N 44.27°; W66.34°), se instaló la plataforma energética flotante PLAT-I, la cual incorpora cuatro turbinas de eje horizontal en serie (de 6,3 m de diámetro cada una). Durante el año 2020, el laboratorio acústico oceánico de la universidad de Dalhousie realizó mediciones de campo alrededor de PLAT-I utilizando un ADCP montado en una pequeña embarcación con el fin de obtener un mapa espacial de las velocidades medias de flujo en la estela generada por PLAT-I. En esta memoria se analizaron los datos obtenidos del ADCP, con el objetivo de caracterizar el déficit de velocidad en la estela producida por las cuatro turbinas instaladas a bordo de PLAT-I.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

El objetivo general de este trabajo es caracterizar la disminución de velocidad en la estela generada por un arreglo de cuatro turbinas hidrocínéticas, a bordo de una plataforma flotante, a partir de datos de velocidad obtenidos con un perfilador de corriente acústica Doppler (ADCP) móvil.

1.2.2 Objetivos específicos

1. Procesar y organizar los datos medidos por el ADCP, recolectados en la estela de un arreglo de cuatro turbinas hidrocínéticas flotantes.
2. Determinar el perfil vertical de velocidades en la estela a diferentes distancias aguas abajo de las turbinas y para distintas condiciones de marea.
3. Comparar la velocidad que presenta el flujo perturbado (estela) por las turbinas con la velocidad del flujo no perturbado por estas.
4. Estimar la distancia a la que se recupera la estela generada por el arreglo de las turbinas.

1.3 Plan de trabajo

En primer lugar, se realizó una revisión bibliográfica considerando estudios de energía mareomotriz, turbinas hidrocínéticas y su estela, uso de perfiladores de corriente acústica Doppler, e investigaciones similares a las realizadas en la memoria dando origen al marco teórico y conceptual del trabajo. Luego se obtuvieron los datos a utilizar en la memoria, los cuales fueron levantados en terreno por el laboratorio acústico oceánico de la universidad de Dalhousie y la compañía Luna Sea Solutions, en Grand Passage, Nueva Escocia, Canadá. Utilizando un ADCP montado en una pequeña embarcación, se midieron perfiles verticales de velocidad a lo largo de múltiples transectos perpendiculares y longitudinales al flujo aguas abajo de la plataforma PLAT-I.

Se procedió luego con el procesamiento de los datos, los cuales incluyen los perfiles de velocidad medidos por el ADCP móvil en la estela de la plataforma PLAT-I, la respuesta acústica del ADCP, la correspondiente ubicación espacial de cada medición obtenida por un GPS, y mediciones de velocidad obtenidas con un correntómetro justo aguas arriba de las turbinas de la plataforma PLAT-I. En primer lugar, el procesamiento consistió en organizar los transectos para distintas condiciones de marea. Luego se analizaron cada uno de los transectos por separado identificándose la ubicación de la estela y el flujo no perturbado. Para cada transecto se obtuvo perfiles verticales de velocidad promedio dentro y fuera de la estela.

Finalmente, la caracterización de la velocidad en la estela de la plataforma se realizó comparando los perfiles verticales de velocidad del flujo perturbado por PLAT-I con la velocidad obtenida por el correntómetro y con los perfiles verticales obtenidos del flujo no perturbado (medido a los costados de la estela). En ambos casos, los datos se comparan para las fases de marea vaciante y marea llenante, que se producen en el canal Grand Passage, permitiendo así, observar la disminución de la velocidad en la estela y su recuperación espacial.

1.4 Principales resultados

Se logró plantear una metodología para detectar la estela de las turbinas hidrocineéticas. Del correntómetro se identificó que la medición de marea llenante se realizó en el *peak* de la velocidad (2-3 m/s) y en marea vaciante cuando la velocidad decrecía luego del *peak* (1 m/s). De la inspección de cada transecto se detectó claramente la estela de marea llenante, pero solo se detectaron pequeños rastros de estela en marea vaciante. La evolución de la velocidad en la estela se realizó solo para marea llenante y se tomaron tres casos de comparación, estela-correntómetro, estela-flujo no perturbado oeste, estela-flujo no perturbado este. En el primer caso la disminución de la velocidad es alta cercana a las turbinas, siendo la máxima de 0,81 m/s (40 %) a 0,48 diámetros efectivos (DE), esta decae con la distancia y alrededor de los 10 DE la disminución se mantiene baja, cercana a 0,1 m/s. Para el segundo caso la máxima es de 1,33 m/s (52 %) a 0,08 DE, decayendo y desde alrededor de los 20 DE esta se mantiene baja cercana a 0,3 m/s. Para el tercer caso la máxima es de 1,53 m/s (54 %) a 0,07 DE, decae y luego de los 22 DE se mantiene baja cercana a 0,5 m/s.

1.5 Organización de la memoria

Esta memoria se compone de cinco capítulos, incluido el capítulo de introducción. El Capítulo 2 da a conocer los conceptos básicos que permiten respaldar y justificar el fin de esta investigación a través del estado del arte. En el Capítulo 3 se describe el sitio de estudio, los métodos utilizados para el levantamiento de información y la metodología utilizada en el procesamiento de los datos. En el Capítulo 4 se presentan los resultados y un análisis de estos. Finalmente, en el Capítulo 5 se presentan las conclusiones más importantes de la memoria.

CAPÍTULO 2 ESTELA DE TURBINAS HIDROCINÉTICAS

2.1 Introducción

En este capítulo, se presenta la literatura que permite respaldar y justificar el estudio realizado en esta memoria. Dentro de este capítulo se presenta acerca de energía mareomotriz, de los dispositivos hidrocínéticos para la extracción de esta energía, de la estela que producen estos dispositivos. Además, se presentan investigaciones sobre la estela de turbinas hidrocínéticas utilizando modelos numéricos y observaciones de campo disponibles en la literatura.

2.2 Energía mareomotriz

Existen varias formas de energía marina, tales como las producidas por el viento en altamar, el gradiente térmico oceánico, las corrientes de mareas (mareomotriz), y las de oleaje (undimotriz) (EMEC, 2021). La energía mareomotriz es una energía renovable no convencional (ERNC), generada por los movimientos de las mareas, cuyo origen proviene directamente de las fuerzas gravitatorias y centrífugas generadas entre la Tierra, la Luna y el Sol (Owen, 2008, citado en Zheng *et al.*, 2015). A medida que el nivel del mar sube y baja producto de la marea, se genera un flujo horizontal bidireccional conocido como corriente de marea. En bahías cerradas y canales mareales, se produce un flujo hacia la costa conocido como marea llenante y un flujo hacia afuera de la costa conocido como marea vaciante. Este movimiento o flujo horizontal es la base del recurso energético mareomotriz (Zheng *et al.*, 2015). Por otra parte, cabe mencionar, que los movimientos y posición relativa de los astros involucrados en este fenómeno se pueden pronosticar con gran precisión, por lo que también se pueden predecir las mareas resultantes. Esta regularidad y predictibilidad de las mareas, hace que la energía mareomotriz sea un recurso valioso (EMEC, 2021).

Los recursos de las corrientes de marea son generalmente más grandes en zonas donde existe un gran rango de mareas. Además, las velocidades se amplifican por efecto de canalizaciones tanto por parte de la costa, como también del lecho marino, por ejemplo, en estrechos, alrededor de cabos, en canales mareales y entre islas. En la Figura 2.1 se muestran los rangos de marea alrededor del mundo. En Chile existen dos zonas potenciales para la extracción de energía mareomotriz, el Canal de Chacao y

el Estrecho de Magallanes. En el mundo, una de las zonas con mayor potencial de extracción de energía es la bahía de Fundy ubicada en Nueva Escocia, en la costa este de Canadá.

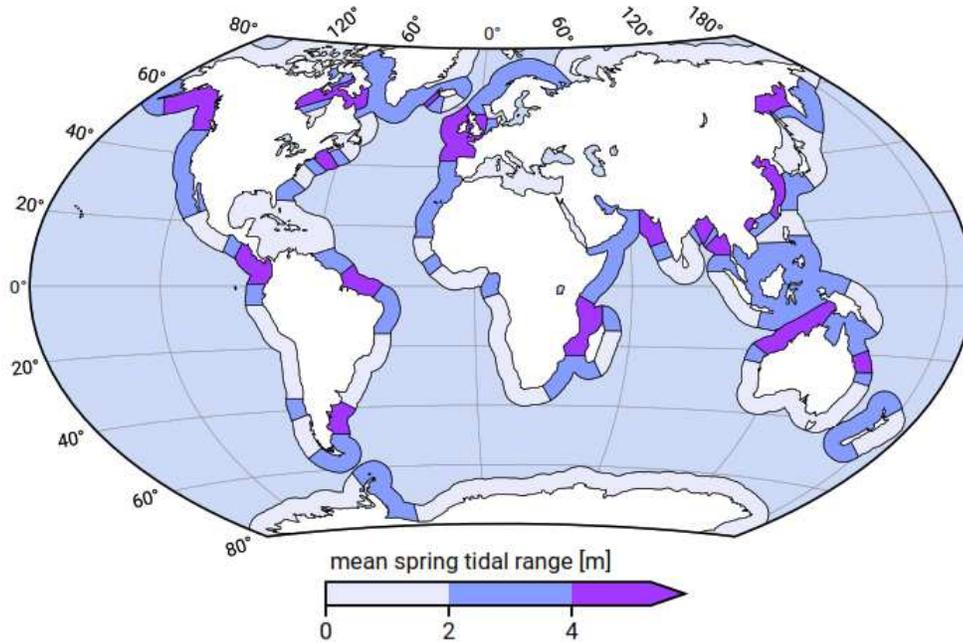


Figura 2.1 Rangos de marea alrededor del mundo

Fuente: Bosboom y Stive (2021)

Existen dos formas de aprovechar la energía mareomotriz. La primera consiste en un sistema de presa para retener el agua movilizada por el aumento o disminución de la marea, aprovechando la energía potencial dentro del embalse (Xia, 2010a,b, citado en Zheng *et al.*, 2015). La segunda consiste en instalar dispositivos hidrocinéticos directamente en el flujo mareal, convirtiendo la energía cinética del flujo en electricidad (Carballo, 2009; Blunden, 2006; Bahaj, 2004, citados en Zheng *et al.*, 2015). La utilización de dispositivos hidrocinéticos en el flujo representa una mayor ventaja respecto al sistema de presas, al tener un menor impacto ambiental y requerir una menor inversión.

2.3 Turbinas hidrocinéticas

Un sistema hidrocinético es un artefacto electromecánico que transforma la energía cinética de un flujo de agua en energía eléctrica, por medio de un generador y un convertidor de potencia electrónica

(Khan *et al.*, 2008 citado en Ibrahim *et al.*, 2021). Estos dispositivos hidrocinéticos buscan extraer la energía de un flujo libre de agua, tal como lo es un río, un canal o las corrientes marinas sin la necesidad de construir una presa o un embalse. Estas turbinas se clasifican principalmente en dos grupos, definidos por la orientación del eje de rotación con respecto a la dirección del flujo de agua. Por un lado, existen las turbinas de eje horizontal donde el flujo es paralelo al eje de rotación y por otro lado las de eje vertical donde el flujo es perpendicular al eje de rotación (Ibrahim *et al.*, 2021).

Las turbinas de eje horizontal son las más utilizadas en el ámbito de la extracción de energía mareomotriz por su similitud a las turbinas eólicas y pueden ubicarse o instalarse de distintas formas, ya sea anclándolas al fondo marino o sostenidas por plataformas móviles tal como se observa en la Figura 2.2. Las turbinas de eje vertical se utilizan comúnmente para la extracción de energía cinética en ríos (Behrouzi *et al.*, 2016 citado en Ibrahim *et al.*, 2021). En la Figura 2.3 se muestran distintos tipos de turbinas de eje vertical.

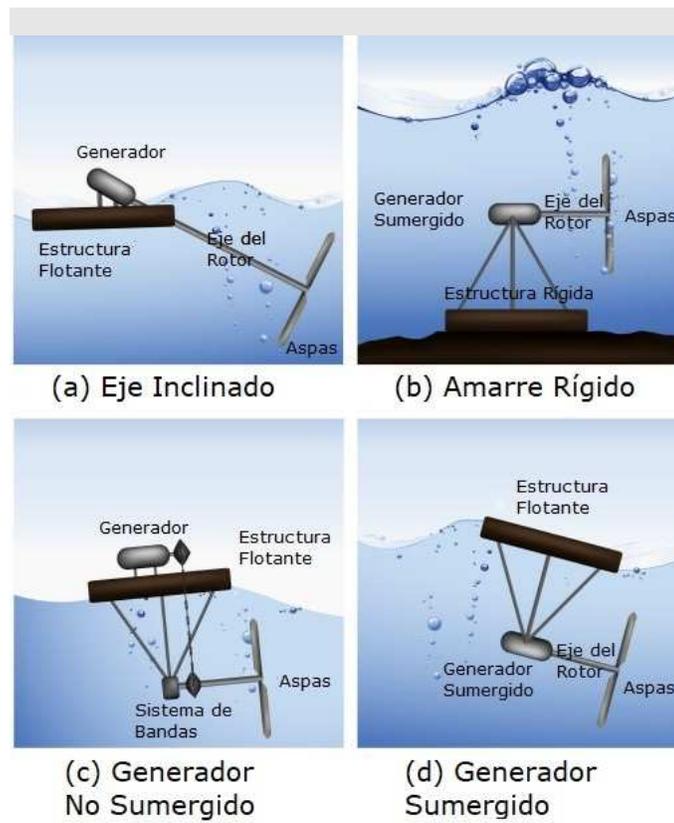


Figura 2.2 Turbinas de eje horizontal

Fuente: Adaptado de Ibrahim *et al.* (2021)

La capacidad de producción de energía de una sola turbina hidrocínética es baja, sin embargo, esta se puede aumentar al agruparlas, por ejemplo, en granjas de turbinas o instalaciones modulares. La potencia que puede extraer una turbina está dada por la Ecuación 2.1.

$$P_T = \frac{1}{2} \rho A C_p v^3, \quad (2.1)$$

donde P_T es la potencia extraíble de la turbina (W), ρ es la densidad del fluido (kg/m^3), A es el área que cubre la turbina (m^2), C_p es el coeficiente de potencia de la turbina y v es la velocidad del flujo (m/s) (Melikoglu, 2018). El coeficiente de potencia de la turbina (C_p), es la cantidad en porcentaje de energía que la turbina puede sacar del flujo y de acuerdo con estudios realizados por Betz, el porcentaje máximo que puede extraer la turbina es de un 59 %, a lo que se le conoce como límite de Betz (Vermaak *et al.*, 2014 citado en Ibrahim *et al.*, 2021). Cabe destacar, que la potencia extraíble depende de la velocidad al cubo del flujo, por lo que una pequeña variación de velocidad influye de manera importante en las variaciones de la potencia extraíble.

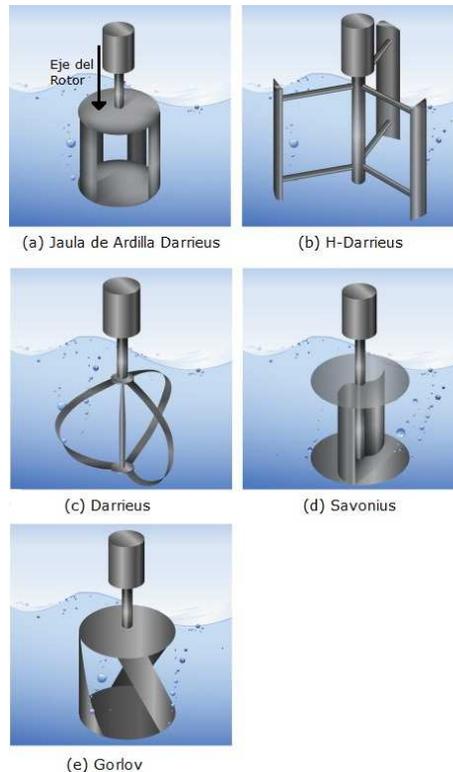


Figura 2.3 Turbinas de eje vertical

Fuente: Adaptado de Ibrahim *et al.* (2021)

Alrededor del mundo se han instalado solo algunas turbinas hidrocínéticas de escala comercial, siendo las de eje horizontal las más utilizadas. En la Figura 2.4 se muestran dos turbinas hidrocínéticas a escala comercial, en el lado izquierdo la primera turbina a gran escala (MW) que se instaló, SeaGen S, desplegada por Marine Current Turbine Ltd. en Strangford Lough, Irlanda del Norte, entre los años 2008 y 2014, esta se componía de dos rotores de 16 m de diámetro capaces de extraer 1.2 MW en total (Zhou *et al.*, 2017) y en el lado derecho la primera turbina de escala comercial que fue instalada en la bahía de Fundy, por la compañía OpenHydro en el año 2010. Esta turbina fue destruida por efecto de la turbulencia y fue reemplazada con un mejor diseño el año 2018, de 16 m de diámetro y 1-2 MW, la cual está fuera de operación Zhou *et al.* (2017).



Figura 2.4 Turbina hidrocínética SeaGen S (izquierda) y turbina OpenHydro (derecha)

Fuente: Zhou *et al.* (2017)

Actualmente, la empresa Orbital Marine Power desplegó en 2021 la turbina hidrocínética más poderosa del mundo en las costas de Orkney, Escocia. En la Figura 2.5 (izquierda) se muestra la turbina flotante Orbital O2, la cual está compuesta por un casco central de 72 m de largo y dos turbinas de 20 m de diámetro en los costados, su capacidad total de extracción es de 2MW (Orbital Marine Power, 2021).

Por otra parte, la empresa Ocean Renewable Power Company (ORPC) desarrolló una turbina de flujo cruzado para extraer energía de las corrientes de ríos y fue desplegada en 2019 en el río Kvichak, Alaska, con el fin de mejorar el sistema energético de una comunidad en Igiugig, Alaska. En la Figura 2.5 (derecha) se muestra la turbina RivGen, la cual opera bajo el agua, es de 15 m de ancho y 16,3 m

de largo, con una capacidad de salida de 40 kW para una velocidad de 2,25 m/s y 80 kW para 3,5 m/s (Ocean Renewable Power Company, 2022).



Figura 2.5 Turbina hidrocineética Orbital O2 (izquierda) y turbina hidrocineética RivGen Power System (derecha)

Fuente: Orbital Marine Power (2021) y Ocean Renewable Power Company (2022)

2.4 Estela de una turbina

La estela es un área que se forma aguas abajo de un cuerpo sumergido en una corriente, o de un cuerpo que se propaga a través de un fluido en reposo, donde las líneas de corriente no son capaces de cerrarse detrás del cuerpo. Estas regiones son estrechas y alargadas en la dirección del flujo, y generalmente presentan un amplio rango de remolinos turbulentos (Telionis, 2020).

El flujo en la estela formada aguas abajo de las turbinas hidrocineéticas, se caracterizan por presentar vórtices generados por el eje del rotor y por las puntas de las aspas, una reducción de la velocidad en comparación con la velocidad de entrada y un aumento en la intensidad de la turbulencia (Neary *et al.*, 2013).

El desarrollo y evolución de la estela de una turbina son factores importantes para el diseño y ubicación en parques de turbinas, con el fin de optimizar la producción y costo de la energía (Neary *et al.*, 2013). El desarrollo de la estela se ve afectado por distintos factores, como la fuerza que ejerce el rotor, la turbulencia inducida por el dispositivo y el ambiente, la cercanía a los límites del lecho y

de la superficie libre, y los perfiles verticales y horizontales de velocidad (Myers y Bahaj, 2010, citados en Guerra y Thomson, 2021).

Las estelas de turbinas a menudo se dividen en dos regiones, una cercana y otra lejana. La región cercana, está fuertemente influenciada por la geometría de la turbina, su estructura física, y la presencia de vórtices (Chamorro *et al.* 2015). Algunos modelos numéricos (Sandoval *et al.*, 2021) han demostrado que la estela cercana se caracteriza por presentar una fuerte reducción de la velocidad y luego una recuperación gradual de la velocidad en la estela lejana.

Caracterizar la estela de una turbina hidrocinética es complejo y en la literatura generalmente se utilizan simulaciones numéricas y/o experimentos de laboratorio a escala. Estos estudios utilizan distintos enfoques para representar tanto el flujo del agua como la turbina, variando de acuerdo a su complejidad y costo computacional.

En un estudio realizado para una turbina Sabella D10 a escala, Gotelli *et al.* (2019) utilizaron un modelo numérico DES (detached-eddy simulation) – BEM (blade element momentum) para simular la dinámica del flujo aguas abajo de la turbina de 9,2 cm de diámetro, anclada al fondo de un canal a escala. Los resultados mostraron que el modelo era capaz de representar las velocidades medias en el sentido de la corriente, pero no pudo reproducir la asimetría del perfil de velocidad en la zona de la estela cercana, ni la aparición de vórtices de punta y estela serpenteante. En la Figura 2.6 se muestra la reducción de la velocidad que hay a la altura del centro del rotor de la turbina versus la distancia aguas abajo de la turbina en función del diámetro (D), la reducción de la velocidad está definida por la Ecuación 2.2.

$$U_{red} = 1 - \frac{U}{U_{\infty}}, \quad (2.2)$$

donde \mathbf{U} es la velocidad de la estela en el sentido de la corriente y U_{∞} es la velocidad máxima aguas arriba de la turbina. De la Figura 2.6 se desprende que las simulaciones tienen una diferencia de 30% y 14,4% en comparación con los datos experimentales en la estela cercana, esto es, a 0,5 D y 1 D, respectivamente y desde los 3 D hacia abajo la simulación muestra un excelente ajuste con los datos experimentales. Finalmente se destaca que a los 10 D aguas abajo la estela recuperó el 80% de la velocidad media en el sentido del flujo.

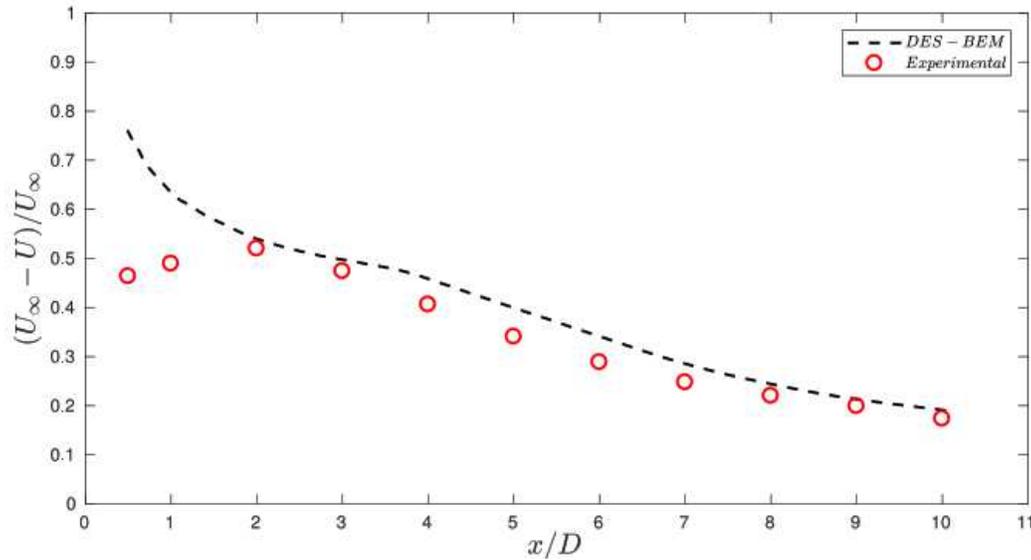


Figura 2.6 Reducción de la velocidad hacia aguas abajo de la turbina

Fuente: Gotelli *et al.* (2019)

En otro estudio realizado por Sandoval *et al.* (2021), se utilizó un modelo numérico DES (detached-eddy simulation) con tres tipos de enfoques distintos ADM (actuador disk model), BEM (Blade element momentum) y ALM (actuador line model) para simular el flujo tridimensionalmente de una turbina de tres palas de 27 cm de diámetro, instalada a una profundidad del rotor de 22,5 cm. Las simulaciones de los tres modelos se compararon con datos experimentales. Los resultados, que se aprecian en la Figura 2.7, mostraron que el enfoque ADM sobrestima la disminución de la velocidad que provoca la turbina y en el caso de BEM y ALM subestiman esta disminución hasta los 5 D - 7D aguas abajo aproximadamente. Luego de ese punto los tres enfoques reproducen de mejor forma la velocidad, siendo el enfoque ADM el que mejor representa los datos experimentales. Así, los modelos resuelven de manera correcta el flujo medio y la disminución de la velocidad desde una distancia de 4D aguas abajo de la turbina, con errores menores al 20 % en el flujo medio.

Por otro lado, existen pocas mediciones de estelas en terreno, esto debido a la baja cantidad de turbinas hidrocínéticas instaladas alrededor del mundo. Además, las condiciones naturales son diferentes a las simuladas en modelos numéricos, los que se desarrollan bajo condiciones ideales y simplificadas. Adicionalmente los resultados de estudios de campos pueden ser distintos a los observados en laboratorio y en simulaciones numéricas, donde además la recuperación de la velocidad de la estela

depende de otros factores como la batimetría local, el viento, el oleaje o la turbulencia local transportada desde aguas arriba.

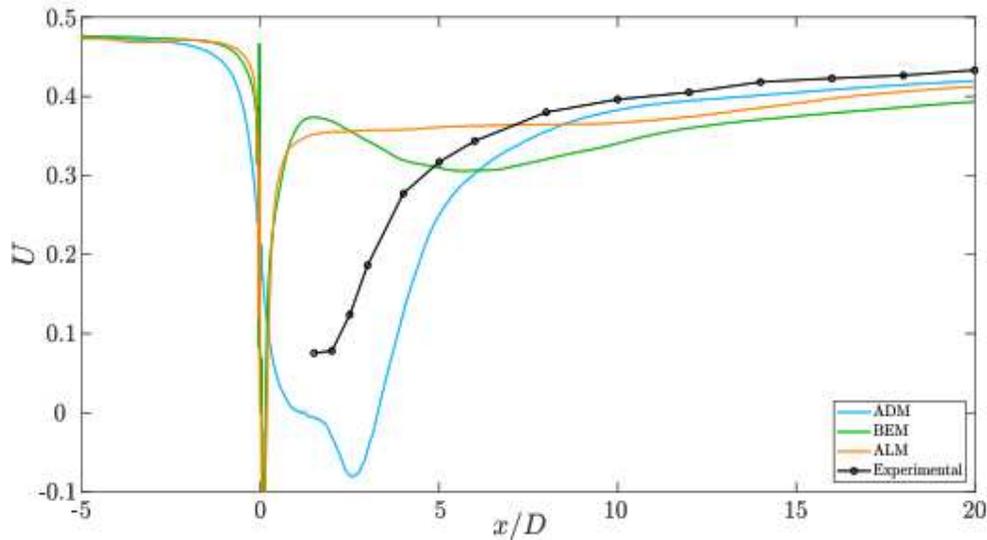


Figura 2.7 Disminución de la velocidad en la estela a la profundidad del rotor de la turbina

Fuente: Sandoval *et al.* (2021)

Guerra y Thomson (2019), realizaron un estudio de campo en el río Kvichak, Alaska, en donde se instaló una turbina hidrocínética de flujo cruzado de 11,5 m de ancho. Se utilizó un ADCP para la captura de datos, con el cual se obtuvo las condiciones de velocidad del flujo en tres dimensiones alrededor de la turbina antes y después de su instalación. Se destacan tres regiones dinámicas en la estela de la turbina como se observa en la Figura 2.7, una primera zona de inducción justo aguas arriba de la turbina, donde las velocidades se reducen y la turbulencia aumenta. Luego, existe una zona de estela cercana justo aguas abajo de la turbina, donde las velocidades reducidas se recuperan ligeramente y la turbulencia elevada decae rápidamente. Por último, hay una zona lejana de estela, donde las velocidades reducidas son persistentes y la turbulencia sigue elevada, lo que concluye que no existe recuperación de la estela en el área estudiada, ya que al ser un río la estela que se produce está limitada lateralmente y no puede extraer energía de los costados del flujo para su recuperación, como si sucede en canales mareales donde la recuperación es más rápida.

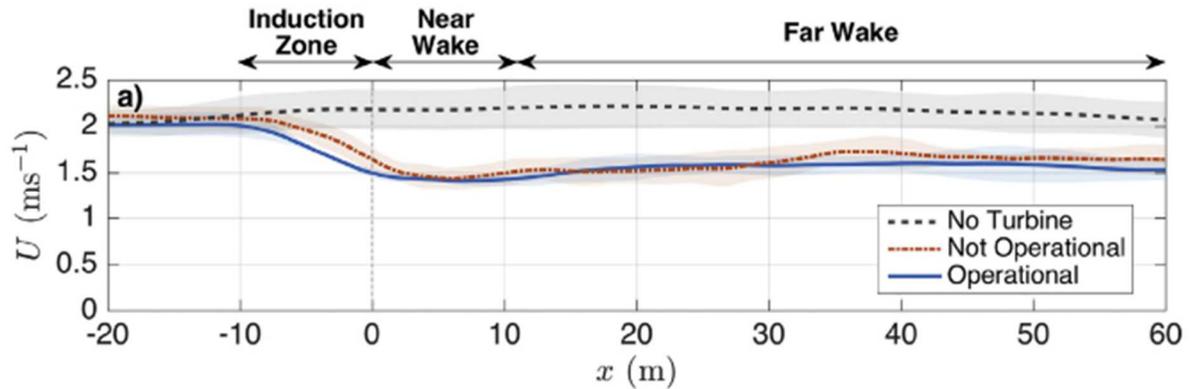


Figura 2.8 Perfil longitudinal de la magnitud de la velocidad en distintas condiciones

Fuente: Guerra y Thomson *et al.* (2019)

Guerra *et al.* (2021), realizó una investigación de campo en el canal Grand Passage en Nueva Escocia, Canadá. En la cual, utilizó boyas equipadas con ADCP y GPS para la obtención de los datos caracterizando el flujo alrededor de la plataforma energética flotante PLAT-I, la cual está compuesta por 4 turbinas de eje horizontal de 6,3 m de diámetro, y obtuvo el mapeo espacial del flujo turbulento aguas arriba y aguas abajo de la plataforma, demostrando que los métodos para capturar las velocidades medias del flujo y los parámetros de turbulencia son adecuados. Junto con esto, la reducción máxima de velocidad observada fue de un 26 %, al comparar las condiciones operativas y no operativas de la plataforma, diferencia que disminuye con la distancia aguas abajo.

2.5 Conclusiones

En términos generales se presentaron los conceptos básicos para comprender cómo se caracteriza la estela generada por una turbina. Primero, presentó que es la energía mareomotriz, como se genera y que la hace un recurso energético valioso para su extracción, luego se dio a conocer que es un dispositivo hidrocinético, la potencia que pueden extraer de un flujo y los tipos de turbinas más destacados en distintos usos, con esto se explicó que es y cómo se comporta una estela. Finalmente se presentaron algunos estudios que caracterizan la estela generada por una turbina tanto en laboratorio como en terreno.

CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA

3.1 Introducción

En este capítulo, se presenta la zona de estudio, la plataforma mareomotriz sobre la cual se desarrollaron las mediciones, el procedimiento utilizado en la recolección de datos, la configuración de los instrumentos utilizados, los periodos en que se realizaron las mediciones y las condiciones climáticas. Luego se describe la metodología usada para el procesamiento de los datos, cómo se obtienen los perfiles verticales de velocidad para cada condición de marea, como se define la comparación de estos para los distintos casos estudiados y cómo se evalúa la disminución de la velocidad aguas abajo de las turbinas.

3.2 Sitio de estudio

Las mediciones de esta investigación fueron realizadas en el canal mareal Grand Passage, un canal de corrientes fuertes (alrededor de los 3 m/s), que se encuentra ubicado en la entrada de la bahía Fundy al suroeste de Nueva Escocia en Canadá (N 44.27; W 66.34). La Figura 3.1 muestra el canal Grand Passage, orientado de norte a sur, localizado entre las islas Long y Brier con alrededor de 1,5 km de ancho y 4 km de largo. Se destaca la ubicación de una pequeña isla (Peter's Island) en la entrada sur del canal. También se muestra en la Figura 3.1 el sistema de coordenadas locales utilizado en esta memoria, donde el eje Y está inclinado $18,8^\circ$ del norte verdadero en sentido antihorario, positivo hacia el norte, el eje X en la dirección ortogonal al eje Y, positivo hacia el este y el eje Z corresponde con la vertical, siendo 0 en la superficie y positivo hacia arriba. Por último, se muestra con un círculo negro la ubicación de la plataforma mareomotriz (PLAT-I), el rectángulo naranja corresponde al área de mediciones, la línea negra corresponde al borde costero y las flechas naranjas describen la dirección de las corrientes, que se dirigen hacia el norte para marea llenante (velocidad positiva) y hacia el sur (dirección opuesta, velocidad negativa) para marea vaciante.

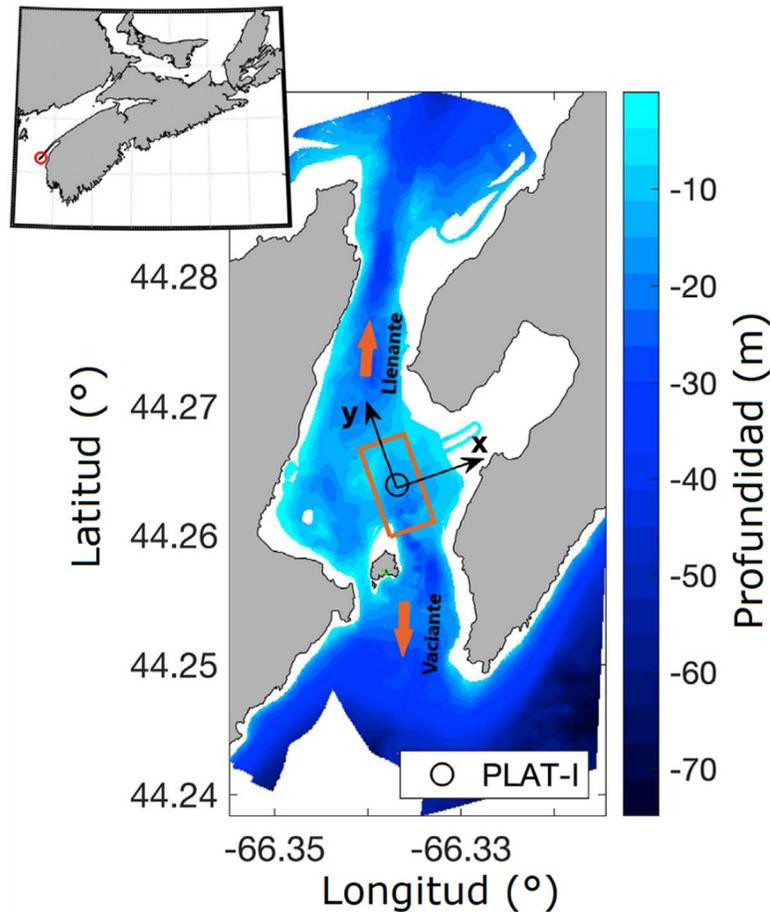


Figura 3.1 Mapa del canal marea Grand Passage coloreado por batimetría y en recuadro superior mapa de la bahía de Fundy

Fuente: Adaptado de Guerra *et al.* (2021)

3.3 Plataforma de energía mareomotriz PLAT-I

Las mediciones se realizaron aguas abajo de la plataforma energética flotante PLAT-I, la cual fue desarrollada por SMEC (Sustainable Marine Energy Canada) y ha estado sometida a evaluaciones en el mar desde el año 2017 hasta el año 2021 tanto en Escocia como en Nueva Escocia (Canadá). PLAT-I es una plataforma flotante (Figura 3.2) de tres cascos, de aproximadamente 30 m de largo (casco central) y 30 m de ancho (cubierta transversal). En la plataforma se monta un arreglo de 4 turbinas SIT250 de eje horizontal, desarrolladas por Schottel Hydro. En la Tabla 3.1 se presentan las características de la turbina SIT250, estas son, diámetro de 6,3 m, potencia nominal de 70 kW para

una velocidad nominal de 2,7 m/s, lo que da una potencia total de 280 kW (Kaufmann *et al.*, 2019). También se define un diámetro efectivo para las cuatro turbinas dado por la Ecuación 3.1

$$D_E = \sqrt{Nt * D^2}, \quad (3.1)$$

donde, D_E es el diámetro efectivo de PLAT-I, Nt es el número de turbinas y D es el diámetro de cada turbina. Así, el diámetro efectivo de la plataforma es de 12,6 m.

La profundidad del rotor de cada turbina es de aproximadamente 5 m con respecto a la superficie libre y la profundidad media a la que se encuentra el lecho marino es de unos 15 m. La plataforma se encuentra amarrada a través de un pivote en la proa (que gira libremente) a una extensión de amarre de dos puntos ancladas en el fondo marino, lo que permite a la plataforma alinearse con el flujo que se aproxima y que las turbinas enfrenten a la corriente de manera perpendicular al rotor en todo momento (Starzmann *et al.*, 2018; Jeffcoate *et al.*, 2018, citados en Guerra *et al.*, 2021). Dentro del ciclo de marea, la plataforma gira con un radio de 35 m con respecto a los puntos de anclaje.

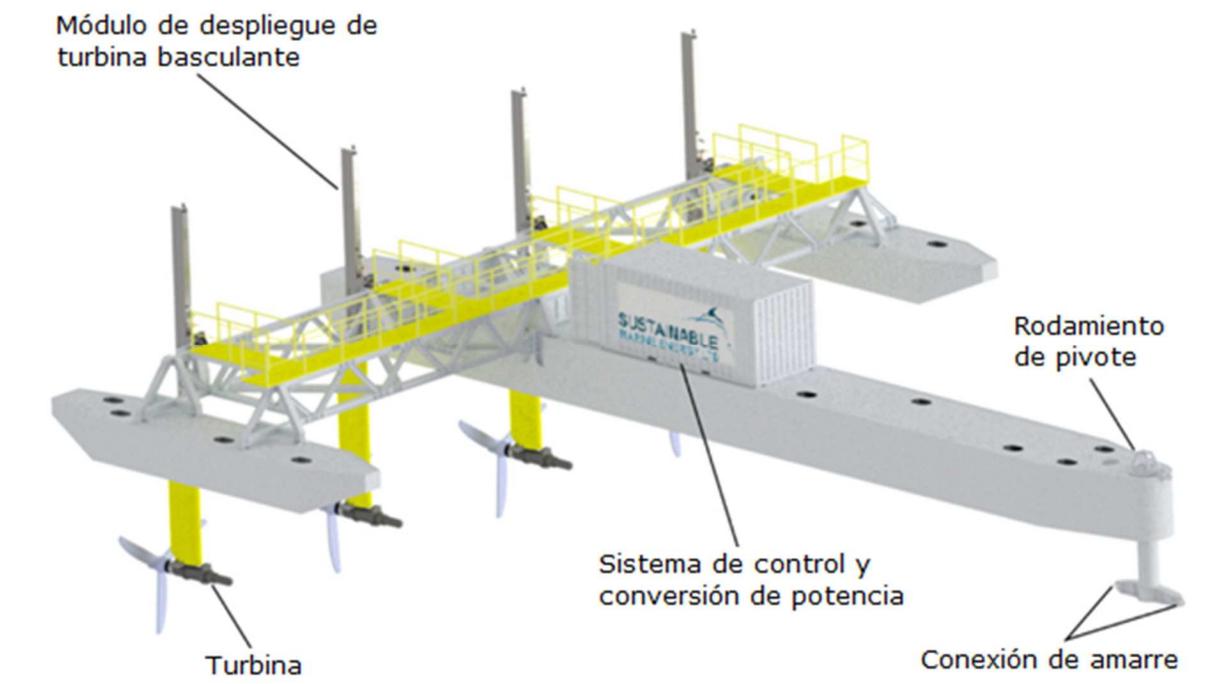


Figura 3.2 Diseño CAD de la plataforma energética flotante PLAT-I

Tabla 3.1 Parámetros de la turbina SIT250

Potencia nominal (mecánica)	85 kW
Potencia nominal (eléctrica)	70 kW
Diámetro turbina	6,3 m
Diámetro del eje	0,36 m
Diámetro efectivo PLAT-I	12,6 m
Profundidad del eje	4,7 m
Espacio horizontal entre los ejes de las turbinas	6,8 m
Velocidad nominal	2,7 m/s
Velocidad de corte (de entrada)	0,9 m/s

Fuente: Starzmann *et al.* (2021)

3.4 Levantamiento de datos

Un perfilador de corriente acústica Doppler o ADCP, por sus siglas en inglés, es un instrumento utilizado para medir la velocidad del flujo en una columna de agua a una profundidad definida, a través de la emisión de ondas de sonido, utilizando el principio de efecto Doppler. Los ADCP son instrumentos versátiles ya que pueden instalarse anclados en el fondo marino o en el lecho de un río, como también pueden montarse en embarcaciones en movimiento o en elementos flotantes (boyas, plataformas fijas). Así, es posible obtener mediciones de acuerdo al objetivo que se requiera (Teledyne Marine, 2007).

Se utilizó para la medición de las velocidades del flujo un ADCP Workhorse de 600 kHz de la marca Teledyne RDI, el cual se instaló en una pequeña embarcación mirando hacia el fondo del mar (*down-looking*). Este instrumento se configuró para medir perfiles de velocidad con una frecuencia de muestreo de 1 Hz. Se utilizaron celdas de 0,5 m de profundidad, donde la primera celda estaba a 2,9 m por debajo de la superficie libre. En la Tabla 3.2 se muestran la información y configuración del ADCP. Además, se instaló en la embarcación un GPS de marca Hemisphere para conocer la ubicación de los perfiles de velocidad obtenidos. La embarcación realizó un recorrido de manera transversal al

flujo hacia aguas abajo de PLAT-I y en algunas ocasiones de manera longitudinal, para ambas condiciones de marea vaciante y llenante.

Tabla 3.2 Información y configuración del ADCP

Instrumento	RDI Workhorse 600 kHz
Plataforma	Montado en embarcación
Frecuencia de muestreo	1 Hz
Coordenadas	Columna
Tamaño de celda	0,5 m
Distancia de 1ra celda	2,9 m
Rango	47,9 m

Fuente: Guerra *et al.* (2021)

Se realizaron dos sets de mediciones aguas abajo de PLAT-I mientras las turbinas se encontraban en funcionamiento bajo el agua (extrayendo energía). El primer set se obtuvo el 14 de octubre del 2020, entre las 16:03 a las 16:51 horas UTC (tiempo universal coordinado por sus siglas en inglés), en condición de marea vaciante. El segundo set de medición se obtuvo el 17 de octubre del 2020, de las 11:10 a las 12:42 horas en UTC, en condición de marea llenante. La Figura 3.3 muestra un mapa satelital del canal Grand Passage, donde se pueden observar las islas que rodean al canal, la plataforma con las turbinas y los recorridos realizados por la embarcación, en azul se muestra el recorrido para las mediciones de marea vaciante y en naranja el recorrido realizado para las mediciones de marea llenante.

Se utilizó un correntómetro (velocímetro) con el fin de medir la velocidad del flujo que enfrentan las turbinas en todo momento. Este instrumento se instaló un metro aguas arriba de las turbinas y a la misma profundidad del centro del rotor, obteniendo una medición de velocidad puntual que varía con respecto al tiempo, incluso más allá de las mediciones. La serie temporal de velocidades obtenidas permite identificar bajo que condición de marea ocurrieron las mediciones, y corresponde a una velocidad de referencia de la velocidad justo aguas arriba de las turbinas.

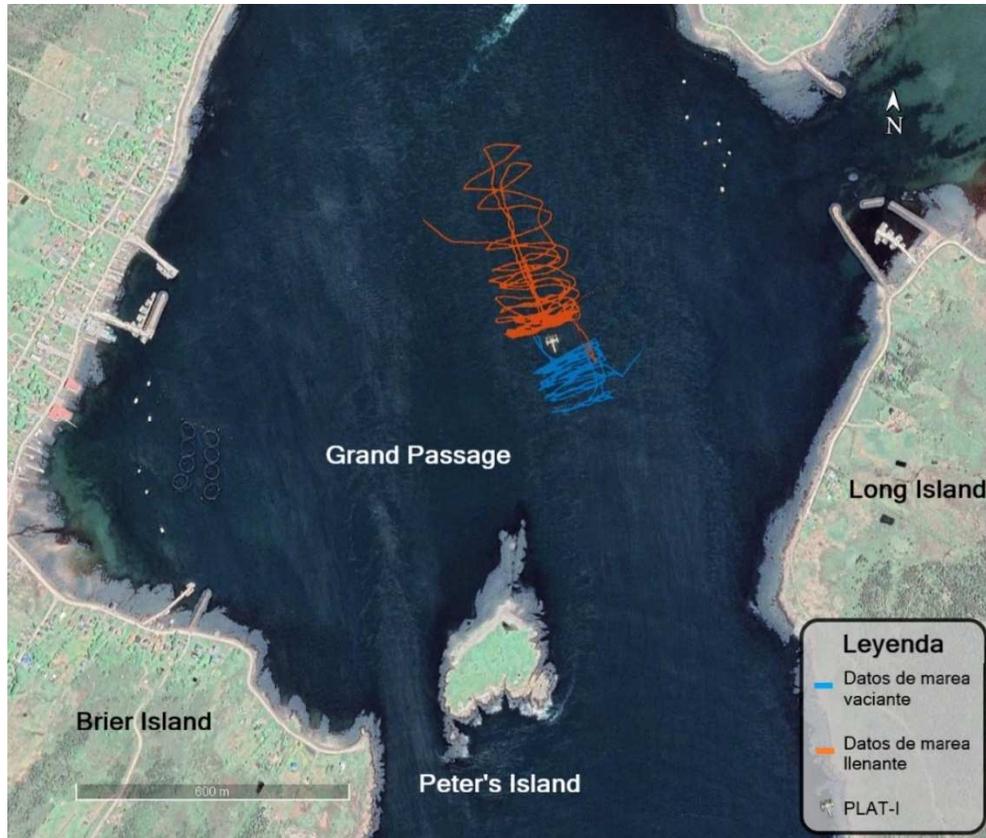


Figura 3.3 Mapa satelital de Grand Passage y recorrido de mediciones

Fuente: Adaptado de CNES y Airbus (2019)

3.5 Condiciones climáticas

El levantamiento de datos se realizó bajo condiciones de viento moderadas, con velocidades del viento menores a los 10 m/s y no se registraron precipitaciones en ambos días de medición, tal como se muestra en la Tabla 3.3. De acuerdo a los datos reportados por el servicio meteorológico de Canadá. Se utiliza el registro horario de la estación Brier Island (N 44.2858, W 66.3466) a una elevación de 15.8 m.

En las Figuras 3.4 y 3.5 se presenta la predicción de los rangos de marea para los días 14 y 17 de Octubre del 2020, respectivamente, donde la línea gris representa el nivel medio del mar y en líneas rojas representan las horas entre las que se realizaron las mediciones para ambos casos. El *peak* de velocidad ocurre con un desfase de 30 min aproximadamente respecto de la marea en nivel medio del

mar. Esta prediccion del nivel del mar se obtuvo de la estacion Westport (N 44.267, W 66.350), ubicada en el canal Grand Passage.

Tabla 3.3 Registro horario de velocidad del viento (m/s), dirección del viento (°) y precipitación (mm) para las dos mediciones

Fecha	14 de octubre 2020		
Tiempo (hora, UTC)	Velocidad del viento (m/s)	Dirección del viento (°)	Precipitación (mm)
16:00	5,0	240	0,0
17:00	5,6	250	0,0
Fecha	17 de octubre 2020		
Tiempo (hora, UTC)	Velocidad del viento (m/s)	Dirección del viento (°)	Precipitación (mm)
10:00	7,5	90	0,0
11:00	8,3	100	0,0
12:00	7,2	110	0,0
13:00	8,9	110	0,0

Fuente: Government of Canada (2021)

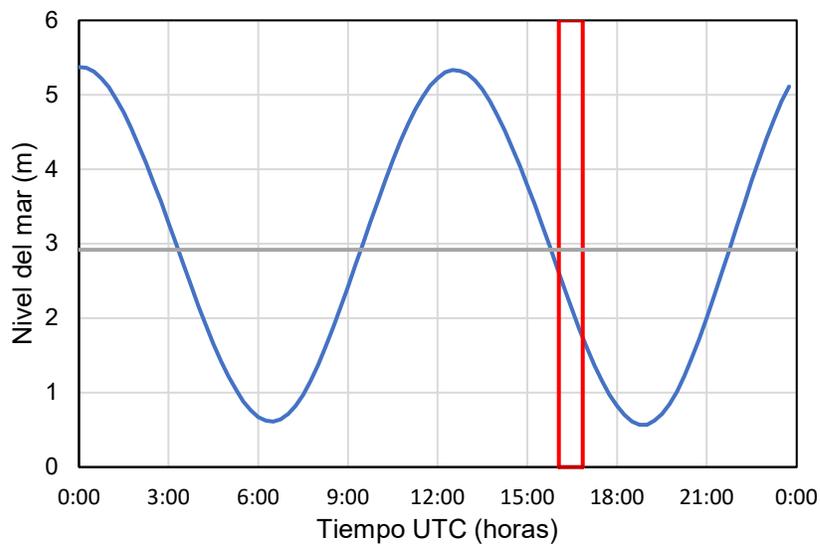


Figura 3.4 Predicción de la serie temporal del nivel del mar para el día 14 de octubre

Fuente: Adaptado de Government of Canada (2022)

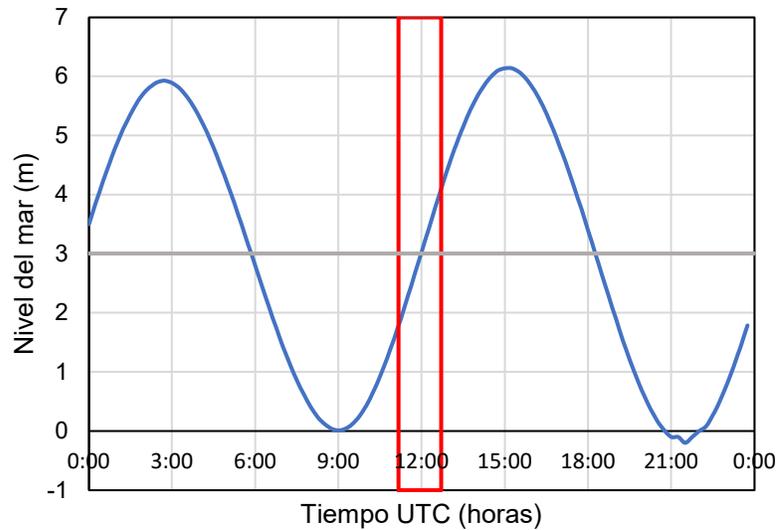


Figura 3.5 Predicción de la serie temporal del nivel del mar para el día 17 de octubre

Fuente: Adaptado de Government of Canada (2022)

3.6 Preproceso de datos

Se realizó un preprocesamiento de los datos crudos del ADCP, controlando la calidad de los perfiles de velocidad, eliminando aquellos que tuvieran una baja respuesta acústica (bajo los 35 dB) y bajas correlaciones (menores a 112,5), según las recomendaciones del fabricante. También se eliminaron las velocidades que eran muy altas (cuando la embarcación se desplaza muy rápido), ya que el ADCP no es capaz de resolver estas velocidades.

Las mediciones realizadas desde una embarcación en movimiento son algo más complejas, ya que la embarcación se mueve más rápido que la velocidad del agua. Así, existen dos velocidades diferentes que se deben combinar para obtener la velocidad del flujo, una es la velocidad de la embarcación y la otra es la velocidad aparente del agua vista por los instrumentos a bordo. Para esto el ADCP a parte de medir la velocidad del agua, mide la velocidad llamada “bottom track”, la cual corresponde a la velocidad a la que mueve la embarcación (el ADCP) con respecto al fondo marino, asumiendo que el fondo es fijo (Teledyne Marine, 2005). Combinando las velocidades registradas por el ADCP, es decir, la velocidad de la embarcación y la de la corriente, se obtienen las velocidades eulerianas horizontales del flujo a lo largo de la columna de agua a través de la Ecuaciones 3.2 y Ecuación 3.3.

$$u(x, y, z, t) = u_e(x, y, z, t) + u_c(x, y, z, t), \quad (3.2)$$

$$v(x, y, z, t) = v_e(x, y, z, t) + v_c(x, y, z, t), \quad (3.3)$$

donde \mathbf{u} y \mathbf{v} corresponden a las componentes de velocidad euleriana en el sistema de coordenadas locales (u es la velocidad con dirección este, que atraviesa el canal a lo ancho, paralela al eje x , y v es la velocidad con dirección norte, que atraviesa el canal a lo largo, paralela al eje y), el subíndice e indica las componentes de velocidad de la embarcación y el subíndice c indica las componentes de velocidad de la corriente. Con estas velocidades u y v se obtiene la magnitud de la velocidad a través de la Ecuación 3.4, esta magnitud nos da a conocer si una zona es de interés o no en cuanto a convertir la velocidad del flujo en energía.

$$U = \sqrt{u^2 + v^2}, \quad (3.4)$$

Donde U es la magnitud de la velocidad, \mathbf{u} y \mathbf{v} corresponden a las componentes de velocidad euleriana en el sistema de coordenadas locales. Debe recalarse que estas velocidades corresponden a las componentes horizontales y no a la componente vertical de velocidad.

3.7 Procesamiento de los datos

Los datos se procesaron utilizando el *software* computacional MATLAB (2021). Estos se organizaron de acuerdo a la condición de marea en la que se recopilaron, es decir, se separaron en conjuntos de datos de marea llenante y de vaciante.

3.7.1 Identificación de transectos

Los recorridos realizados para cada condición de marea se dividieron en pequeños tramos tanto transversales como longitudinales dependiendo de la ruta que realizó la embarcación, a los que se les denominó transectos y se les enumeró.

Para caracterizar las condiciones del flujo de entrada a las turbinas correspondiente a cada transecto, se utilizó la velocidad de referencia obtenida por el correntómetro ubicado en PLAT-I. De acuerdo a estas mediciones, a cada transecto se le asignó una velocidad de referencia específica, la cual corresponde al promedio de las velocidades registradas por el correntómetro durante la duración de cada transecto. En base a estas velocidades los transectos se agruparon en dos intervalos, los que presentaban velocidades de referencia por sobre los 2 m/s y los que estaban por debajo de los 2 m/s, para cada condición de marea.

Luego para cada transecto se definió la siguiente información de referencia: el número del transecto, la hora inicial de la toma de datos, condición de marea (vaciante o llenante), la velocidad promedio de referencia del correntómetro, la distancia media al punto de anclaje ($X=0$, $Y=0$).

Las Figuras 3.6 y 3.7 muestran un ejemplo de transecto recolectado en marea llenante. En la primera figura se muestra la vista en planta del transecto inmerso en una cuadrícula que representa el sitio de estudio en su longitud (eje Y) y ancho (eje X), donde el origen (0,0) corresponde con el anclaje de la plataforma. En la figura se muestran además todos los transectos en líneas grises y el transecto de ejemplo esta coloreado por la magnitud de la velocidad promedio de las primeras 10 celdas del ADCP, donde los colores fríos representan velocidades bajas y los cálidos velocidades más altas. El inicio del transecto está representado por una equis y su final por un cuadrado. Se observa que la magnitud de la velocidad media del transecto disminuye en la zona justo aguas abajo de las turbinas ubicadas en $X=0$, $Y=35$ m. En la segunda figura se muestra una vista transversal del transecto, el eje Z representa la profundidad del canal en m y va desde la superficie libre hasta el fondo del canal (línea negra), el eje X representa el ancho del transecto en m y el cero indica el anclaje de la plataforma. La figura muestra en colores la velocidad en la dirección norte capturada por el ADCP, cada celda tiene una profundidad de 0,5 m y su ancho es variable dependiendo de la velocidad de la embarcación y la frecuencia de muestro del ADCP . En esta figura se observa que las velocidades entre a los -20 m y 0 m (eje X) son menores que las velocidades de los costados de este tramo, así este sería el flujo perturbado por las turbinas o la estela. Para cada uno de los transectos se graficó su vista en planta y el perfil transversal de velocidades para identificar visualmente la ubicación de la estela.

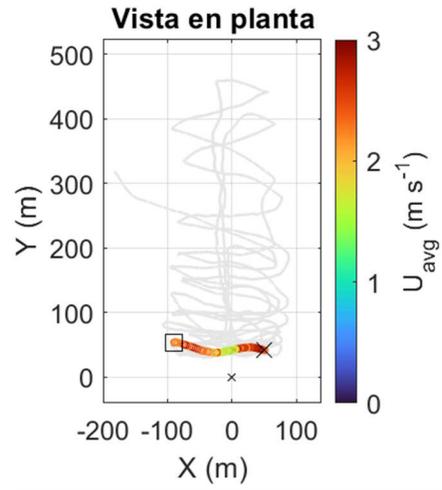


Figura 3.6 Vista en planta de un transecto representativo de los datos de marea llenante

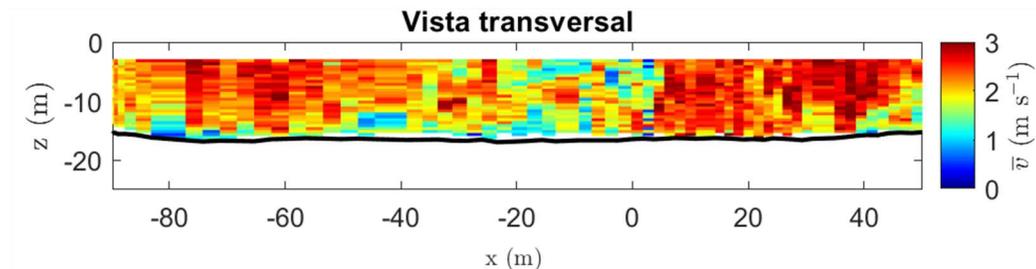


Figura 3.7 Vista transversal de un transecto representativo de los datos de marea llenante

3.7.2 Identificación de la estela

El eje de las turbinas se ubica aproximadamente a 5 m de profundidad con respecto a la superficie libre, es decir, se ubican a la profundidad de la celda número cinco del ADCP (4,9 m de profundidad) aproximadamente. Con respecto a la vista en planta, las turbinas están ubicadas 35 m aguas abajo del punto de anclaje, en $X=0$ e $Y=35$ m para el caso de marea llenante y en $X=0$ e $Y=-35$ m para marea vaciante. Luego, para cada transecto se graficó la velocidad de la celda cinco versus la distancia que recorre cada transecto, tal como se observa en la Figura 3.8. Así, este perfil horizontal de velocidades en la celda 5 junto con el mapa de vista transversal (Figura 3.7), se utilizaron para inspeccionar de forma visual los cambios de velocidad en cada transecto, con el objetivo de identificar la zona en donde se encuentra la estela generada por las turbinas y la plataforma.

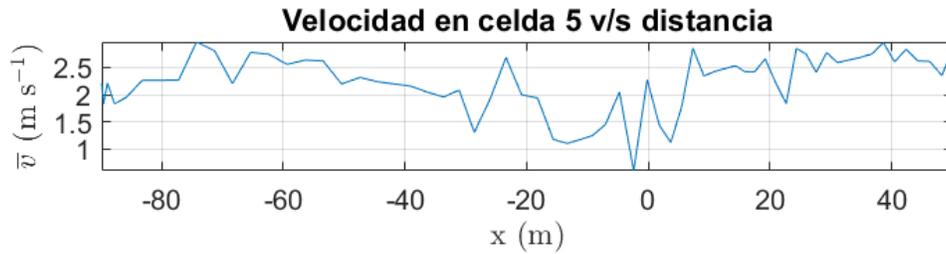


Figura 3.8 Perfil horizontal de velocidad para la celda cinco de un transecto representativo de los datos de marea llenante

Finalmente, al determinar la ubicación de la estela en base a los mapas antes mencionados, se definieron dos zonas para cada transecto: la primera, corresponde a la zona de la estela con velocidades reducidas, es decir, una zona de flujo perturbado por la plataforma con las turbinas en operación. La segunda zona, representa los costados de la estela, donde el flujo no es perturbado por las turbinas. Se calcularon perfiles verticales de velocidad promedio para el flujo perturbado (estela) y para el flujo no perturbado (zona oeste y este) de cada transecto transversal. Un ejemplo de los perfiles promedio calculados se muestra en la Figura 3.9, donde la curva azul es el promedio de las velocidades capturadas en la zona designada para cada flujo, la línea negra punteada representa la ubicación del fondo promedio de cada zona y la línea roja punteada corresponde al 90 % de la profundidad del fondo. Entre la línea roja y la línea negra las velocidades medidas por el ADCP no son confiables debido a la interferencia acústica del fondo.

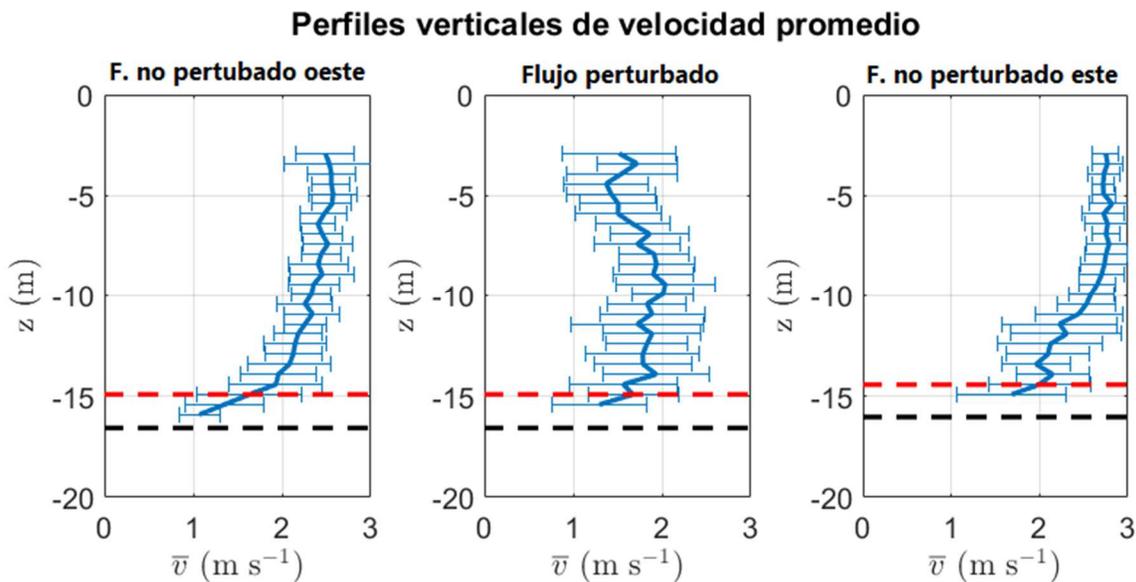


Figura 3.9 Perfiles verticales de velocidad promedio para los tres flujos, de un transecto representativo de marea llenante

Para el caso de los transectos longitudinales, se calcularon perfiles verticales de velocidad promedio a lo largo del transecto a distintas distancias desde las turbinas hacia aguas abajo de las turbinas, para así capturar la evolución de la velocidad en la estela.

3.8 Evaluación de la estela

De acuerdo a la literatura, para evaluar el desarrollo de la estela se deben comparar los datos del flujo perturbado por PLAT-I con respecto al flujo natural aguas arriba sin la plataforma. Sin embargo, para esta memoria no se cuenta con datos del flujo natural bajo las mismas condiciones de medición, por lo que se definieron tres alternativas de evaluación. En el primer caso se comparó la velocidad del flujo perturbado con la velocidad de referencia de cada transecto obtenida del correntómetro (medición puntual). En segundo caso se comparó este mismo flujo perturbado con la velocidad del flujo no perturbado de la zona oeste en cada transecto y en el tercer caso la comparación fue entre la velocidad del flujo perturbado con la del flujo no perturbado de la zona este para cada transecto, obteniendo así, una disminución de la velocidad para cada transecto en los tres casos.

La disminución de la velocidad del primer caso se calculó en base a la Ecuación 3.5, la del segundo caso de acuerdo con la Ecuación 3.6 y la del tercer caso con la Ecuación 3.7.

$$V_{dis1} = v_{corr} - v_{5w}, \quad (3.5)$$

$$V_{dis2} = v_{5o} - v_{5w}, \quad (3.6)$$

$$V_{dis3} = v_{5e} - v_{5w}, \quad (3.7)$$

donde, v_{corr} es la velocidad de referencia obtenida por el correntómetro asignada a cada transecto, v_{5w} es la velocidad de la celda cinco del perfil vertical promedio del flujo perturbado, v_{5o} es la velocidad de la celda cinco del perfil vertical promedio del flujo no perturbado del oeste y v_{5e} es la velocidad de la celda cinco del perfil vertical promedio del flujo no perturbado del este. Consecuentemente, para cada caso se graficó la disminución de la velocidad con respecto a la distancia normalizada por el diámetro efectivo (DE) hacia aguas abajo de las turbinas.

Finalmente, para los tres casos la disminución de la velocidad se normalizó en base a la velocidad del correntómetro, a la velocidad del flujo no perturbado del oeste y a la velocidad del flujo no perturbado del este, según correspondiera, tal como se presenta en las Ecuaciones 3.8, 3.9 y 3.10. Adicionalmente, se graficó esta velocidad normalizada con respecto a la distancia en función del diámetro efectivo (DE) para los tres casos.

$$V_{norm1} = \frac{V_{dis1}}{v_{corr}}, \quad (3.8)$$

$$V_{norm2} = \frac{V_{dis2}}{v_{5o}}, \quad (3.9)$$

$$V_{norm3} = \frac{V_{dis3}}{v_{5e}}, \quad (3.10)$$

donde, V_{dis1} , V_{dis2} , V_{dis3} , v_{corr} , v_{5o} y v_{5e} fueron definidas anteriormente.

3.9 Conclusiones

En este capítulo se presentó la zona de estudio en la cual se desarrollaron las mediciones de campo, mostrando sus principales características y comportamiento del flujo. Luego se mostró la plataforma utilizada para la extracción de energía, explicando su funcionamiento y principales parámetros, junto con las turbinas que van montadas en ella. Se detalló la metodología utilizada en el levantamiento de datos, los instrumentos utilizados y su configuración al momento de realizar las mediciones, también se detalló las condiciones climáticas de viento, precipitación y marea en los días de las mediciones, las cuales fueron adecuadas para la toma de datos en terreno. Del mismo modo, se detalló la metodología para el procesamiento de los datos a través del *software* Matlab, obteniendo así, los distintos mapas de velocidad que permiten caracterizar la estela y poder finalmente evaluarla en su evolución hacia aguas abajo de las turbinas

CAPÍTULO 4 RESULTADOS

4.1 Introducción

En este capítulo se presenta el análisis realizado a los datos obtenidos del perfilador de corriente acústica Doppler (ADCP). Primero se muestran los conjuntos de datos preprocesados en base a la respuesta acústica. Luego se presentan gráficos de velocidad de los transectos más representativos de los dos conjuntos de datos y la división de los transectos en las tres zonas de flujo (estela, flujo oeste, flujo este). Luego se presentan los perfiles verticales de velocidad promedio tanto dentro como fuera del flujo perturbado (estela). Finalmente, se presenta la evaluación de la disminución de la velocidad y la evolución de esta disminución en la estela.

4.2 Calidad de los datos

Los datos acústicos recopilados por el ADCP se muestran en la Figura 4.1 y Figura 4.2, para marea vaciante y llenante, respectivamente. Los mapas están coloreados por la amplitud de la señal acústica recogida por el ADCP en dB. Para el caso de la marea vaciante se observa que la respuesta acústica es pareja en todas las mediciones (70 a 75 dB) con algunos picos cercanos a la superficie. Por su parte, en los datos de marea llenante, la respuesta acústica es elevada en la zona media justo aguas abajo de las turbinas (correspondiente a la estela) y disminuye hacia el costado este (X positivo). En el costado oeste (X negativo) se observa una zona de respuesta acústica elevada que provienen de la estela que genera la isla Peter. Los datos con respuesta acústica máxima corresponden a zonas con alta presencia de partículas que reflejan la señal acústica, en este caso las partículas corresponden a burbujas generadas por la plataforma PLAT-I y sus turbinas. De acuerdo a estos mapas la mayoría de los datos presenta retornos acústicos altos, indicando una buena calidad de los datos. Se destaca que el mapa acústico de cada transecto se presenta en el Anexo 4.1.

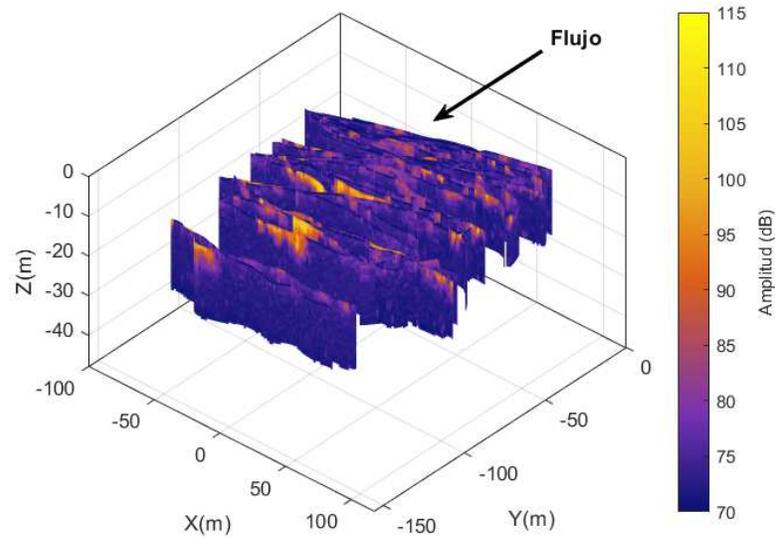


Figura 4.1 Respuesta acústica de los datos de marea vaciante (14 de octubre del 2020)

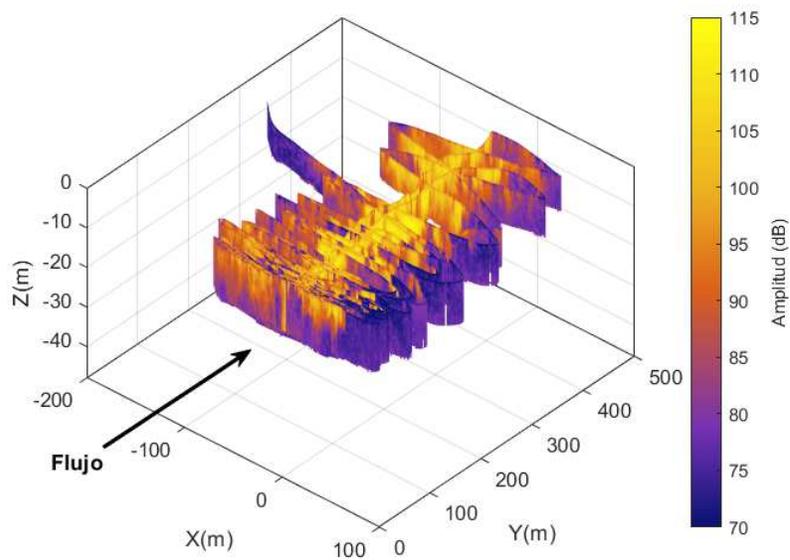


Figura 4.2 Respuesta acústica de los datos de marea llenante (17 de octubre del 2020)

4.3 Organización e identificación de transectos

El recorrido realizado por la embarcación que tomó datos con el ADCP duró un total de 48 minutos para marea vaciante (14 de octubre 2020), y 92 minutos para marea llenante (17 de octubre 2020). Estos recorridos se dividieron en transectos, obteniéndose 26 transectos transversales al flujo para marea vaciante y 51 transectos para marea llenante, de los cuales cuatro son paralelos (longitudinales) al flujo y el resto transversales al flujo.

La serie de tiempo de velocidad obtenida por el correntómetro se muestra en las Figuras 4.3 y 4.4 para las mediciones de los días 14 y 17 de octubre, respectivamente. En rojo se presenta la velocidad promedio del flujo perturbado de la celda cinco para cada transecto. El gráfico informa que en las mediciones realizadas el día 14 (marea vaciante), los datos fueron recopilados luego del *peak* de velocidad, es decir, en corriente vaciante decreciente, cuando la velocidad del flujo era alrededor de 1 m/s, mientras que en las mediciones del día 17 (marea llenante) se recopilieron los datos en el *peak* de la corriente de marea cuando las velocidades eran alrededor de 2 m/s.

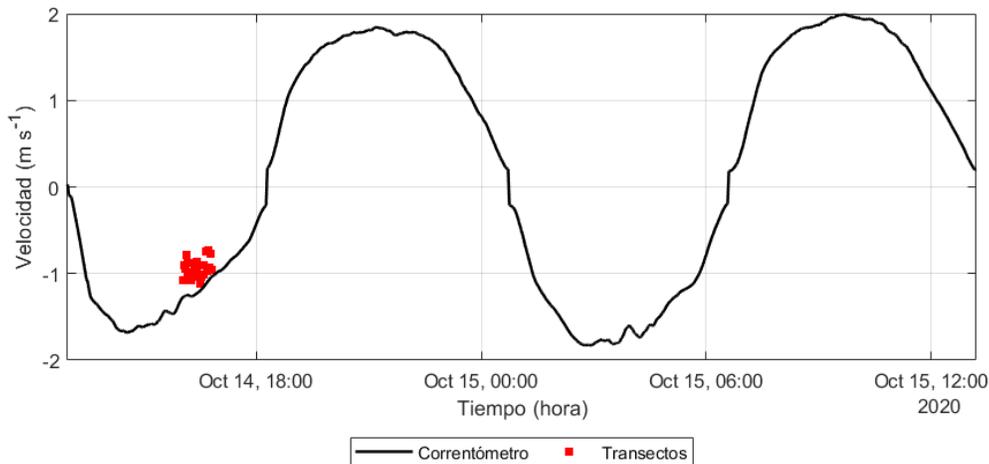


Figura 4.3 Serie temporal de velocidades obtenidas del correntómetro para el día 14 de octubre del 2020 en marea vaciante

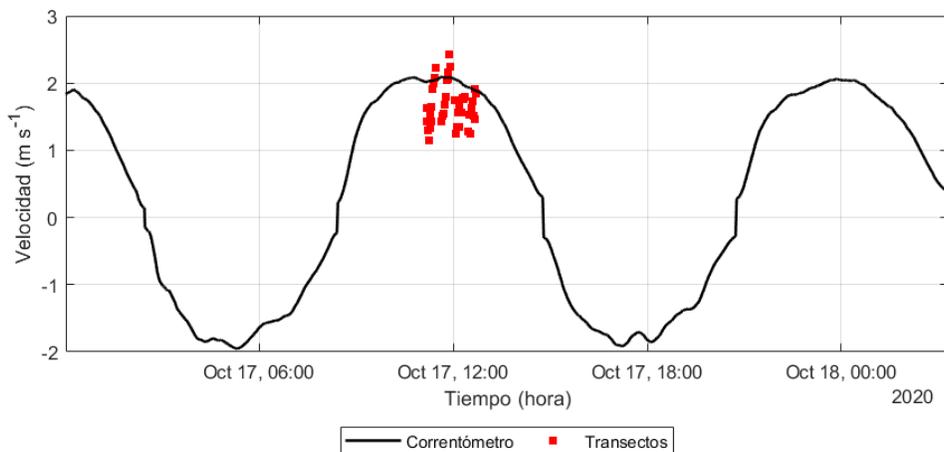


Figura 4.4 Serie temporal de velocidades obtenidas del correntómetro para el día 17 de octubre del 2020 en marea llenante

En la Figura 4.5 se muestra la ubicación en planta de todos los transectos recolectados en ambas condiciones de marea, coloreados por la velocidad medida en la celda número 5 del ADCP (profundidad del eje de las turbinas). En los paneles a y b se presentan los datos de marea llenante, los cuales se separaron de acuerdo a la velocidad del correntómetro asignada a cada transecto; bajo los 2 m/s se presentan en el panel a y sobre los 2 m/s se muestran en el panel b. En el panel c se muestran los 26 transectos de marea vaciante los cuales tienen velocidades asignadas de correntómetro bajo los 2 m/s.

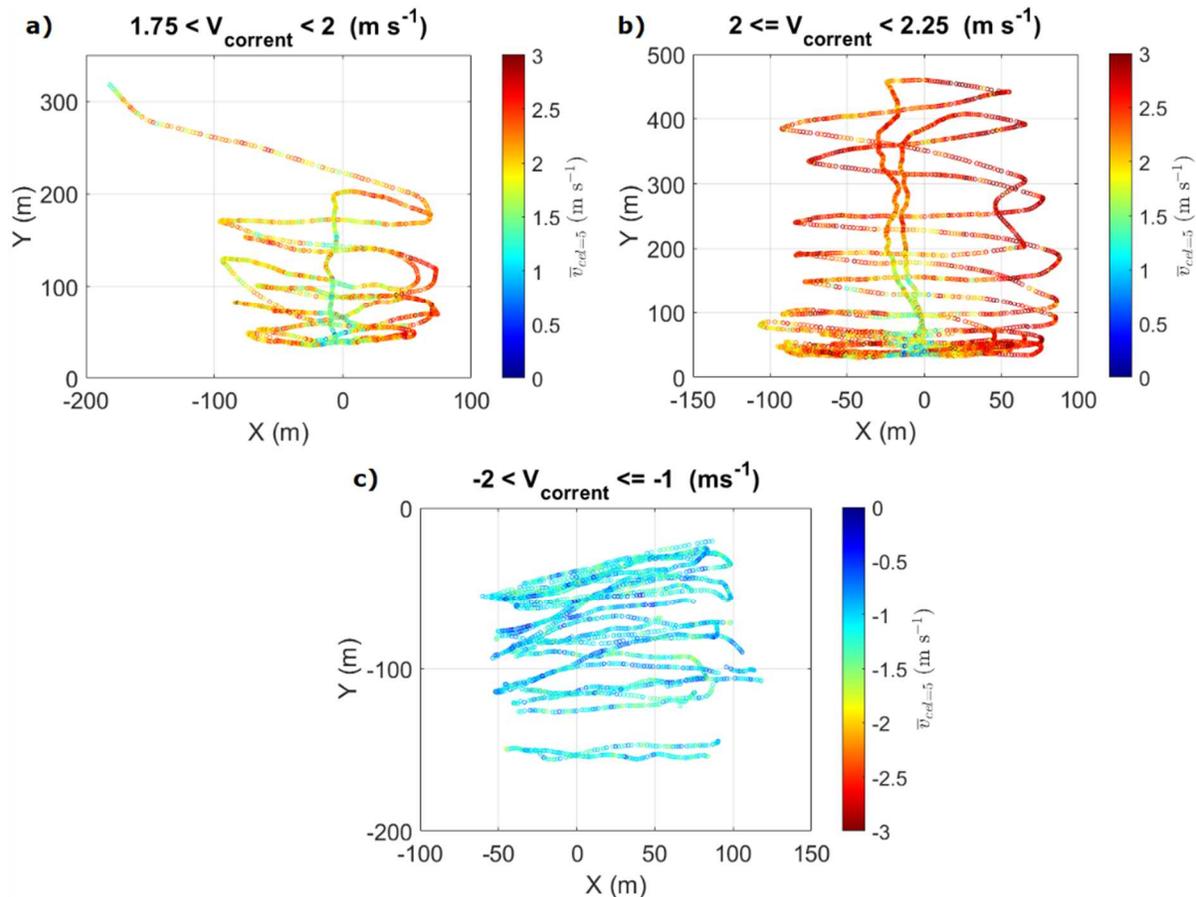


Figura 4.5 Mapa de los transectos coloreados por la velocidad de la celda cinco, separados por condición de marea y por la velocidad de referencia del correntómetro

En los mapas de marea llenante se distingue claramente una reducción de la velocidad en la zona aguas abajo de las turbinas, correspondiente a la estela (Figura 4.5 a y b). Al contrario, en el mapa de marea vaciante (Figura 4.5 c), no se aprecia claramente una zona de reducción de la velocidad aguas abajo de las turbinas. Del mismo modo se nota una diferencia entre los datos que están por sobre y bajo los 2 m/s para marea llenante, donde en el panel b se reconoce un cambio más brusco de la

velocidad en la zona media (estela), y en el panel a este cambio es más moderado al mezclarse con las velocidades de los costados.

4.4 Identificación del flujo perturbado

A continuación, se muestran los mapas de velocidad con los cuales se analizó cada transecto. En esta sección solo se mostrarán los resultados para dos transectos de marea llenante y uno de marea vaciante que representen de mejor forma los resultados obtenidos. Los mapas correspondientes a todos los transectos se presentan en el Anexo 4.2.

La Tabla 4.1 presenta los datos básicos del transecto número 8, el cual será utilizado como ejemplo, tales como el día de la medición, la condición de marea, velocidad promedio del correntómetro para todo el tramo del transecto y la distancia promedio al punto de anclaje de la plataforma ($X=0$, $Y=0$).

Tabla 4.1 Información del transecto número 8

Transecto 8	
Fecha	17-10-20
Inicio (UTC)	11:38:41 hrs
Fin (UTC)	11:40:14 hrs
Marea	Llenante
Velocidad correntómetro	~ 2.09 m/s
Distancia promedio al punto (0,0)	~ 36 m

La Figura 4.6 muestra una vista en planta de la ubicación del transecto número 8. La ubicación de las mediciones del transecto está coloreada de acuerdo a la magnitud de la velocidad promedio en las primeras 10 celdas medidas por el ADCP. En esta imagen se destaca que las velocidades aguas abajo de las turbinas ($X=0$, $Y=35$) son menores que las velocidades a los costados del transecto, con esto se demuestra que la plataforma y las turbinas en operación perturban el flujo aguas abajo, reduciendo la velocidad al extraer energía, generándose lo que se conoce como estela.

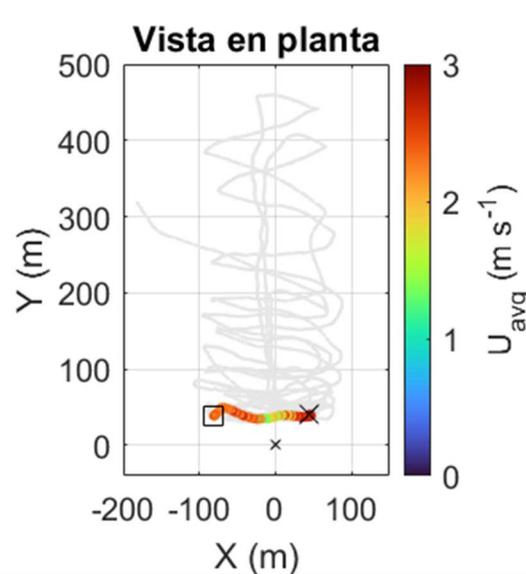


Figura 4.6 Vista en planta de la magnitud de la velocidad del transecto 8 (llenante)

Con el fin de detectar gráficamente la estela, se utilizó la vista transversal de los perfiles verticales de velocidad obtenidos por el ADCP para todos los transectos. La Figura 4.7 muestra los datos correspondientes al transecto 8. Este transecto se ubica a una distancia promedio de 1 metro aguas abajo de las turbinas y se puede observar que en la zona oeste (lado izquierdo del transecto) las velocidades varían entre los 2 – 3 m/s en la zona superior y entre los 1 – 2 m/s en la zona cercana al fondo. Luego, se aprecia una disminución de la velocidad cercana a la superficie de la zona media del transecto que varía entre 1 – 2 m/s, que correspondería a la estela. Finalmente, en la zona este (lado derecho del transecto) la velocidad vuelve a aumentar con valores entre los 2-3 m/s y en el fondo las velocidades se reducen a valores entre los 1 – 2 m/s. Junto con lo anterior, se observa una línea negra a lo largo del transecto la cual representa el fondo del canal, construida en base a la distancia “bottom track” medida por el ADCP.

El panel central de la Figura 4.7 presenta la velocidad medida en la celda cinco (a ~5 m desde la superficie del mar, correspondiente a la profundidad del centro de las turbinas) a lo largo del transecto número 8. Se aprecia que, en la zona media del transecto, entre $X=-20$ m y $X=0$ m, la velocidad disminuye aproximadamente en 1 m/s. Por otro lado, en el mapa acústico (imagen inferior) se destacan dos zonas con un mayor retorno acústico, la zona oeste corresponde a la estela que genera la isla Peter y la segunda, en la zona media del transecto, corresponde a la estela originada por la plataforma con las turbinas en operación. De este análisis se desprende que la zona de flujo perturbado o estela está

ubicada aproximadamente entre $X=-20$ y $X=6$ m., zona demarcada por las líneas negras punteadas en la Figura 4.7 superior.

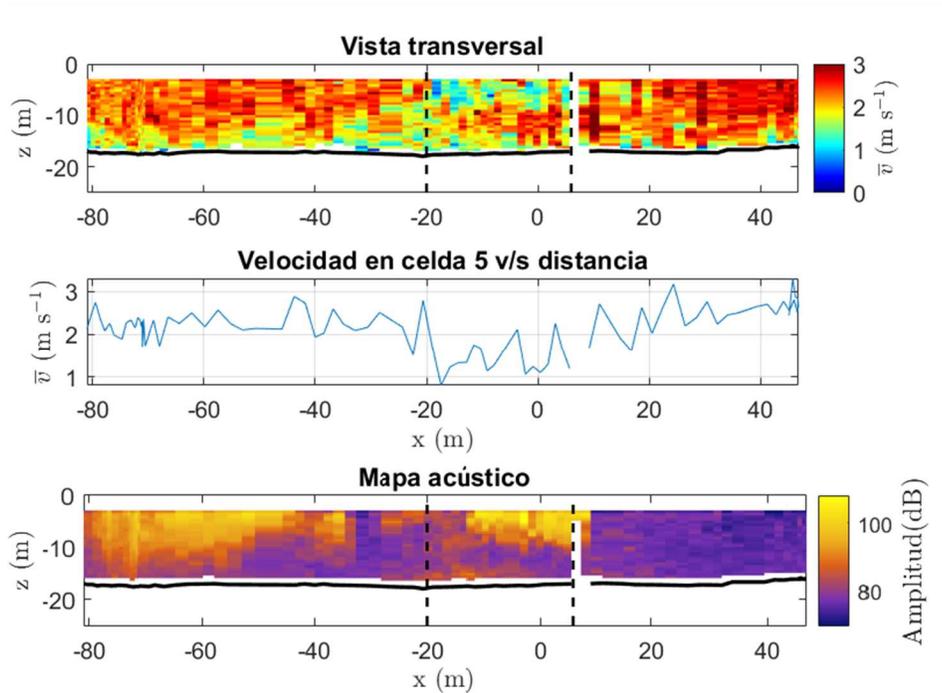


Figura 4.7 Vista transversal de los perfiles verticales de velocidad norte (arriba), perfil horizontal de velocidad de la celda cinco del ADCP con respecto a la distancia recorrida (centro) y respuesta acústica (abajo) del transecto 8 de marea llenante

4.5 Perfiles verticales de velocidad promedio

4.5.1 Marea llenante

La Figura 4.8 muestran los perfiles verticales de velocidad promedio (en X) para las tres zonas mencionadas anteriormente correspondientes al transecto 8. En el panel a) se muestra el perfil vertical de velocidad para el flujo no perturbado del lado oeste (promediado entre $X=-80$ y $X=-50$ m). Se observa que su forma tiende a la de un perfil logarítmico, pero también se aprecia una pequeña disminución de la velocidad cerca de la superficie, que podría ser consecuencia de la interferencia que produce la estela de la isla Peter. En panel b) se muestra el perfil vertical promedio del flujo perturbado (promediado entre $X=-20$ y $X=6$ m) donde se aprecia una disminución significativa de la velocidad

en la zona vertical cubierta por las turbinas (aproximadamente entre $Z=-3$ y $Z=-8$ m). Esta zona de gradiente vertical negativo corresponde a la estela generada por las turbinas. La velocidad mínima se observa en $Z = -5$ m, correspondiente a la ubicación del eje de las turbinas. En el panel c) se muestra el perfil vertical promedio para el flujo no perturbado del lado este (promediado entre $X=24$ y $X=50$ m), donde existe una tendencia clara de un perfil logarítmico y velocidades mayores a las observadas en la zona de la estela y en el lado oeste. La velocidad promedio a la profundidad del eje de las turbinas, es decir, en la celda cinco del ADCP, es de: $v_{5o} = 2.22$ m/s, $v_{5w} = 1.43$ m/s y $v_{5e} = 2.65$ m/s para cada uno de los flujos respectivamente.

El mismo proceso se repitió para todos los transectos transversales, observándose perfiles de velocidad de forma similar tanto para el flujo perturbado como para el flujo no perturbado. Los gráficos correspondientes a los distintos transectos analizados se muestran en el Anexo 4.2.

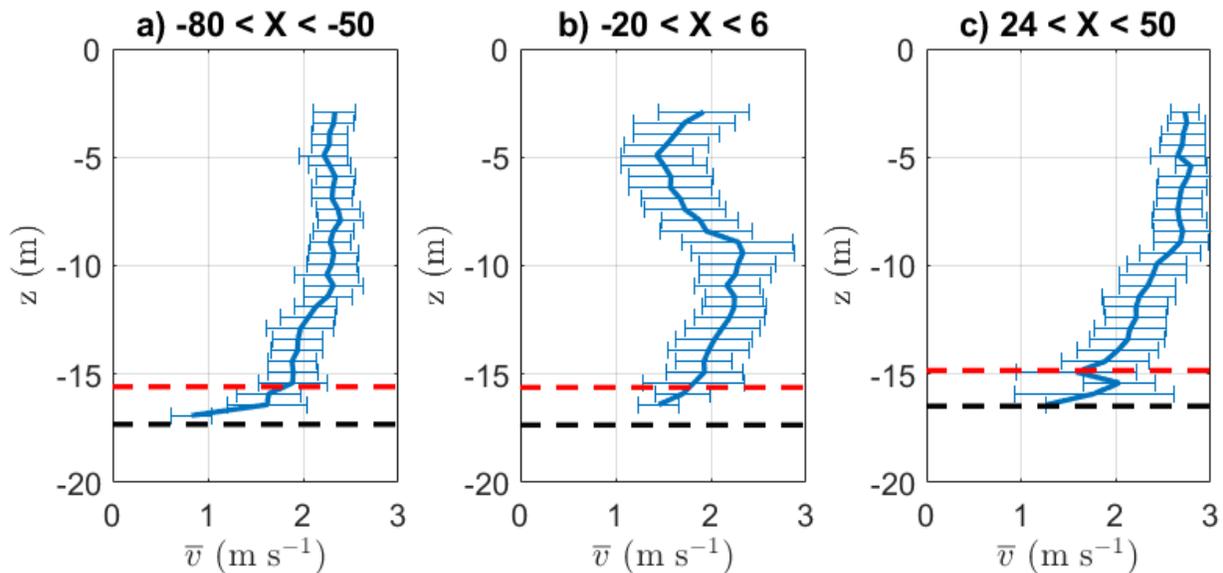


Figura 4.8 Perfiles verticales de velocidad promedio del transecto 8 para cada flujo: a) No perturbado lado oeste, b) Perturbado o estela, y c) No perturbado lado este, para marea llenante.

De los datos, se identificaron cuatro transectos longitudinales. De éstos se seleccionó el transecto identificado con el número 6 como representativo de las mediciones. La Tabla 4.2 presenta la información básica correspondiente a este transecto, tal como, la fecha de medición, el inicio y fin del recorrido en tiempo, la condición de marea y la velocidad de referencia obtenida del correntómetro.

En la Figura 4.9 se muestra una vista en planta de la ubicación del transecto 6. La ubicación de las mediciones está coloreada por la magnitud de la velocidad promedio en las primeras 10 celdas medidas por el ADCP. El transecto recorre de manera longitudinal el área de estudio hacia aguas abajo de las turbinas por la zona de la estela, desde $Y = 40$ m hasta $Y = 456$ m. Se observa principalmente una zona de velocidades bajas entre los 1 – 2 m/s desde el inicio del transecto hasta $Y = 200$ m aproximadamente, y luego una zona donde la velocidad aumenta desde $Y = 200$ m hacia aguas abajo, con valores entre los 2 – 3 m/s.

Tabla 4.2 Información del transecto número 6

Transecto 6	
Fecha	17-10-20
Inicio (UTC)	11:30:02 hrs
Fin (UTC)	11:37:55 hrs
Marea	Llenante
Velocidad correntómetro	~ 2.07 m/s

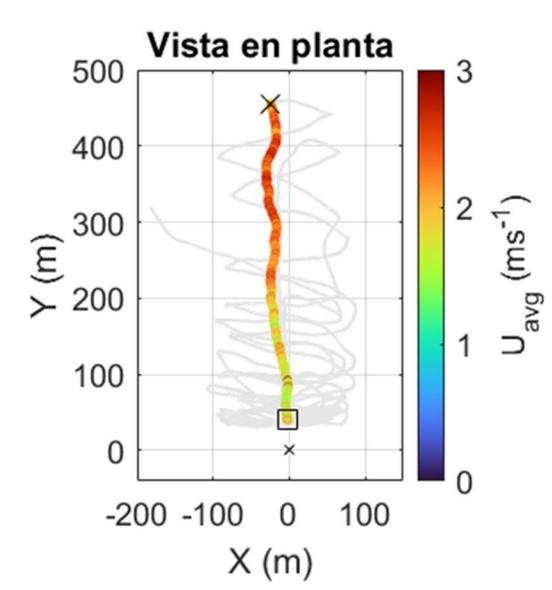


Figura 4.9 Vista en planta de la magnitud de la velocidad del transecto 6 (llenante)

En la Figura 4.10 se muestra una vista longitudinal del transecto 6, donde se muestran en colores los perfiles verticales de velocidad obtenidos por el ADCP a lo largo del eje Y. En este mapa se puede observar de mejor forma cómo evoluciona la velocidad hacia aguas abajo de PLAT-I en marea llenante. En los primeros metros (hasta $Y = 75$ m) se aprecian velocidades bajas en las profundidades

abarcadas por las turbinas (entre $Z=-3$ m y $Z=-8$ m), luego las velocidades se mantienen bajas hasta $Y=200$ m (alrededor de 13 DE, aguas abajo de las turbinas ubicadas en $Y=35$ m). Las velocidades aumentan desde $Y=200$ m a medida que la profundidad del flujo disminuye y se mantienen elevadas hasta el final del transecto ($Y=450$ m aproximadamente). Es importante destacar que el aumento de velocidad en $Y=200$ m es producto del cambio de batimetría y no corresponde necesariamente a la recuperación de la estela.

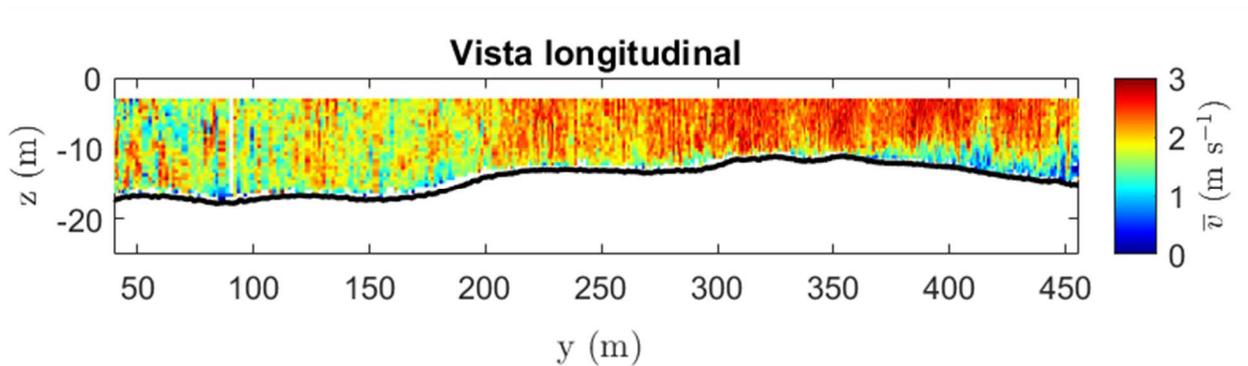


Figura 4.10 Vista longitudinal de los perfiles verticales de velocidad horizontal del transecto 6 para marea llenante

Con el fin de conocer el comportamiento longitudinal de la estela se calcularon perfiles verticales de velocidad promedio para diferentes segmentos de distancia a lo largo del transecto longitudinal presentado en la figura anterior. La Figura 4.11 muestra los perfiles de velocidad promedio obtenidos para el transecto longitudinal número 6. Cada panel lleva por título la distancia (en Y) en la que se promediaron los perfiles de velocidad y están dispuestos de izquierda a derecha en el sentido del flujo hacia aguas abajo. En los primeros dos paneles, que muestran los perfiles promedio más cercanos a las turbinas, se observa el efecto de la estela: las velocidades se ven reducidas en las profundidades abarcadas por las mismas y la forma del perfil es similar a lo observado en los transectos transversales, la velocidad disminuye considerablemente en la profundidad de las turbinas. En los siguientes tres paneles (perfiles promedio entre $Y=95$ e $Y=160$ m) no se distingue claramente la forma de estela, y se observa que la velocidad es prácticamente homogénea verticalmente. La forma casi vertical del perfil de velocidades indica que la estela se ha mezclado verticalmente. Los siguientes paneles muestran perfiles promediados entre $Y=185$ m e $Y=225$ m. Los perfiles muestran un aumento de la velocidad, probablemente producido por la mezcla horizontal de la estela con el flujo de los costados

(que va a mayor velocidad). Finalmente, en los últimos paneles la tendencia de los perfiles es logarítmica, las velocidades son más altas y la profundidad disminuye.

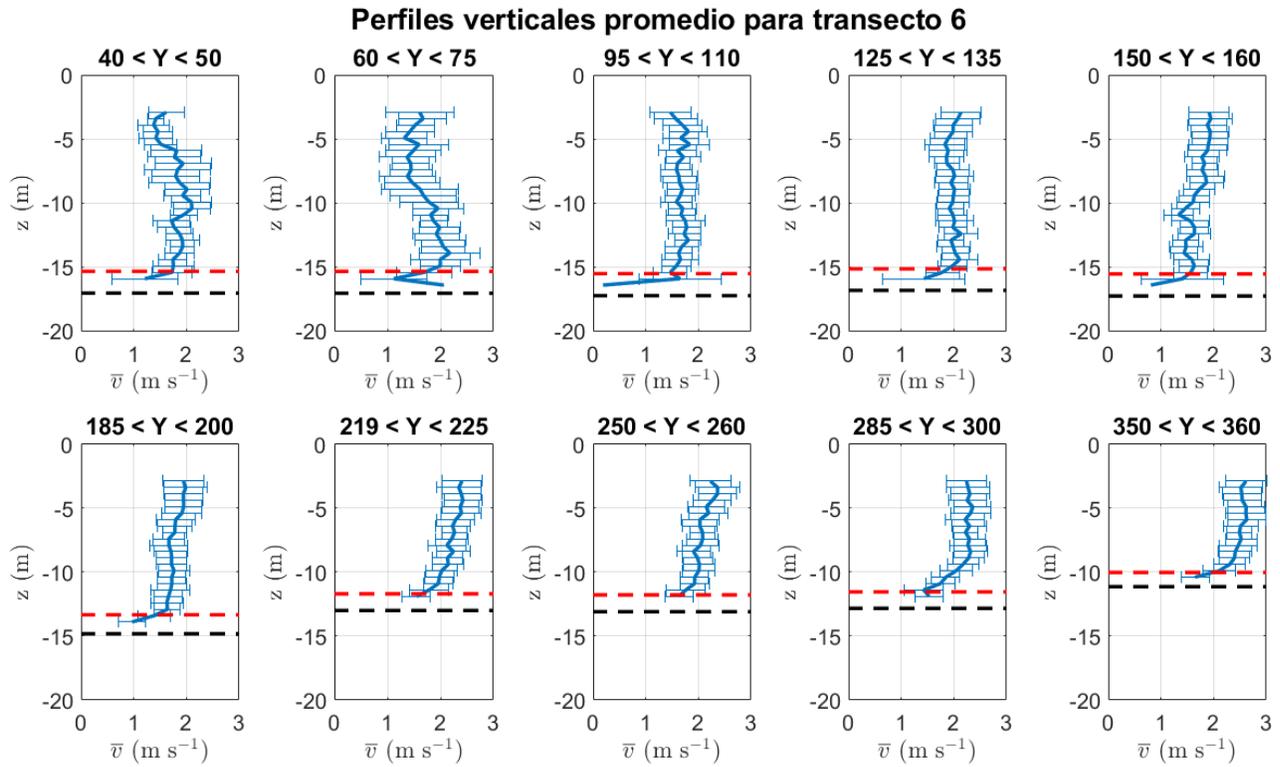


Figura 4.11 Perfiles verticales de velocidad promedio a distintas distancias aguas abajo de las turbinas obtenidas del transecto longitudinal 6 (marea llenante).

4.5.2 Marea vaciante

En cuanto a los datos de marea vaciante, se realizó el mismo procedimiento para el análisis de los transectos y cálculo de los perfiles promedio. En la Tabla 4.3 se presentan los datos básicos para el transecto transversal número 21, que es utilizado como transecto representativo del conjunto. En la Figura 4.12 se muestra la vista en planta de la ubicación del transecto 21 coloreada por la velocidad promedio en las primeras 10 celdas del ADCP. La velocidad negativa representa la dirección de la marea vaciante (hacia el sur), de acuerdo con el sistema de coordenadas locales utilizado en esta memoria. En general, las velocidades son bajas, en torno a 1 m/s, sin embargo, se observa un tramo entre los X=20 y X=40 m con velocidades menores a 1 m/s.

Tabla 4.3 Información del transecto número 21

Transecto 21	
Fecha	14-10-20
Inicio (UTC)	16:08:10 hrs
Fin (UTC)	16:09:26 hrs
Marea	Vaciante
Velocidad correntómetro	~ 1.25 m/s
Distancia promedio al punto (0,0)	~ 54.5 m

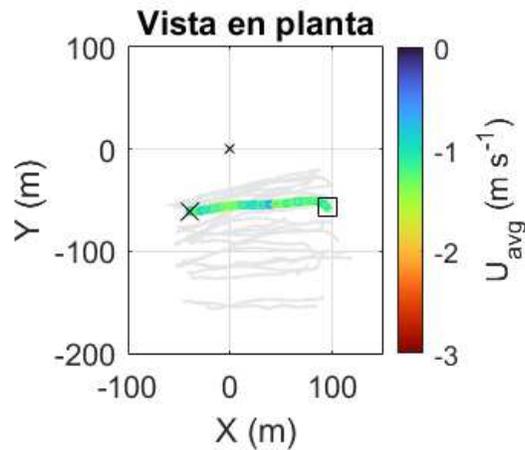


Figura 4.12 Vista en planta de la magnitud de la velocidad del transecto 21 (vaciante)

En la Figura 4.13 (panel superior) se muestra una vista transversal del transecto 21, en la cual se observa una diferencia leve de la velocidad justo en el medio del transecto entre $X=13$ y $X=45$ m. La misma disminución se observa más claramente en el perfil horizontal de velocidad de la celda cinco del transecto (panel intermedio) donde la velocidad disminuye a menos de 1 m/s. En el mapa acústico (panel inferior), se puede ver un aumento del retorno acústico en la parte superior de la zona media. De esta forma queda definido el rango de la estela entre $X=13$ y $X=45$ m para este transecto.

De los mapas anteriores se acotaron las zonas de estudio del transecto, obteniendo los perfiles verticales de velocidad promedio en cada zona, mostrados en la Figura 4.14 para el transecto 21. En los flujos no perturbados tanto del lado oeste como del lado este (paneles a y c) se observa una forma de perfil logarítmico tradicional para este tipo de flujos. En el caso del flujo perturbado, panel b), se aprecia una pequeña disminución de la velocidad alrededor de los 5 m de profundidad, provocado por el efecto de las turbinas.

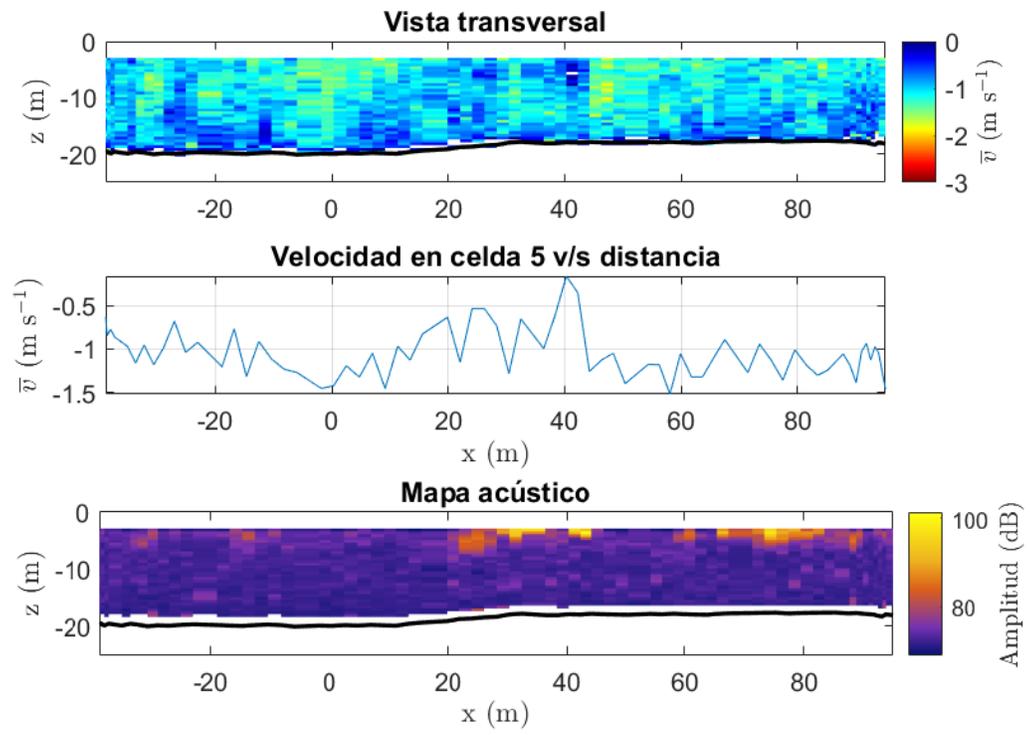


Figura 4.13 Vista transversal de los perfiles verticales de velocidad norte (superior), perfil horizontal de velocidad de la celda cinco del ADCP con respecto a la distancia recorrida (intermedio) y respuesta acústica (inferior) del transecto 21 de marea vaciante

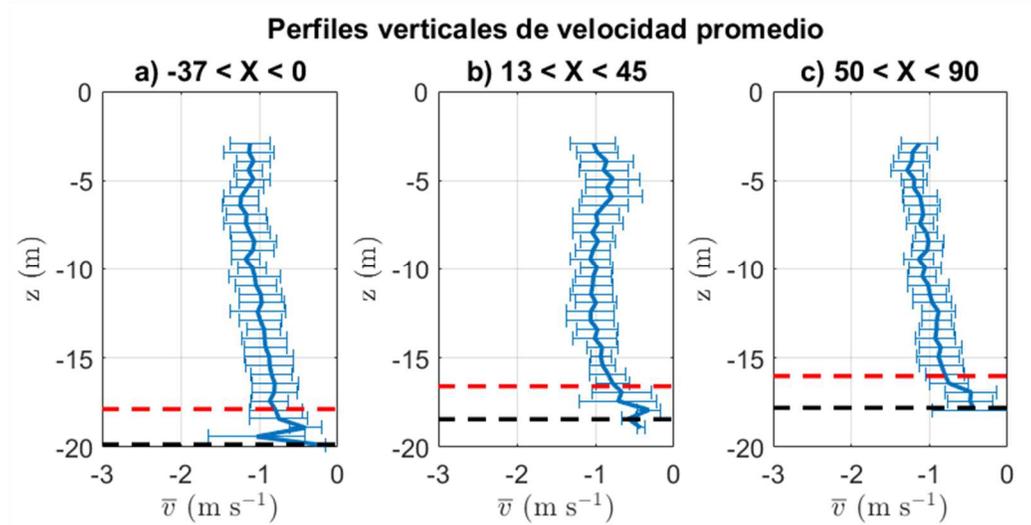


Figura 4.14 Perfiles verticales de velocidad promedio del transecto 21 para cada flujo: a) No perturbado lado oeste, b) Perturbado o estela, y c) No perturbado lado este, para marea vaciante.

En la mayoría de los transectos recolectados en marea vaciante no se logró detectar la estela de manera clara. En algunos transectos, como el mostrado anteriormente, solo se observó una disminución

pequeña de la velocidad en transectos bien cercanos a las turbinas. Esto se debe principalmente a que durante las mediciones las velocidades del flujo eran demasiado bajas, cercanas a la velocidad de corte de las turbinas (alrededor de 1 m/s), lo que implica que las turbinas podrían no haber estado operando. Otro factor que podría haber afectado la magnitud de la estela durante marea vaciante es que las aspas de las turbinas se encontraban cubiertas de *biofouling* al momento de realizar estas mediciones en terreno. Según Starzmann *et al.*, (2021), la presencia de *biofouling* resulta en que las turbinas extraen mucho menos energía. Por lo anterior es que se descartaron los datos de marea vaciante para la evaluación de la estela presentada en la siguiente sección de este capítulo.

4.6 Evaluación de la estela

En la Figura 4.15 se muestran varios perfiles verticales de velocidad promedio que ilustran el desarrollo y evolución de la estela de la plataforma PLAT-I aguas abajo de las turbinas para marea llenante. Se presentan ocho gráficos y cada uno corresponde a un transecto seleccionado a cierta distancia \bar{Y} aguas abajo del punto de amarre de PLAT-I (ubicado en $X=0$ e $Y=0$ m (las turbinas se ubican en $Y=35$ m). Para cada distancia se muestra en azul el perfil de velocidad promedio en la estela (flujo perturbado), en naranja se muestra el perfil promedio obtenido para el flujo no perturbado del lado oeste, en amarillo el perfil promedio para el flujo no perturbado al este de la plataforma y las líneas horizontales en los perfiles representan la desviación estándar de los datos. Se destaca que la información y mapa de cada transecto seleccionado para esta figura se presentan en el Anexo 4.3.

En la región cercana a las turbinas ($\bar{Y}=36$, $\bar{Y}=54.1$ e $\bar{Y}=65.6$ m, es decir, los primeros tres paneles), la velocidad del flujo perturbado se reduce en las profundidades abarcadas por las turbinas (aproximadamente entre los 3 y 8 m de profundidad desde la superficie libre), en comparación con las velocidades de los flujos no perturbados por PLAT-I tanto del este como del oeste, los cuales muestran una tendencia logarítmica. Cabe señalar que las velocidades del flujo no perturbado del oeste son menores respecto al flujo no perturbado del este por la estela que genera la isla Peter en el costado oeste de la zona en estudio.

La estela de las turbinas se expande verticalmente hacia aguas abajo y la velocidad aumenta producto de la mezcla vertical. La estela es menos perceptible en $\bar{Y}=95.5$ m (aproximadamente 4.9 DE aguas

abajo de las turbinas) y se observa un perfil de velocidad casi homogéneo en toda la profundidad, pero la velocidad sigue siendo menor en comparación con el flujo no perturbado en ambos costados. Luego, las velocidades del flujo perturbado aumentan entre $\bar{Y}=129$ m e $\bar{Y}=229$ m (aproximadamente 15.8 DE aguas abajo de las turbinas), por la mezcla horizontal de la estela con el flujo de los costados, pero los perfiles del flujo perturbado se mantienen rectos en comparación con los perfiles de los flujos no perturbados que tienen una forma más bien logarítmica.

Finalmente, entre $\bar{Y}=250$ m e $\bar{Y}=407$ m las velocidades del flujo perturbado son similares a las del flujo no perturbado indicando la recuperación de la estela.

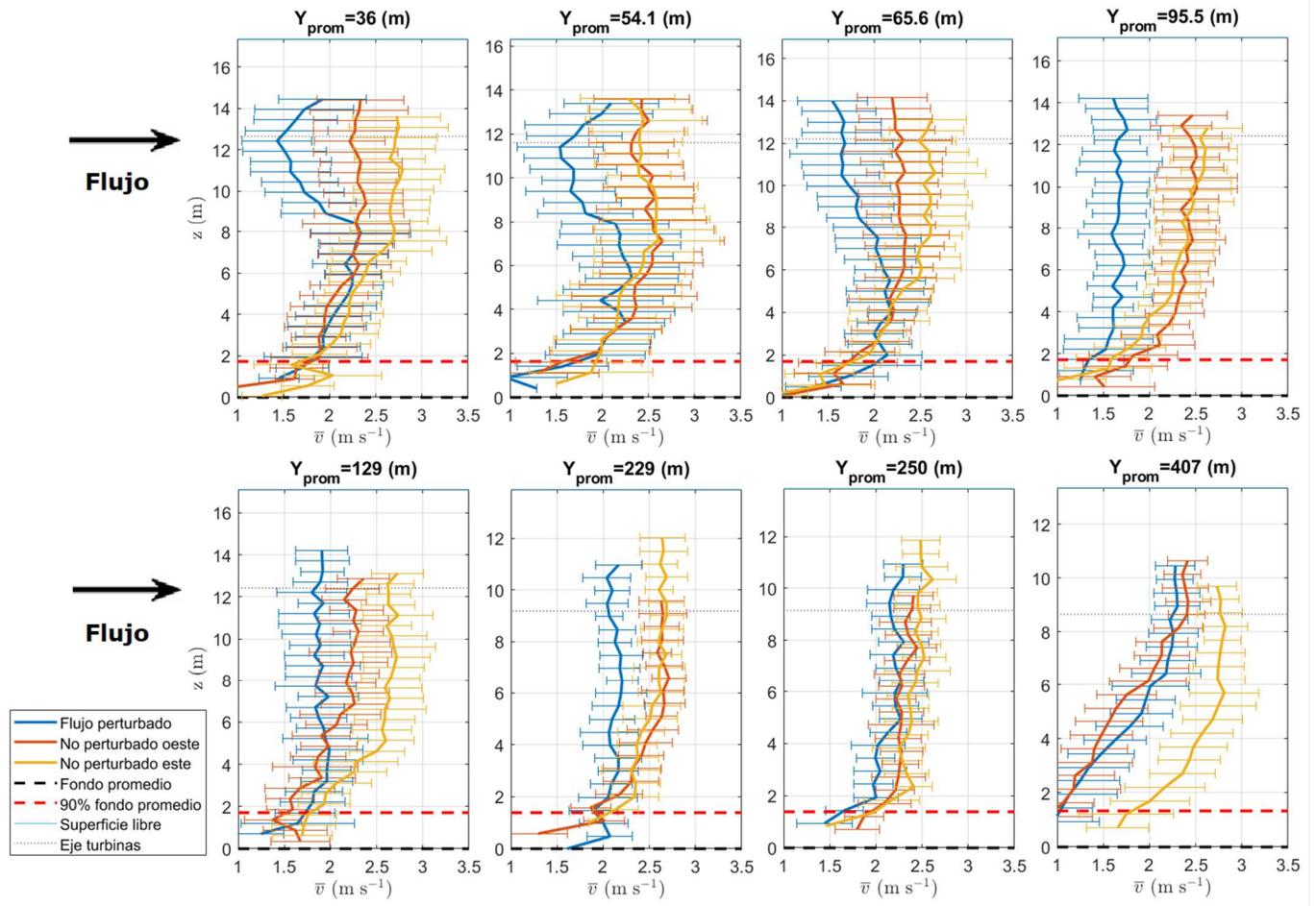


Figura 4.15 Perfiles verticales de velocidad promediados dentro y fuera de la estela para los transectos 8, 47, 12, 50, 13, 15, 16 y 4 en marea llenante

4.6.1 Disminución de Velocidad

Para evaluar la recuperación de la estela se estimó la disminución de velocidad en la estela con respecto a la velocidad medida por el correntómetro y con respecto a la velocidad a los costados de la estela, para los datos de marea llenante. Los resultados se presentan en los tres gráficos siguientes, los cuales muestran la disminución de la velocidad en la profundidad del eje de las turbinas (celda cinco del ADCP, $Z=-5$ m) para cada una de las tres alternativas presentadas en la metodología. En cada gráfico los puntos azules representan los transectos que tienen una velocidad referenciada por el correntómetro sobre los 2 m/s y en naranja velocidades de referencia bajo los 2 m/s y la línea azul punteada representa una curva de ajuste de los resultados obtenidos.

El gráfico de la Figura 4.16 presenta la diferencia entre la velocidad del correntómetro y la velocidad del flujo perturbado de cada transecto, versus la distancia aguas abajo de las turbinas ($X=0$, $Y=35$ m) normalizada por el diámetro efectivo (DE). En este caso la mayor disminución de la velocidad es de 0.81 m/s y se produce a 0,48 DE aguas abajo de las turbinas. Los resultados indican que la diferencia de velocidad luego de los 10 DE se mantiene cercana a 0,1 m/s. Del gráfico se establece que la disminución de la estela decae de acuerdo a la siguiente función: $y=0,2985 * x^{-0,444}$.

La disminución de velocidad del flujo perturbado respecto del flujo del lado oeste se muestra en la Figura 4.17. La máxima diferencia de velocidad es de 1,33 m/s y se produce a 0,08 DE, muy cercano a las turbinas. En este caso, la disminución de la velocidad luego de los 20 DE se reduce a valores cercanos a 0,3 m/s. La diferencia de velocidad se recupera de acuerdo a la siguiente función: $y = 0,5885 * x^{-0,177}$.

Finalmente, el tercer caso de comparación se muestra en la Figura 4.18, que presenta la disminución entre la velocidad de la celda cinco del flujo no perturbado del este y la velocidad de la celda cinco del flujo perturbado (estela), para cada transecto, versus la distancia aguas abajo de las turbinas normalizada por el diámetro efectivo. La máxima diferencia entre estas velocidades es de 1.53 m/s justo aguas abajo de las turbinas (0,07 DE), la disminución de la velocidad, luego de los 22 DE hacia aguas abajo se reduce a valores cercanos a los 0,5 m/s, y la función de decaimiento es: $y = 0,8259 * x^{-0,157}$.

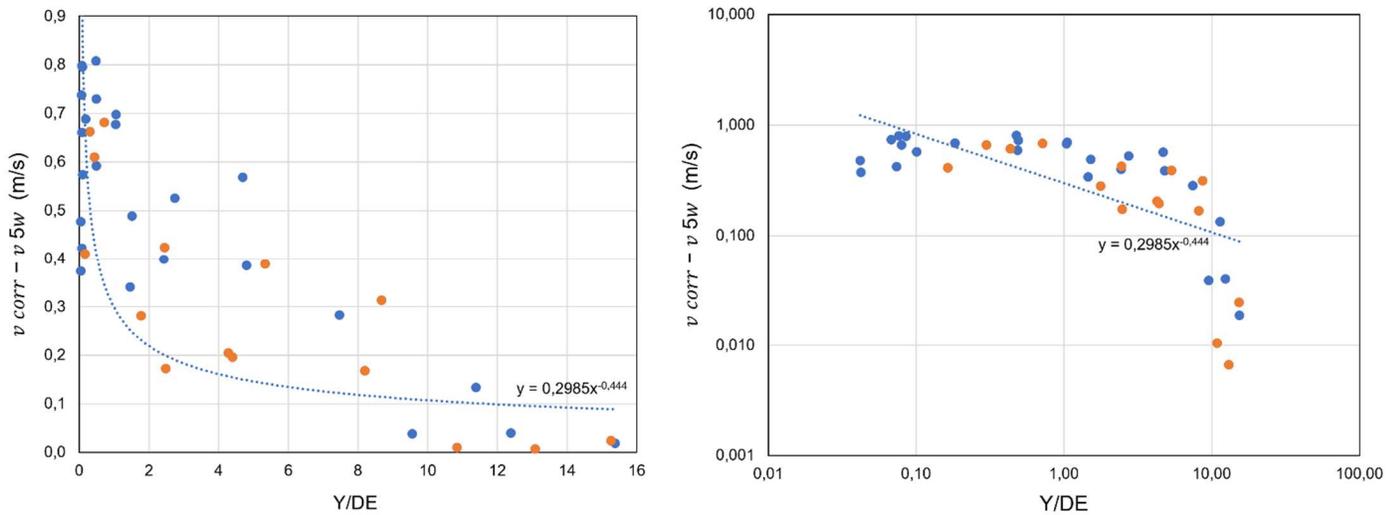


Figura 4.16 Disminución de la velocidad entre correntómetro y flujo perturbado versus la distancia normalizada por el diámetro efectivo, para marea llenante. Panel izquierdo escala lineal y panel derecho escala logarítmica

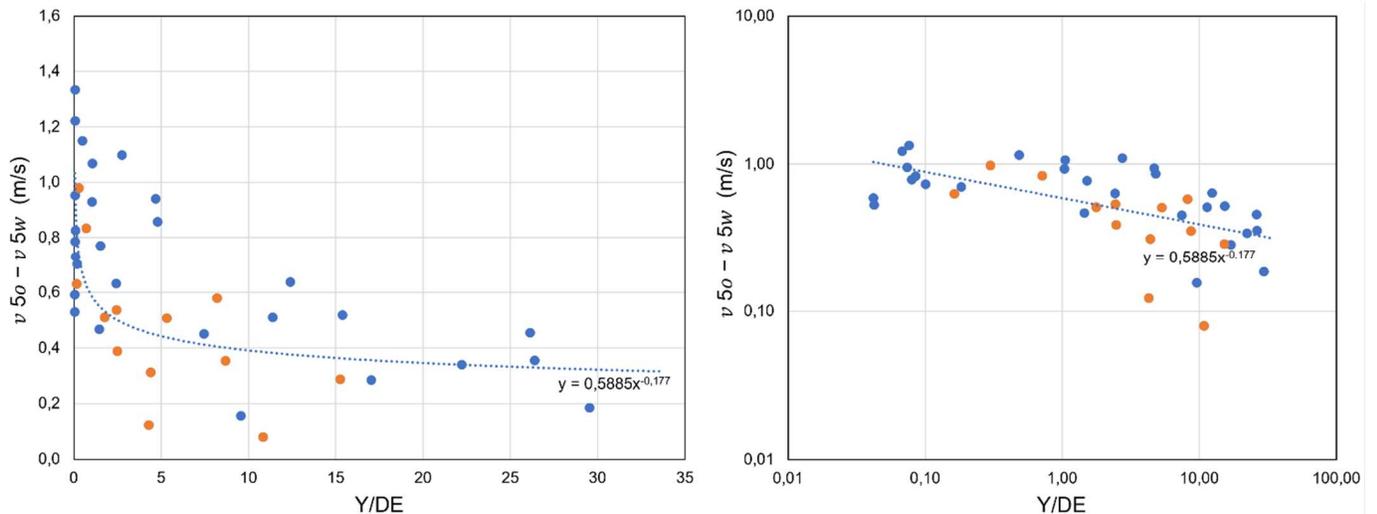


Figura 4.17 Disminución de la velocidad entre flujo no perturbado oeste y flujo perturbado versus la distancia normalizada por el diámetro efectivo, para marea llenante. Panel izquierdo escala lineal y panel derecho escala logarítmica

Para cada caso se graficó también la disminución de la velocidad normalizada de acuerdo a las Ecuaciones 3.8, 3.9 y 3.10 a lo largo de la distancia desde las turbinas expresada en diámetros efectivos. El resultado se muestra en las Figuras 4.19, 4.20 y 4.21, donde los puntos azules representan a los transectos que tienen una velocidad de referencia sobre los 2 m/s y los puntos naranjos a los transectos con velocidad de referencia bajo los 2 m/s. La línea azul punteada advierte la tendencia de los datos, la cual es potencial en los tres casos.

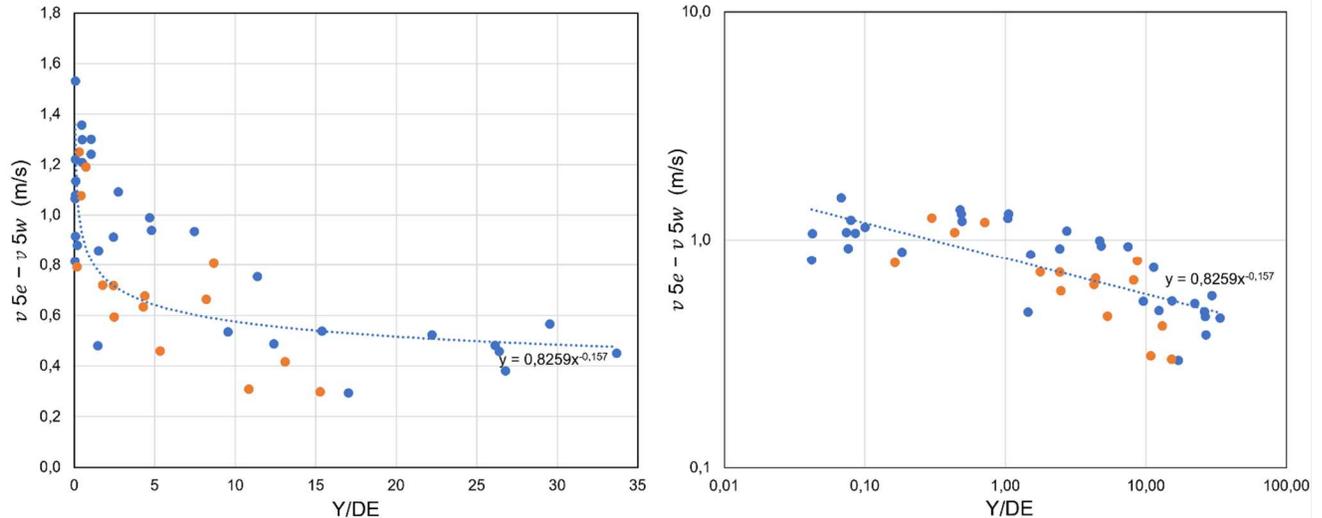


Figura 4.18 Disminución de la velocidad entre flujo no perturbado este y flujo perturbado versus la distancia normalizada por el diámetro efectivo, para marea llena. Panel izquierdo escala lineal y panel derecho escala logarítmica

El primer caso se muestra en la Figura 4.19 e informa que la máxima disminución de velocidad normalizada es de aproximadamente un 40 % que se logra a los 0,09 DE y de la línea de tendencia se desprende que luego de los 9 DE hacia aguas abajo la velocidad del flujo perturbado se recupera en aproximadamente un 95 % en comparación a la velocidad aguas arriba obtenida del correntómetro.

El segundo caso se presenta en la Figura 4.20, donde la máxima disminución de la velocidad es de un 52 % a 0,08 DE, la línea de tendencia obtenida del grafico indica que la disminución se reduce con la distancia y de los 18 DE hacia aguas abajo el flujo perturbado se recupera en aproximadamente un 85 % en comparación al flujo no perturbado del oeste.

Por último, el tercer caso se observa en la Figura 4.21, donde la máxima disminución de la velocidad es de un 54 % a 0,07 DE, la línea de tendencia presenta un decaimiento con la distancia y luego de los 19 DE el flujo perturbado presenta una recuperación de la velocidad de aproximadamente un 80 % en comparación al flujo no perturbado del este.

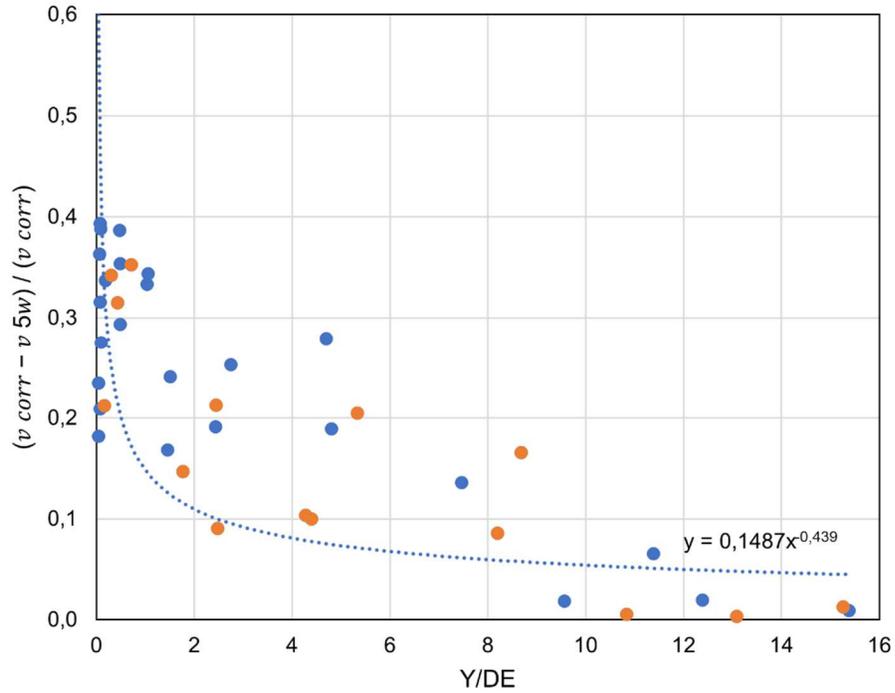


Figura 4.19 Disminución de la velocidad normalizada en función de la velocidad del correntómetro versus la distancia aguas abajo en diámetros efectivos para el primer caso

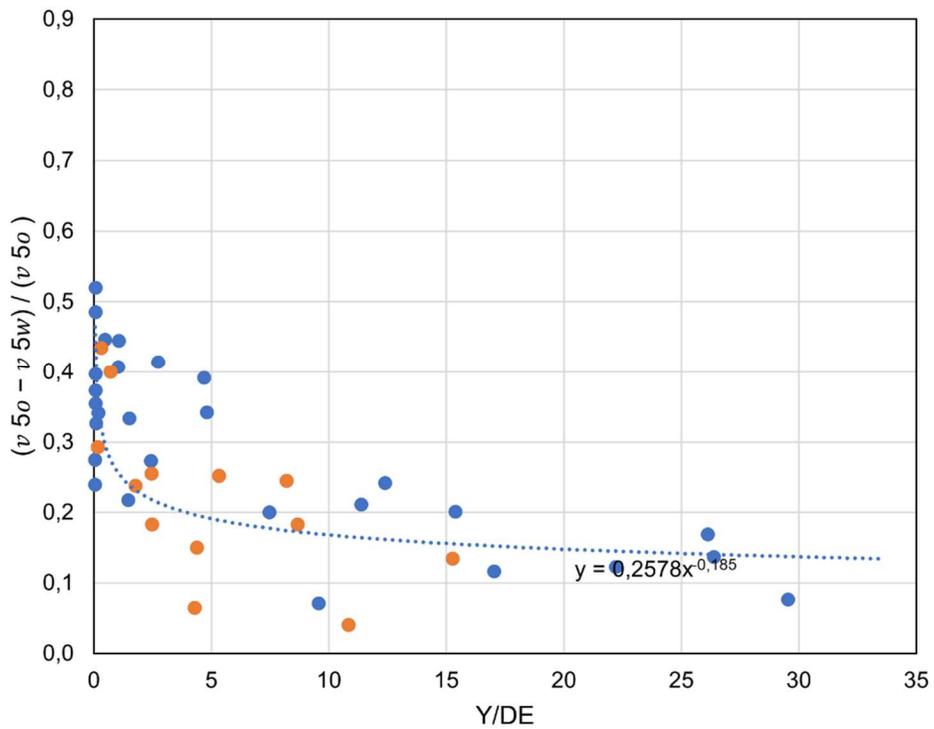


Figura 4.20 Disminución de la velocidad normalizada en función de la velocidad del flujo no perturbado oeste versus la distancia aguas abajo en diámetros efectivos para el segundo caso

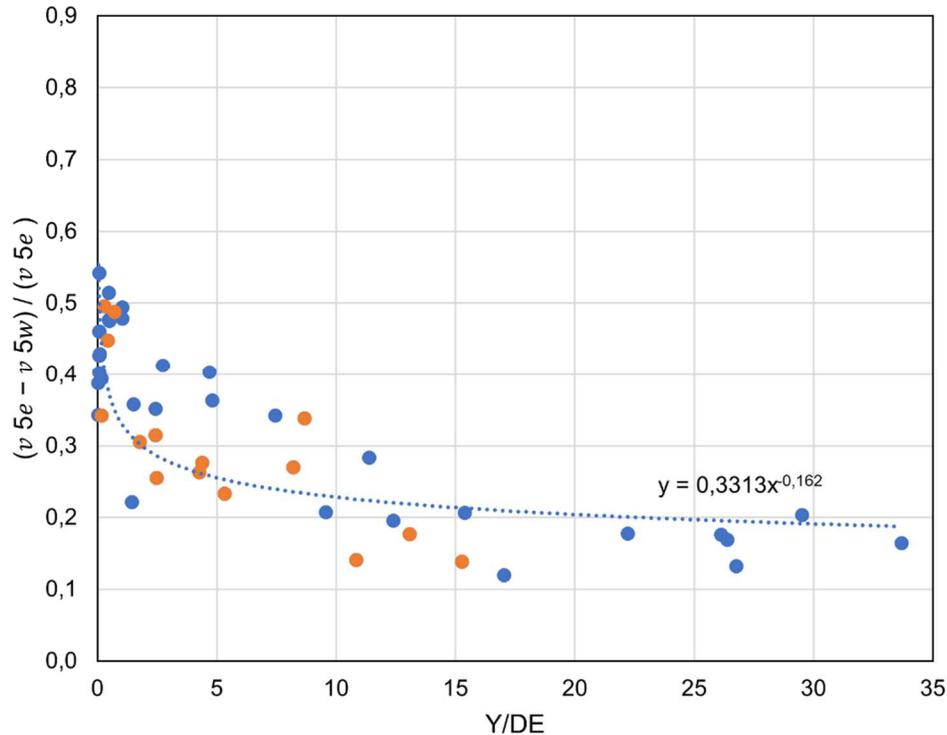


Figura 4.21 Disminución de la velocidad normalizada en función de la velocidad del flujo no perturbado este versus la distancia aguas abajo en diámetros efectivos para el tercer caso

4.7 Conclusiones

Las mediciones realizadas tanto acústicas como de velocidad y la metodología implementada para la toma y procesamiento de datos lograron capturar de forma exitosa los efectos de las turbinas en el flujo aguas abajo de ellas para la condición de marea llenante. Los datos de marea llenante fueron recopilados en el *peak* de la corriente de marea con velocidades que superan los 2 m/s. Se obtuvieron 51 transectos (4 longitudinales y 47 transversales). Para cada transecto se detectó la estela y se delimitaron los diferentes flujos (flujo perturbado y no perturbado por PLAT-I en operación) presentes en cada transecto. En los perfiles verticales de velocidad promedio en la estela, se observó que mientras más cercano el transecto a las turbinas, mayor asimetría presentaba respecto del perfil logarítmico esperado, sobre todo en la profundidad cubierta por las turbinas, y mientras más se alejaban los transectos, más simétricos era el perfil vertical. En cuanto a las velocidades de los flujos no perturbado del oeste y este, se destacan mayores velocidades en general para el flujo no perturbado del este. Se evaluó la evolución de la disminución de la velocidad para tres casos de comparación, en

los tres casos se observó una mayor disminución de la velocidad de un 50 % aproximadamente en las mediciones cercanas a las turbinas. En la vertical, el mayor efecto se observó en la zona abarcada por las turbinas, y el mínimo de velocidad coincide con el eje de las turbinas. Al alejarse de las turbinas hacia aguas abajo, el efecto o la estela disminuye, la velocidad aumenta y el perfil de velocidad se vuelve más homogéneo (o vertical). La estela se recuperó aproximadamente en un 80 % a unos 20 diámetros efectivos (DE) de las turbinas.

CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES

La investigación desarrollada en la presente memoria de título plantea una metodología para detectar y evaluar la estela producida por cuatro turbinas hidrocinéticas de escala comercial montadas en la plataforma energética flotante PLAT-I en el canal Grand Passage, Nueva Escocia, Canadá. Se obtuvieron mapas espaciales de la velocidad del flujo aguas abajo de la plataforma en diferentes condiciones de la marea, a partir de las mediciones realizadas por un perfilador de corriente acústica Doppler (ADCP). El ADCP se montó en una embarcación y recorrió la zona de estudio mientras las turbinas se encontraban operativas. Estos mapas muestran con éxito las variaciones espaciales de velocidades eulerianas horizontales y la disminución de la velocidad que se genera aguas abajo de este arreglo de cuatro turbinas en ambas condiciones de la marea.

Se logró caracterizar la disminución de la velocidad en la estela generada por PLAT-I en operación, donde los resultados fueron coincidentes con la base teórica expuesta en el Capítulo 2 por Gotelli *et al.* (2019) y Sandoval *et al.* (2021), es decir, ocurre una disminución de la velocidad en la estela cercana en comparación con la velocidad de entrada a las turbinas y luego la estela presenta una recuperación gradual con la distancia hacia aguas abajo de las turbinas.

Para la condición de marea llenante, se pudo determinar el perfil vertical de velocidad en la estela y también en los flujos no perturbados de los costados (oeste y este). En las cercanías de las turbinas, los perfiles del flujo no perturbado siguen una tendencia logarítmica, esperada para flujos turbulentos en canales abiertos, y en la estela la velocidad del perfil es baja en el fondo aumentando hacia la superficie, pero en la profundidad abarcada por las turbinas la velocidad disminuye. Luego, con la distancia hacia aguas abajo la estela se mezcla y esta disminución de velocidad en el perfil desaparece, recuperándose y mostrando también una tendencia de perfil logarítmico.

Se logró comparar la velocidad del flujo perturbado (estela) con la velocidad capturada de un correntómetro aguas arriba de las turbinas y los flujos no perturbados del oeste y este, capturando la evolución de la disminución de la velocidad. Se obtuvo que la máxima disminución era de aproximadamente un 50 % en las mediciones cercanas a las turbinas para los tres casos y esta decae con la distancia aguas abajo hasta que se logra una recuperación de la velocidad en el flujo perturbado. Para el primer caso, la recuperación de la velocidad respecto del correntómetro fue considerable (95%)

a los 10 DE (126 m) de las turbinas ($X=0$, $Y=35$ m) aproximadamente. En el segundo y tercer caso de comparación, la velocidad se recupera cerca de un 80 % a unos 20 DE (287 m) de las turbinas aproximadamente respecto del flujo no perturbado a los costados de la estela. Sin embargo, la velocidad del flujo en la estela no logra superar la velocidad de ambos flujos no perturbados, esto por la batimetría variable que presenta la zona en estudio, donde a los 200 m aguas abajo del anclaje, la profundidad del canal disminuye considerablemente acelerándose el flujo. Otra diferencia que se observó fue que la velocidad del flujo no perturbado del oeste era menor que la del no perturbado del este, presumiblemente por la presencia de la isla Peter que se ubica aguas arriba de la zona de estudio y que es un elemento que también genera una estela, disminuyendo la velocidad del flujo en esta zona.

Para la condición de marea vaciante, los resultados no reflejaron claramente una estela típica, solo en algunos transectos se observó una pequeña disminución de la velocidad, de forma similar a lo observado en marea llenante, pero de menor magnitud. Esto se debe a que hubo factores imprevistos que determinaron que las mediciones se realizaran luego del *peak* de la velocidad de la marea, cuando ya decaía y era cercana a la velocidad de corte de las turbinas (1 m/s). Además, las turbinas presentaban una capa de *biofouling*, que afectaba negativamente la extracción de energía, generando entonces una estela menor.

La utilización del dispositivo ADCP, permitió medir también la batimetría del canal y de esta forma asociar los efectos batimétricos con los cambios naturales de las velocidades del flujo en las diferentes zonas estudiadas. Por otra parte, al analizar la ubicación del correntómetro en la plataforma es posible que pudo estar en una zona de inducción generada por las turbinas, de modo que las velocidades captadas por el instrumento podrían estar subestimadas y no representar adecuadamente el flujo natural aguas arriba de las turbinas. Además, es posible que el casco de la plataforma también tuviera un efecto sobre las velocidades capturadas. Considerando que se espera instalar una segunda plataforma energética y que este estudio serviría de base para desarrollar estudios más completos con las plataformas de turbinas alineadas funcionando, se estima que es necesario reubicar el correntómetro o utilizar otro dispositivo que capture la variabilidad espacial de los datos aguas arriba de la plataforma.

Finalmente, se concluye que caracterizar la estela de una turbina a escala tiene bastantes dificultades en comparación con estudios en laboratorio, al presentar variables que no se pueden controlar, por

ejemplo, la geometría del canal es variable, existe un gradiente horizontal de la velocidad y las condiciones climáticas son cambiantes. Sin embargo, los estudios de campo son necesarios ya que las turbinas si operan en estos sitios, no en un laboratorio bajo condiciones uniformes y controladas. Por otro lado, estudios a escala comercial no son frecuentes debido a la baja cantidad de turbinas en operación alrededor del mundo y el costo que conlleva realizarlos. Por lo que este es un estudio de gran interés para los desarrolladores de turbinas y para las agencias ambientales locales.

REFERENCIAS

- Bosboom, J., & Stive, M. J. (2021). *Coastal Dynamics*. TU Delft Open.
- Chamorro, L., Hill, C., Neary, V., Gunawan, B., Arndt, R., & Sotiropoulos, F. (2015). Effects of energetic coherent motions on the power and wake of an axial-flow turbine. *Physics of Fluids* 27.
- CNES y Airbus. (2019). *Grand Passage, Canada*. Obtenido de Google Earth: <https://earth.google.com/web/@44.26428268,-66.33784434,-0.75253627a,3109.15294723d,35y,345.97118626h,0t,0r>
- EMEC. (2020). *Tidal developers*. Obtenido de The European Marine Energy Centre: <https://www.emec.org.uk/marine-energy/tidal-developers/>
- EMEC. (2021). *Marine Energy*. Obtenido de The European Marine Energy Centre: <http://www.emec.org.uk/marine-energy/>
- Foster, S., & Elzinga, D. (25 de abril de 2013). *El papel de los combustibles fósiles en un sistema energético sostenible*. Obtenido de Naciones Unidas: <https://www.un.org/es/chronicle/article/el-papel-de-los-combustibles-fosiles-en-un-sistema-energetico-sostenible>
- Gajardo, D., Escauriaza, C., & Ingram, D. M. (2019). Capturing the development and interactions of wakes in tidal turbine arrays. *Ocean Engineering*, 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).
- Government of Canada. (2021). *Hourly Data Report for October 17, 2020*. Obtenido de Environment and Climate Change Canada: https://climate.weather.gc.ca/climate_data/hourly_data_e.html?StationID=10859&timeframe=1&StartYear=1840&EndYear=2022&time=LST&time=UTC&Year=2020&Month=10&Day=17#
- Government of Canada. (2022). *Westport - 00340*. Obtenido de Tide prediction: <https://tides.gc.ca/en/stations/00340/2020-10-14?tz=UTC>
- Guerra, M., & Thomson, J. (2019). Wake measurements from a hydrokinetic river turbine. *Renewable Energy*, 483-495.

- Guerra, M., Hay, A., Karsten, R., Trowse, G., & Cheel, R. (2021). Turbulent flow mapping in a high-flow tidal channel using mobile acoustic Doppler current profilers. *Renewable Energy*, 759-772.
- Ibrahim, W., Mohamed, M., Ismail, R., Leung, P., Xing, W., & Shah, A. (2021). Hydrokinetic energy harnessing technologies. *Energy Reports*, 2021-2042.
- IEA. (2021). *Renewable Power*. Obtenido de International Energy Agency: <https://www.iea.org/reports/renewable-power>
- Kaufmann, N., Carolus, T., & Starzmann, R. (2019). Turbines for modular tidal current energy converters. *Renewable Energy*, 451-460.
- MATLAB. (2021). version 9.10.0.1669831 (R2021a). Natick, Massachusetts, USA: The MathWorks Inc.
- Melikoglu, M. (2018). Current status and future of ocean energy sources: A global review. *Ocean Engineering*, 563-573.
- Mycek, P., Gaurier, B., Germain, G., Pinon, G., & Rivoalen, E. (2014). Experimental study of the turbulence intensity effects on marine current turbines behaviour. Part II: Two interacting turbines. *Renewable Energy*, 876-892.
- Neary, V., Gunawan, B., Hill, C., & Chamorro, L. (2013). Near and far field flow disturbances induced by model hydrokinetic turbine: ADV and ADP comparison. *Renewable Energy*, 1-6.
- Ocean Renewable Power Company. (2022). *Rivgen power system*. Obtenido de ORPC: <https://orpc.co/rivgen-power-system-integrated-microgrid-solutions/#>
- Orbital Marine Power. (2021). *O2*. Obtenido de Orbital Marine Power: <https://orbitalmarine.com/o2/>
- Robertson, B., Dunkle, G., Gadasi, J., Garcia-Medina, G., & Yang, Z. (2021). Holistic marine energy resource assessments: A wave and offshore wind perspective of metocean conditions. *Renewable Energy*, 286-301.
- Sandoval, J., Soto-Rivas, K., Gotelli, C., & Escauriaza, C. (2021). Modeling the wake dynamics of a marine hydrokinetic turbine using different actuator representations. *Ocean Engineering*.
- Starzmann, R., Kaufmann, N., Jeffcoate, P., Guerra, M., Hay, A., & Pieroway, R. (2021). Effect of Fouling on the Performance of an Instream Turbine. *14th European Wave and Tidal Energy Conference*.
- Teledyne Marine. (2005). *Workhorse Mariner ADCP*. Obtenido de Teledyne Marine: www.teledynemarine.com/Lists/Downloads/VesselMountedADCPIntro.pdf

- Teledyne Marine. (2007). *Marine Measurements: Acoustic Doppler Current Profilers*. Obtenido de Teledyne Marine: www.teledynemarine.com/Lists/Downloads/mm_ps_guide_hr.pdf
- Telionis, D. P. (22 de junio de 2020). *Wake flow*. Obtenido de Access Science: <https://doi.org/10.1036/1097-8542.737300>
- Yang, Z., & Wang, T. (2017). Effects of Tidal Stream Energy Extraction on Water Exchange and Transport Timescales. En Y. Zhaoqing, A. Copping, & (editors), *Marine Renewable Energy* (págs. 259-278). Seattle, WA: Springer.
- Zheng, J., Dai, P., & Zhang, J. (2015). Tidal Stream Energy in China. *Procedia Engineering*, 880-887.
- Zhou, Z., Benbouzid, M., Charpentier, J.-F., Sculler, F., & Tang, T. (2017). Developments in large marine current turbine technologies – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 852-858.

ANEXO 1.1 Contribución a los Objetivos de Desarrollo Sostenible

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) constituyen un llamamiento universal a la acción para poner fin a la pobreza, proteger el planeta y mejorar las vidas y las perspectivas de las personas en todo el mundo. Seleccione a cuál de los 17 ODS contribuye su trabajo de Memoria de Título:

- ODS-1 : Fin de la pobreza.
- ODS-2 : Hambre cero.
- ODS-3 : Salud y bienestar.
- ODS-4 : Educación de calidad.
- ODS-5 : Igualdad de género.
- ODS-6 : Agua limpia y saneamiento.
- ODS-7 : Energía asequible y no contaminante.
- ODS-8 : Trabajo decente y crecimiento económico.
- ODS-9 : Industria, innovación e infraestructura.
- ODS-10: Reducción de las desigualdades.
- ODS-11: Ciudades y comunidades sostenibles.
- ODS-12: Producción y consumo responsables.
- ODS-13: Acción por el clima.
- ODS-14: Vida Submarina.
- ODS-15: Vida de ecosistemas terrestres.
- ODS-16: Paz, justicia e instituciones sólidas.
- ODS-17: Alianzas para lograr los objetivos.

Vinculación
Este estudio contribuye a los ODS-7 y ODS-9, al ser una investigación cuyo fin es el estudio de impactos hidrodinámicos de turbinas hidrocínicas mareométricas, la cual pertenece a una fuente de energía renovable no convencional (ERNC) y las turbinas están montadas en una plataforma energética flotante de innovación que busca entregar energía sustentable a comunidades pequeñas.

ANEXO 4.1 MAPA ACÚSTICO DE CADA TRANSECTO

El mapa acústico se presenta en una vista transversal o longitudinal dependiendo del transecto versus la profundidad del canal, está coloreado por la amplitud de los datos en decibel (dB), y se encuentran ordenados según la condición de marea en el siguiente enlace:

<https://drive.google.com/drive/folders/1Mdu2tjRU2xbmVGFC-bYHvpyfkcWr7vgL?usp=sharing>.

ANEXO 4.2 MAPAS E INFORMACION DE CADA TRANSECTO

Cada transecto presentado en las imágenes contiene:

- Información básica (Fecha, hora (UTC), marea, velocidad de referencia y distancia promedio al anclaje $X=0$, $Y=0$).
- Vista en planta, coloreada por magnitud de la velocidad en las primeras 10 celdas.
- Vista transversal o longitudinal dependiendo del transecto versus la profundidad del canal, coloreada por la velocidad norte.
- Perfil horizontal de velocidad para la celda cinco.
- Perfiles verticales de velocidad promediados para cada flujo designado.

Las figuras se encuentra ordenadas según su condición de marea y detallados en el siguiente enlace:

https://drive.google.com/drive/folders/1L_O_s6p1oW--1gA94oUBGfj06i6--ryo?usp=sharing.

ANEXO 4.3 MAPAS DE TRANSECTOS SELECCIONADOS

En esta sección se presentan los transectos que mejor representan la evolución del flujo desde las turbinas hacia aguas abajo hasta el fin de las mediciones, todos los transectos pertenecen a la condición de marea llenante y su velocidad de referencia asignada por el correntómetro es superior a los 2 m/s.

En cada figura se presentan los siguientes puntos:

- Información básica (Fecha, hora (UTC), marea, velocidad de referencia y distancia promedio al anclaje $X=0, Y=0$).
- Vista en planta, coloreada por magnitud de la velocidad en las primeras 10 celdas.
- Vista transversal versus la profundidad del canal, coloreada por la velocidad norte.
- Perfil horizontal de velocidad para la celda cinco.
- Perfiles verticales de velocidad promediados para cada flujo designado.

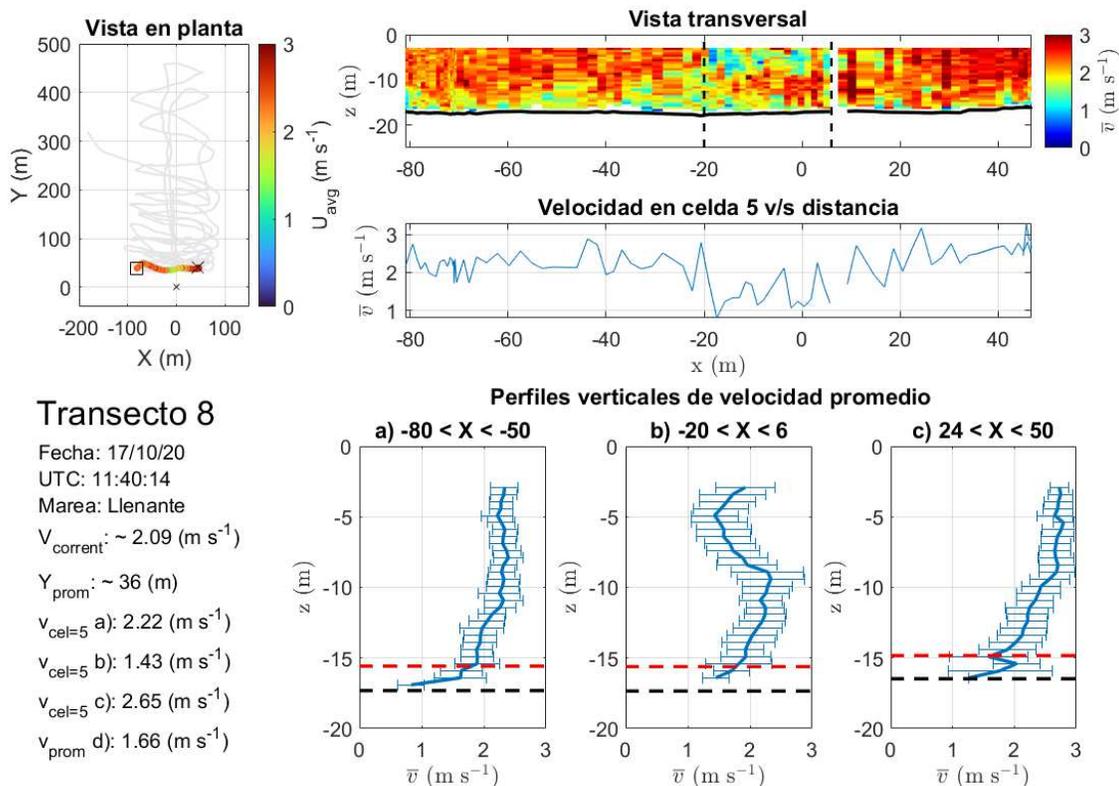


Figura A.4.1 Vista en planta, vista transversal, perfil de velocidad horizontal en celda cinco, perfiles verticales promedio para cada zona e información básica del transecto 8

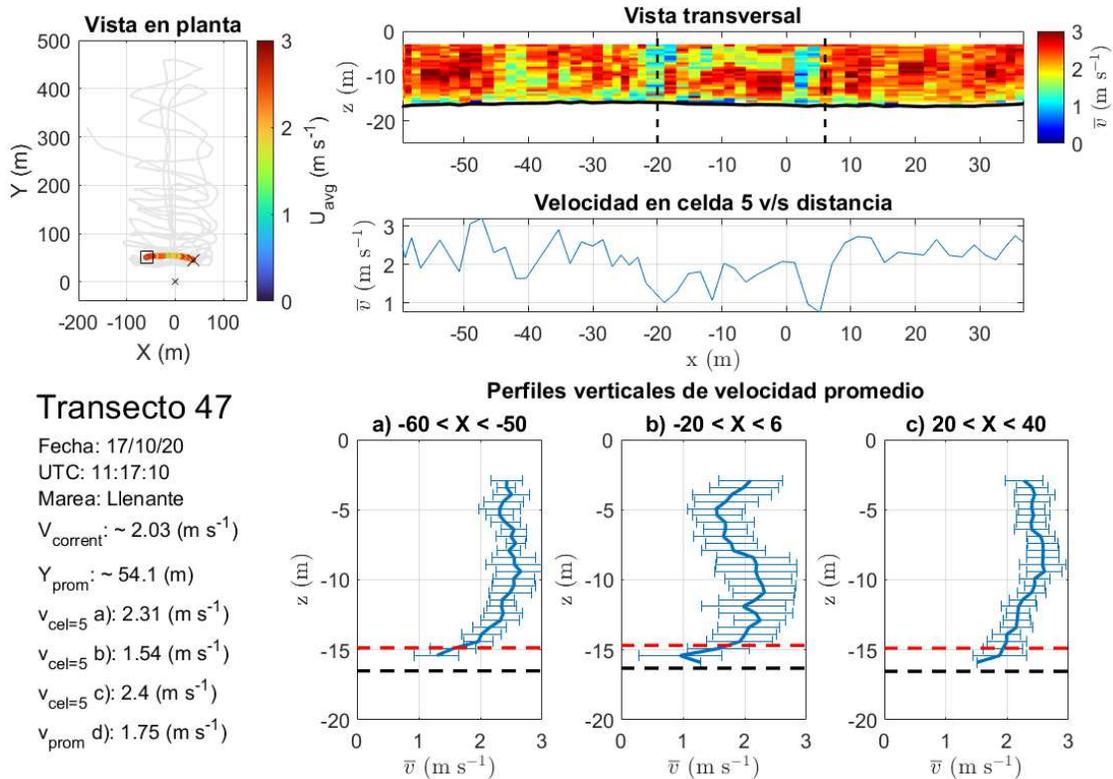


Figura A.4.2 Vista en planta, vista transversal, perfil de velocidad horizontal en celda cinco, perfiles verticales promedio para cada zona e información básica del transecto 47

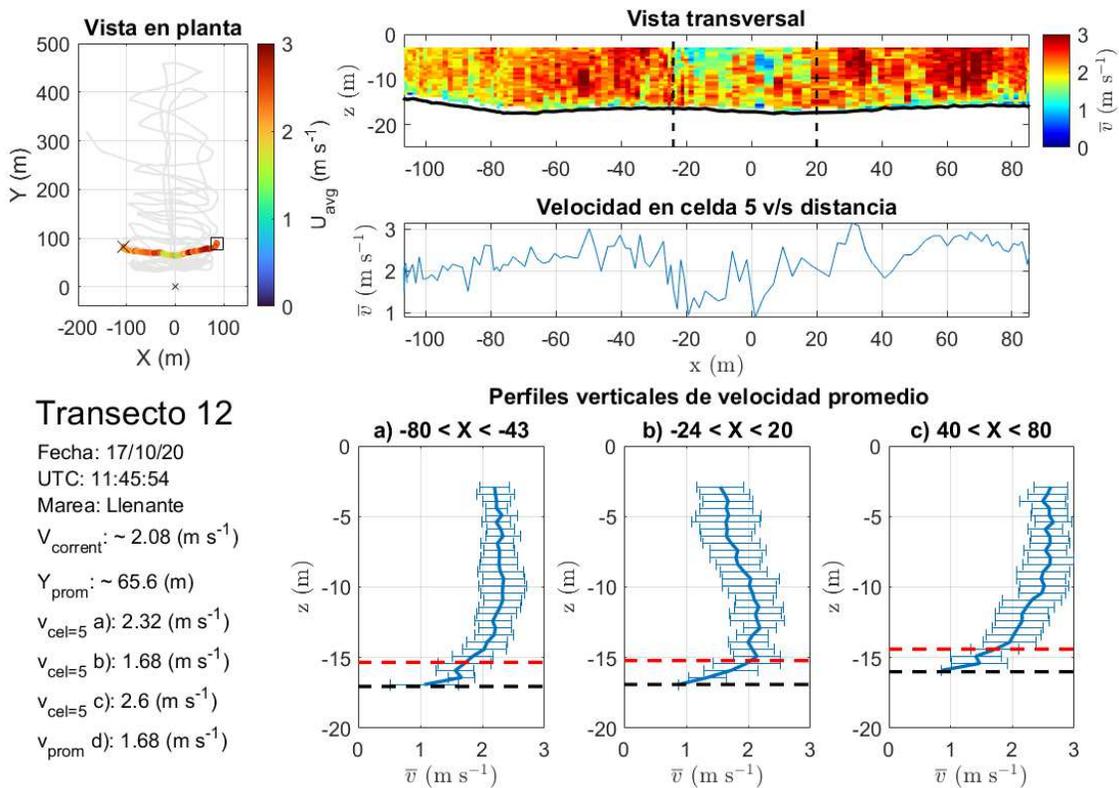


Figura A.4.3 Vista en planta, vista transversal, perfil de velocidad horizontal en celda cinco, perfiles verticales promedio para cada zona e información básica del transecto 12

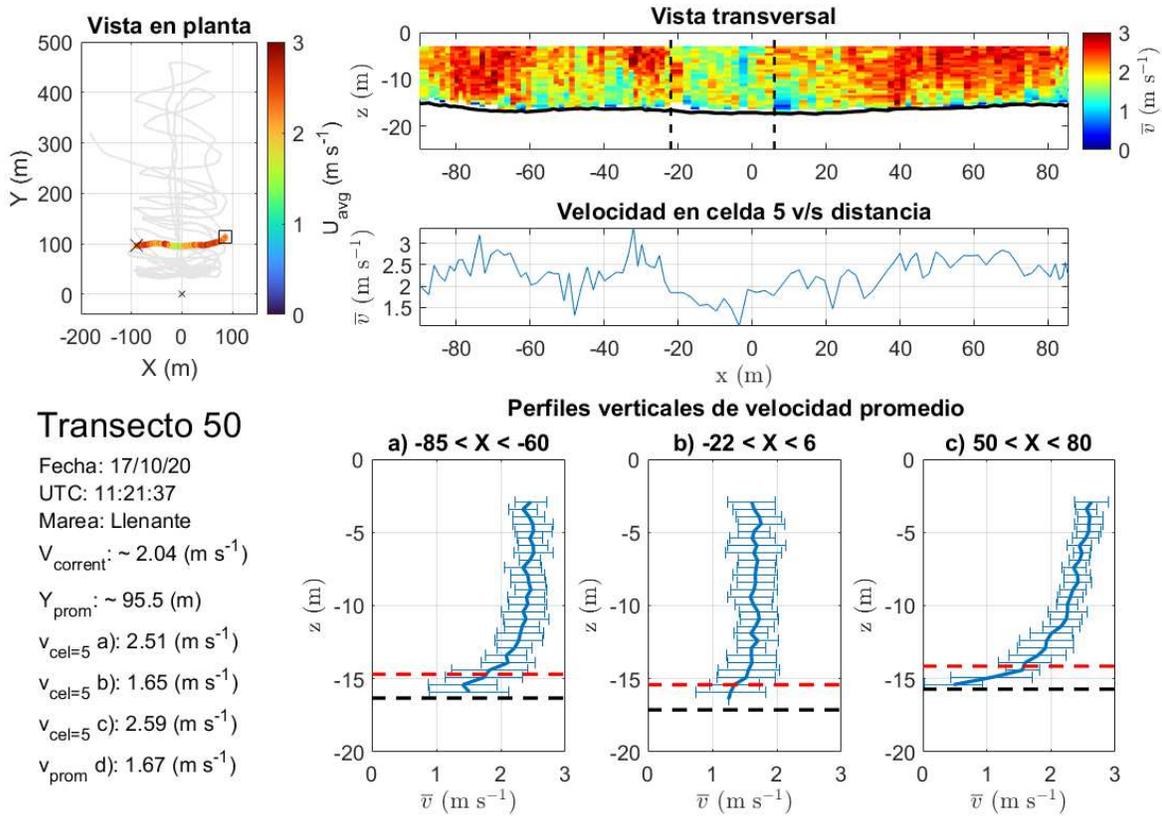


Figura A.4.4 Vista en planta, vista transversal, perfil de velocidad horizontal en celda cinco, perfiles verticales promedio para cada zona e información básica del transecto 50

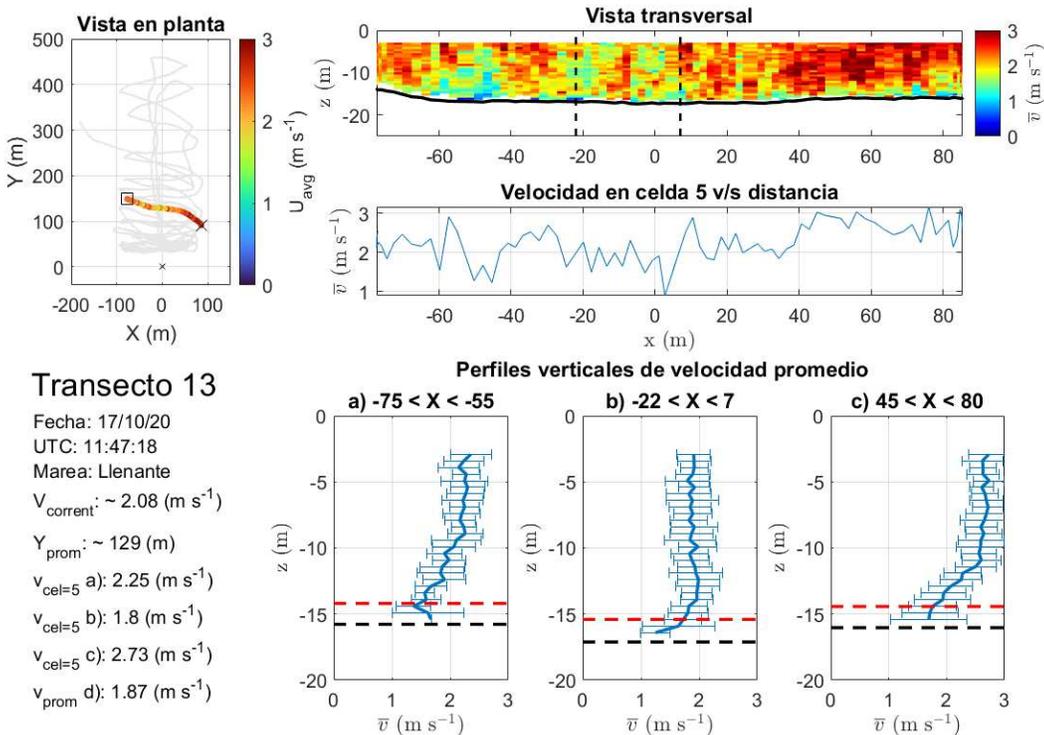


Figura A.4.5 Vista en planta, vista transversal, perfil de velocidad horizontal en celda cinco, perfiles verticales promedio para cada zona e información básica del transecto 13

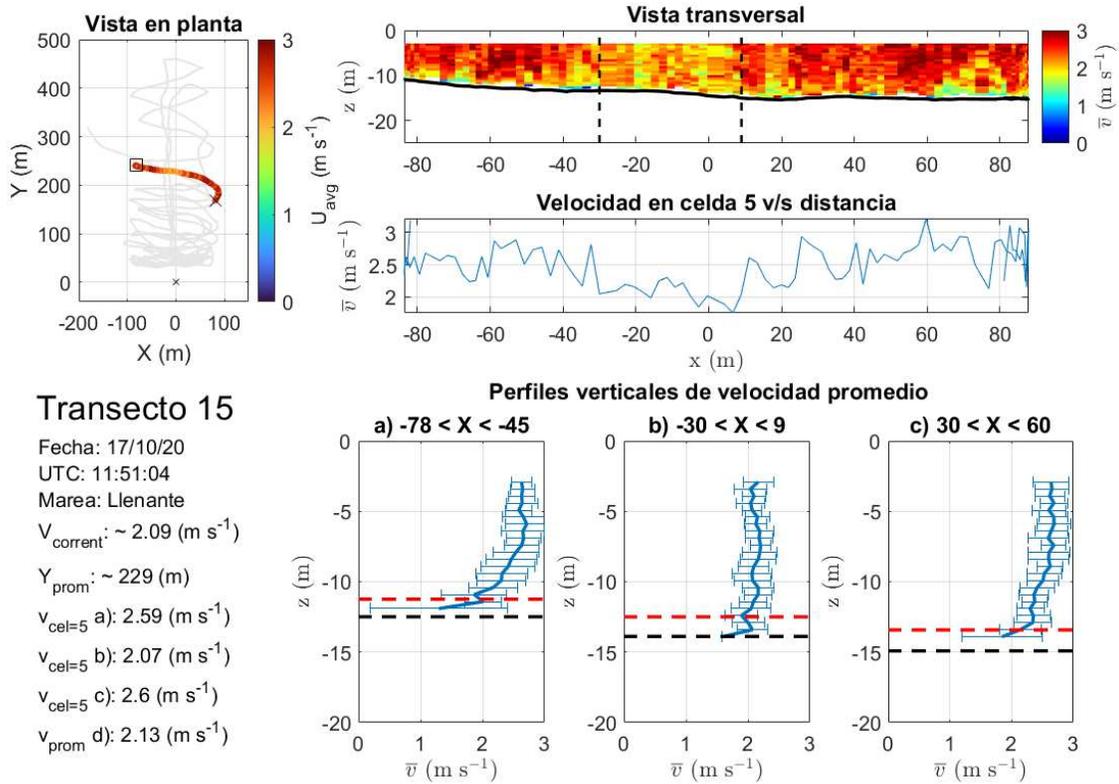


Figura A.4.6 Vista en planta, vista transversal, perfil de velocidad horizontal en celda cinco, perfiles verticales promedio para cada zona e información básica del transecto 15

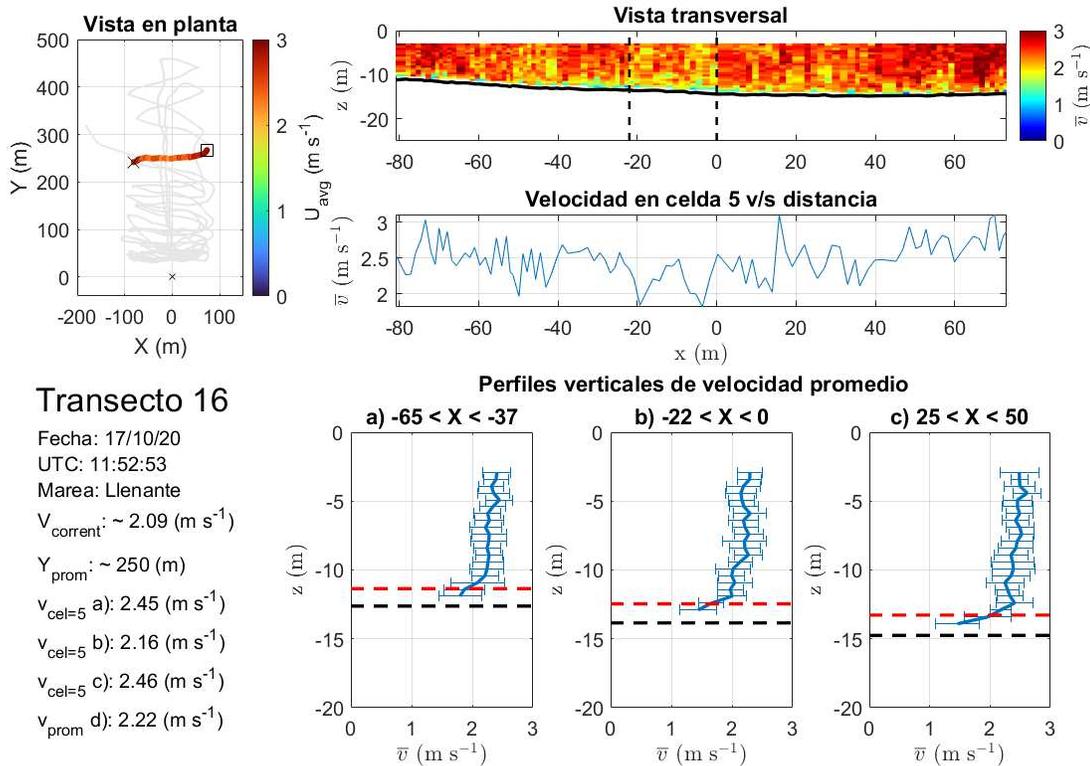


Figura A.4.7 Vista en planta, vista transversal, perfil de velocidad horizontal en celda cinco, perfiles verticales promedio para cada zona e información básica del transecto 16

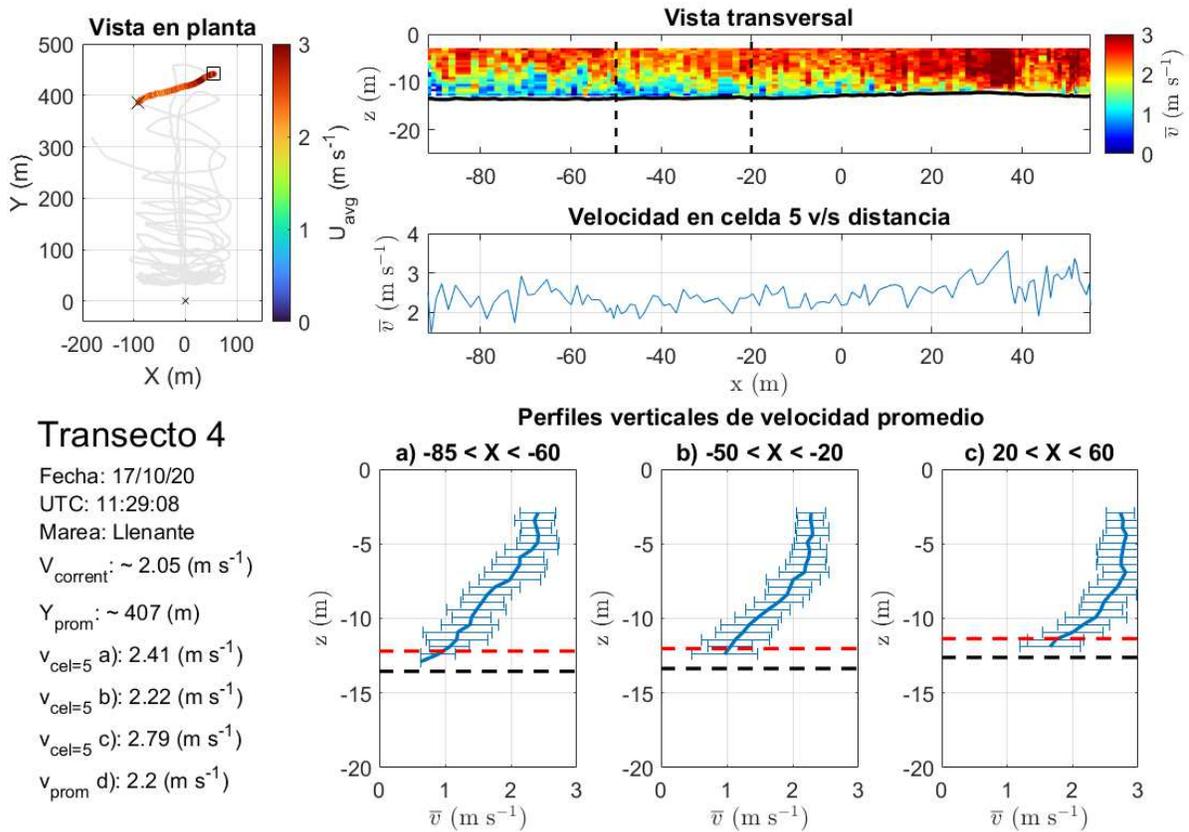


Figura A.4.8 Vista en planta, vista transversal, perfil de velocidad horizontal en celda cinco, perfiles verticales promedio para cada zona e información básica del transecto 4

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN – FACULTAD DE INGENIERÍA
RESUMEN DE MEMORIA DE TÍTULO

Departamento : Departamento de Ingeniería Civil
Carrera : Ingeniería Civil
Nombre del memorista : Benjamín Andrés Troncoso Riquelme
Título de la memoria : Caracterización del campo de velocidades de la estela producida por turbinas hidrocínicas flotantes de escala comercial.
Fecha de la presentación oral :
Profesor(es) Guía : Maricarmen Guerra Paris
Profesor(es) Revisor(es) : Oscar Link
Concepto :
Calificación :

Resumen

El uso de combustibles fósiles ha demostrado no ser sostenible en el tiempo debido a su impacto negativo sobre el medio ambiente. La creciente demanda energética hace crítica la búsqueda de fuentes alternativas, en especial de fuentes de energía renovable no convencionales (ERNC). Dentro de ellas, sobresale la energía mareomotriz por su alta predictibilidad, sin embargo, su desarrollo está actualmente en etapa pre-comercial, donde la investigación aplicada es incipiente.

Los sistemas utilizados para la extracción de energía mareomotriz corresponden a turbinas hidrocínicas que se instalan directamente en el flujo mareal, principalmente en zonas estrechas como canales mareales, fiordos o estrechos, donde el recurso energético es mayor debido a las altas velocidades. Con el fin de maximizar la extracción de energía en un sitio determinado, se pretende generalmente instalar conjuntos o arreglos de turbinas. Para lograr una instalación adecuada de un arreglo de turbinas, es necesario contar con la caracterización del recurso disponible y una descripción de la estela que generan.

En esta investigación de campo se caracteriza la estela que genera un arreglo de cuatro turbinas de escala comercial, montadas en la plataforma energética flotante PLAT-I emplazada en el canal mareal Grand Passage en Canadá. Se utilizan datos de velocidad obtenidos por un perfilador de corriente acústica Doppler (ADCP) móvil. Los datos recolectados fueron organizados de acuerdo a su condición de marea y se dividieron en transectos transversales y longitudinales al flujo. Para cada transecto se identificó la región perturbada por las turbinas (estela) y las regiones del flujo no perturbadas, tanto al este como al oeste de la plataforma. Se compararon los perfiles verticales de velocidad en la estela con la velocidad del flujo aguas arriba de las turbinas obtenida con un correntómetro y con la velocidad de los flujos no perturbados. Los resultados muestran que la estela se manifiesta como un cambio de forma del perfil de velocidades y con una disminución de la velocidad en la profundidad cubierta por las turbinas. Se observó una disminución del 40% de la velocidad en la estela respecto del flujo aguas arriba de las turbinas. La disminución de velocidad fue sobre un 50% respecto del flujo no perturbado a los costados de la estela. Finalmente se observó una recuperación de la estela superior al 80% aproximadamente a 20 diámetros efectivos (287 m) desde la plataforma.