



FACULTAD DE INGENIERÍA

Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

**EVALUACIÓN DE UN MODELO ANALÍTICO
BIDIMENSIONAL DE CORRIENTES DE MAREA
SEMIDIURNA PARA ESTIMAR POTENCIA DE ENERGÍA**

José Ignacio Ribba Esteva

Septiembre 2015

**EVALUACIÓN DE UN MODELO ANALÍTICO BIDIMENSIONAL DE CORRIENTES DE MAREA
SEMIDIURNA PARA ESTIMAR POTENCIA DE ENERGÍA**

José Ignacio Ribba Esteva

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

Mario Cáceres Muñoz
Profesor guía

Catalina Aguirre Galaz
Docente

Patricio Winckler Grez
Docente

DECLARACIÓN

Este trabajo, o alguna de sus partes, no ha sido presentado anteriormente en la Universidad de Valparaíso, institución universitaria chilena o extranjera u organismo de carácter estatal, para evaluación, comercialización u otros propósitos. Salvo las referencias citadas en el texto, confirmo que el contenido intelectual de este Proyecto de Título es resultado exclusivamente de mis esfuerzos personales.

La Universidad de Valparaíso reconoce expresamente la propiedad intelectual del autor sobre esta Memoria de Titulación. Sin embargo, en caso de ser sometida a evaluación para los propósitos de obtención del Título Profesional de Ingeniero Civil Oceánico, el autor renuncia a los derechos legales sobre la misma y los cede a la Universidad de Valparaíso, la que estará facultada para utilizarla con fines exclusivamente académicos.

AGRADECIMIENTOS

Primero que todo quisiera agradecer a mis Padres por darme la oportunidad de estudiar una carrera profesional y apoyarme en todo. Al Pipe, Cata, Matti, Luca, Gabo, Andreita y Seba por acompañarme y estar ahí siempre. A mi preciosa favorita Niza por aguantarme, aconsejarme, amarme, cuidarme, alentarme y muchos 'me' más en las buenas y en las malas, de lo que ha sido nuestro proyecto juntos y a Sonic por brindarnos un 'puff puff' cada vez que lo queremos tomar. Al Chalito y la Cami por compartir bonitos momentos, preparar ricas pizzas y apoyarme. A mis grandes amigos de infancia Andrea y Miguel por alentarme a finalizar esta etapa y apoyarme cuando lo he necesitado. A mi querida 'Tita' Marcia y gran amigo Rodrigo por tenderme la mano cuando más lo necesité. A Karina y Benja por todo el apoyo que me han brindado en todo momento. A mis grandes compas y amigos de Oceánica con quienes compartí tremendas vivencias: Franco, Pablo, Ro, Kiko y muchos otros que con cariño guardo en recuerdos.

Quiero agradecer al profesor Mario por la paciencia y excelente disposición que siempre tuvo para lograr terminar esta etapa, a la profesora Catalina por disponer de su tiempo a pesar de que se encuentra en una etapa importante de su vida fuera de la UV, y al profesor Patricio por ser fuente de inspiración para muchos en la carrera, siempre con buena disposición y ayudando en todo momento.

Los datos de ADCP remolcado de Canal Desertores fueron obtenidos en una campaña de corrientes institucional del año 2001 para satisfacer demanda de la carta náutica, realizado por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) a través del Centro Nacional de Datos Oceanográficos (CENDHOC).

Los datos del Estero Pitipalena fueron proporcionados por el proyecto FNDR de la Decimoprimerá región de Aysén, código BIP 30010880-0 "Análisis del Comportamiento de la Marea Roja en dos localidades de la provincia de Aysén, Puerto Melinka y Puerto Raúl Marín Balmaceda", proyecto en el cual el profesor Mario Cáceres se desempeñaba como co-investigador.

Los datos de ADCP de Canal Jerónimo fueron gentilmente proporcionados por el SHOA en el marco de un acuerdo de cooperación para estudios de energía por corrientes de marea.

Los datos de ADCP del Canal Chacao fueron proporcionados por el profesor Mario Cáceres como parte de la base de datos usada en Cáceres *et al.*, 2003; y los datos del Canal Fitzroy fueron gentilmente proporcionados por el Instituto de Fomento Pesquero en el marco de un acuerdo de cooperación.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 CARACTERÍSTICAS DE LOS SITIOS ESCOGIDOS	3
1.1.1 CANAL DESERTORES	4
1.1.2 CANAL CHACAO	5
1.1.3 CANAL JERÓNIMO.....	6
1.1.4 CANAL FITZROY	7
1.1.5 CANAL DEL ESTERO PITIPALENA.....	8
2 FUNDAMENTO TEÓRICO	9
2.1 CIRCULACIÓN EN SISTEMAS ESTUARINOS	9
2.2 GENERALIDADES EN LA DIMENSIÓN LONGITUDINAL Y TRANSVERSAL EN LOS ESTUARIOS.....	9
2.3 MODELOS ANALÍTICOS EN DIMENSIÓN TRANSVERSAL	10
2.4 CORRIENTES DE MAREA Y ENERGÍA.....	18
2.4.1 CORRIENTES DE MAREA	18
2.4.2 APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO DE LAS CORRIENTES DE MAREA ...	18
3 OBJETIVOS.....	20
3.1 OBJETIVO GENERAL.....	20
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
4 METODOLOGÍA	21
4.1 MEDICIONES CON ADCP MÓVIL Y BATIMETRÍA.....	21
4.1.1 CANAL DESERTORES	22
4.1.2 CANAL CHACAO	23
4.1.3 CANAL JERÓNIMO.....	24
4.1.4 FITZROY	25
4.1.5 PITIPALENA.....	26
4.2 APLICACIÓN DEL MODELO	28
4.2.1 ANÁLISIS ESTADÍSTICO EN MEDICIONES TRANSVERSALES	28
4.2.2 SECCIONES CON MEDICIONES TRANSVERSALES	28
4.2.2.1 Desertores.....	31
4.2.2.2 Chacao	31
4.2.2.3 Jerónimo.....	32
4.2.2.4 Fitzroy.....	33
4.2.3 CASO PITIPALENA CON MEDICIÓN LONGITUDINAL	34
4.3 POTENCIA DE ENERGÍA Y ANÁLISIS PARA LA EXTRACCIÓN.....	37
5 RESULTADOS.....	37
5.1 CANAL DESERTORES.....	37
5.1.1 COMPARACIÓN OBSERVACIONES-MODELO SECCIÓN 1 (S1)	37
5.1.2 PARÁMETROS ESTADÍSTICOS SECCIÓN 1.....	39
5.1.3 COMPARACIÓN OBSERVACIONES-MODELO SECCIÓN 2 (S2)	39

5.1.4	PARÁMETROS ESTADÍSTICOS SECCIÓN 2.....	41
5.2	CANAL CHACAO	42
5.2.1	COMPARACIÓN OBSERVACIONES Y MODELO	42
5.2.2	PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	44
5.3	CANAL FITZROY	45
5.3.1	COMPARACIÓN OBSERVACIONES Y MODELO M_2	45
5.3.2	PARÁMETROS ESTADÍSTICOS M_2	45
5.3.3	COMPARACIÓN OBSERVACIONES Y MODELO K_1	47
5.3.4	PARÁMETROS ESTADÍSTICOS K_1	47
5.4	CANAL JERÓNIMO.....	49
5.4.1	COMPARACIÓN OBSERVACIONES Y MODELO	49
5.4.2	PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	51
5.5	CANAL PITIPALENA.....	51
5.5.1	CIRCULACIÓN DEL MODELO	51
5.6	POTENCIA DEL FLUJO EN LAS SECCIONES.....	56
5.6.1	POTENCIA CANAL DESERTORES	57
5.6.2	POTENCIA CANAL CHACAO.....	58
5.6.3	POTENCIA EN CANAL FITZROY.....	59
5.6.4	POTENCIA EN CANAL JERÓNIMO	60
5.6.5	POTENCIA EN CANAL PITIPALENA	61
6	DISCUSIÓN	62
6.1	ANTECEDENTES	62
6.2	ASPECTOS DEL ANÁLISIS.....	62
7	CONCLUSIÓN	67
8	REFERENCIAS.....	68
9	APÉNDICE.....	71
9.1	DISPOSITIVOS DE EXTRACCIÓN.....	71
9.1.1	TURBINA DE EJE TRANSVERSAL-HORIZONTAL (THAWT)	72
9.1.2	VIBRACIÓN INDUCIDA POR VÓRTICES (VIVACE).....	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Lugares de estudio en zonas sur y austral de Chile	3
Figura 2: Mapa satelital de canal desertores	4
Figura 3: Mapa satelital de canal Chacao	5
Figura 4: Mapa satelital de canal Jerónimo	6
Figura 5: Mapa satelital de canal Fitzroy	7
Figura 6: Vista satelital del fiordo Pitipalena	8
Figura 7: Procesos hidrodinámicos y batimetría afectando la distribución transversal de velocidades en un canal.....	10
Figura 8: Esquema de variables en el modelo de Wong	11
Figura 9: Patrón de flujo descrito por modelo de Wong.....	13
Figura 10: Esquema de variables en el modelo de Huijts.....	15
Figura 11: Comparación entre (a) modelo y (b) observaciones del flujo semidiurno en un transecto del estuario de James River.....	17
Figura 12: Comparación marea-viento de densidad de potencia disponible	19
Figura 13: Canal Desertores (panel izquierdo), ubicación de los transectos 1 y 3 con orientación este-oeste (p. derecho sup.) y perfil batimétrico de las secciones 1 y 3 (p. derecho inf.). Números con asteriscos son las numeraciones de los transectos.	22
Figura 14: Canal Chacao (b), ubicación del transecto de medición con isobatas cada 20 m (c) y perfil batimétrico de la sección (a).....	23
Figura 15: Canal Jerónimo (panel izquierdo), ubicación del transecto de medición (p. derecho inf.) y perfil batimétrico de la sección (p. derecho sup.). Puntos sobre la batimetría en panel izquierdo son la posición de las sondas de profundidad.....	24
Figura 16: Canal Fitzroy (panel izquierdo), ubicación del transecto de medición (p. derecho sup.) y perfil batimétrico de la sección (panel derecho inf.). Números con asterisco son la numeración de los transectos.	25
Figura 17: Transectos de correntometría con ADCP en el fiordo Pitipalena	26
Figura 18: Grilla batimétrica y secciones transversales del canal Pitipalena.....	27
Figura 19: Contornos de correlación R y RMSE en corridas del modelo dentro de rangos de variación de A_z y U_m , del perfil central del lado norte de Canal Chacao. Los intervalos de R son 0.2 para $R < 0.9$ y de 0.02 para $R > 0.9$	29
Figura 20: Velocidades del modelo y velocidades referenciales promedio de cada perfil (U_{mp})	30
Figura 21: Perfiles de datos en Desertores.....	31
Figura 22: Perfiles de datos en C. Chacao	31
Figura 23: Perfiles de medición Jerónimo.....	32
Figura 24: Perfiles de medición Fitzroy.....	33
Figura 25: Sección longitudinal y transversales en Pitipalena	34
Figura 26: Perfiles verticales de modelación sobre la sección longitudinal de canal Pitipalena (panel superior). (a) Sección 1; (b) Sección 2; (c) Sección 3; (d) Sección 4; (e) Sección 5 ...	35

Figura 27: (a) Observaciones de la amplitud de la corriente de marea M_2 en canal Desertores S1. (b) Variabilidad transversal de R , A_z y RMS en la sección. (c) Solución analítica en Desertores S1. Línea segmentada es el dominio de las observaciones.	38
Figura 28: Comparación de perfiles de corriente con alta y baja correlación (R) en Desertores S1.....	39
Figura 29: (a) Observaciones de la amplitud de la corriente de marea M_2 en canal Desertores S2. (b) Variabilidad transversal de R , A_z y RMS en la sección. (c) Solución analítica en Desertores S2. Línea segmentada es el dominio de las observaciones.	40
Figura 30: Comparación de perfiles de corriente con alta y baja correlación (R) en Desertores S2.....	41
Figura 31: (a) Observaciones de la amplitud de la corriente de marea M_2 en C. Chacao (b) Variabilidad transversal de R , A_z y RMSE en la sección. (c) Solución analítica en C. Chacao.	43
Figura 32: Comparación de perfiles de corriente con alta y baja correlación (R) en Canal Chacao.....	44
Figura 33: Comparación de perfiles de corriente M_2 con alta y baja correlación (R) en Canal Fitzroy	45
Figura 34: (a) Observaciones de la amplitud de la corriente de marea M_2 en C. Fitzroy (b) Variabilidad transversal de R , A_z y RMSE en la sección. (c) Solución analítica en C. Fitzroy.	46
Figura 35: Comparación de perfiles de corriente K_1 con alta y baja correlación (R) en Canal Fitzroy	47
Figura 36: (a) Observaciones de la amplitud de la corriente de marea K_1 en C. Fitzroy (b) Variabilidad transversal de R , A_z y RMSE en la sección. (c) Solución analítica en C. Fitzroy.	48
Figura 37: (a) Observaciones de la amplitud de la corriente de marea K_1 en C. Jerónimo (b) Variabilidad transversal de R , A_z y RMSE en la sección. (c) Solución analítica en C. Jerónimo.	50
Figura 38: Comparación de perfiles de corriente M_2 con alta y baja correlación (R) en Canal Fitzroy	51
Figura 39: Solución analítica de la amplitud de la corriente de marea M_2 en las secciones de canal Pitipalena.....	53
Figura 40: Comparación de perfiles de corriente M_2 en canal Pitipalena en los cinco transectos: a) Sección 1, b) Sección 2, c) Sección 3, d) Sección 4 y e) Sección 5.	55
Figura 41: (a) Potencia verticalmente promediada en C. Desertores. (b) Distribución de potencia en S1 (c) Distribución de potencia en S2	57
Figura 42: (a) Potencia verticalmente promediada en C. Chacao. (b) Distribución de potencia en la sección	58
Figura 43: (a) Potencia verticalmente promediada en C. Fitzroy. (b) Distribución de potencia en sección M_2+K_1	59
Figura 44: (a) Potencia media en la vertical C. Jerónimo. (b) Distribución de potencia en la sección.....	60

Figura 45: Potencia verticalmente promediada, interpolada horizontalmente a partir de los cinco transectos del C. Pitipalena	61
Figura 46: Solución analítica lado norte de C. Chacao. (a) Valor constante de $A_z=0.085 \text{ m}^2/\text{s}$ y $U=2.8 \text{ m/s}$ para toda la sección y (b) A_z variable en la horizontal.....	64
Figura 47: (a) Turbina axial horizontal y vertical, (b) hidropianos, (c) turbinas de eje transversal-horizontal (THAWT, por sus siglas en inglés) y las (d) vibración inducida por vórtices (VIVACE).....	72
Figura 48: Funcionamiento de una turbina THAWT.....	73
Figura 49: Funcionamiento de una turbina VIVACE	74

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resumen de características de las secciones y parámetros en caso transversal....	30
Tabla 2: Resumen parámetros Pitipalena.....	36
Tabla 3: Resultados de análisis estadístico y coeficiente de viscosidad turbulento en C. Pitipalena	54
Tabla 4: Promedios transversales de R y RMSE en los canales en estudio	63
Tabla 5: Parámetros típicos y números no dimensionales en canales de estudio	65
Tabla 6: Valores de potencia media, máxima y mínima por sección	66
Tabla 7: Configuración del dispositivo VIVACE a distintas escalas de extracción	74
Tabla 8: Configuración a escala mega del elemento VIVACE	75

RESUMEN

El presente estudio tiene por objetivo evaluar el modelo analítico de Huijts *et al.* (2006), que simula la distribución de la amplitud de la corriente de marea M_2 en secciones transversales de cinco canales del sur de Chile, con el fin de cuantificar la potencia del flujo disponible en estos sitios. Las distribuciones de corrientes fueron evaluadas en cada canal utilizando mediciones de ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) móvil en cuatro transectos transversales de canales (Chacao, Desertores, Fitzroy y Jerónimo) y uno longitudinal (canal Pitipalena). Además, se efectuaron pruebas con la componente K_1 en canal Fitzroy.

Para ejecutar el modelo se requirieron como entrada un coeficiente de viscosidad turbulento (A_z) y la amplitud de corriente del armónico (U). Para estimar los valores de A_z en los sistemas seleccionados, se estableció un rango del parámetro A_z en cada sección, en función de la profundidad y la velocidad del flujo, y se seleccionaron dentro de ese rango los valores que entregaban los mejores ajustes de correlación (R) y RMS con el modelo. Se obtuvo así, un coeficiente de viscosidad turbulento variable en el espacio transversal. Al conocer el comportamiento transversal de la corriente se obtuvo la potencia del flujo disponible en el área de la sección con una ecuación que relaciona la densidad del agua y la velocidad de la misma, presentando así la caracterización del recurso energético en las secciones.

Los resultados del modelo en las secciones transversales (Chacao, Desertores, Jerónimo y Fitzroy) mostraron una alta correlación y mínimos errores en comparación con los datos observados, lo que permitió explorar con confianza la distribución transversal modelada en Pitipalena, a partir de un transecto longitudinal. En este sitio se modeló a partir de un perfil vertical en la región central del canal. Se discuten en el texto las bondades y limitaciones del modelo.