



Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

**Sistema de percepción remota de oleaje, mediante el uso
de una cámara de video.**

Luis Rene Daza Zapata

Abril 2017

Sistema de percepción de oleaje, mediante el uso de una cámara de video.

Luis Rene Daza Zapata

COMISIÓN REVISORA	NOTA	FIRMA
Jaime Francisco Leyton Espoz Profesor guía	_____	_____
Patricio Winckler Grez Revisor	_____	_____
Mauricio Molina Pereira Revisor	_____	_____

DECLARACIÓN

Este trabajo, o alguna de sus partes, no han sido presentados 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.

Jaime Francisco Leyton Espoz
Profesor Guía

Luis Rene Daza Zapata
Alumno Memorista

En agradecimiento a Pablo Vera, Gustavo Hafemann, familia y profesores, quienes me brindaron el apoyo necesario para el desarrollo de este proyecto de título.

TABLA DE CONTENIDOS

1. Introducción	1
2. Objetivos.....	2
2.1. Objetivo general	2
2.2. Objetivos específicos.....	2
3. Marco teórico.....	3
3.1. El oleaje.....	3
3.1.1. El oleaje como proceso estocástico.....	4
3.1.2. Descripción espectral del estado de mar	4
3.1.3. Oleaje regular	6
3.1.4. Oleaje irregular	9
3.1.5. Medición del oleaje.....	15
3.1.6. Matlab toolbox “wafo”	16
3.2. Imagen digital	17
3.2.1. Fotografía digital	17
3.2.2. Video digital.....	17
3.3. Correlación estadística	20
4. Sistema de percepción de oleaje por video (S.P.O.V).....	21
4.1. Fondeo de boyas.....	21
4.2. Muestreo mediante S.P.O.V.	24
4.2.1. Preparación fotográfica.....	25
4.2.2. Perspectiva.....	27
4.2.3. Mediciones	30
4.2.4. Recorte y renderizado de video	32
4.2.5. Seguimiento de la boya	33
4.3. Ajuste fotográfico y perspectiva	34
4.3.1. Ajuste fotográfico.....	34
4.3.2. Ajuste de perspectiva	35
5. Sensor de presión.....	37
5.1. Fondeo sensor de presión	37
5.2. Muestreo mediante sensor de presión.....	39
5.2.1. Configuración del instrumento	39

5.2.2.	Activación	41
5.2.3.	Mediciones	42
6.	Resultados S.P.O.V.....	43
6.1.1.	Desplazamientos verticales de la boya	43
6.1.2.	Desplazamientos horizontales de la boya	44
6.1.3.	Observaciones.....	45
6.2.	Tendencia del nivel medio en desplazamientos verticales	46
6.2.1.	Teoría y demostración	46
6.2.2.	Solución.....	49
6.3.	Estiramiento, estrechamiento y desfase	50
6.3.1.	Movimientos orbitales	51
6.3.2.	Conclusión.....	54
6.4.	Análisis de desplazamientos horizontales	57
7.	Validación del S.P.O.V.....	59
7.1.	Variaciones del nivel del mar	59
7.2.	Análisis de cruces por cero	62
7.3.	Análisis espectral.....	65
7.4.	Observaciones.....	69
8.	Discusión	70
9.	Conclusiones	73
10.	Referencias bibliográficas	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Superficie libre del mar mediante la sumatoria infinita de las componentes sinusoidales.....	5
Figura 2: Definición de los términos en una ola progresiva, elemental sinusoidal.	7
Figura 3: Desplazamientos orbitales de las partículas de agua para aguas profundas y poco profundas.....	8
Figura 4: Perfil de un estado de mar irregular.	9
Figura 5: Definición de un proceso de oleaje irregular.	10
Figura 6: Espectro multidireccional de oleaje, junto con sus espectros de frecuencia y direcciones.	12
Figura 7: Ejemplo de Densidad espectral del oleaje.	13
Figura 8 Presentación de la distribución de pixeles en una fotografía.....	17
Figura 9: Posición de una boya sobre una superficie de agua agitada, representada en tres fotogramas consecutivos.	18
Figura 10: Imagen temporal (template), seleccionada para el seguimiento de un carro oscilatorio en un archivo de video de prueba.	19
Figura 11: seguimiento a la oscilación del carro, producida por un resorte, tiempo vs altura.	19
Figura 12: a) Correlación positiva alta de datos. b) Correlación positiva baja de datos	20
Figura 13: Preparación de las boyas y los muertos para su instalación en el sitio de interés.	21
Figura 14: Configuración de las boyas, amarradas entre sí y ancladas al fondo marino. .	22
Figura 15: Kayak doble junto con dos bolsas de escombros, las cuales funcionan como fijación de las boyas al fondo marino.	23
Figura 16: Instalación y ajuste de boyas en el sitio de interés.....	23
Figura 17: Influencia de la altura de observación en el monitoreo de la boya, con $H \gg h$	24
Figura 18: Vista satelital (izquierda) e in situ (derecha), del punto de observacion de las boyas.....	25
Figura 19: Fotografía a la boya desde el punto de medición (izquierda). Medición del diámetro de la boya en pixeles Dpx (derecha).	25
Figura 20: Fotografía (izquierda) y video (derecha).	26

Figura 21: Video inicial (izquierda), y video recortado (derecha).....	27
Figura 22: Distorsión en la apreciación del desplazamiento vertical de la boya	28
Figura 23: Presentación de los componentes necesarios para realizar el ajuste de perspectiva.	29
Figura 24: Presentación del recorte y renderizado de video.....	32
Figura 25: Resultado del seguimiento para el 12 de octubre del 2015, a las 16:51:21s. ...	33
Figura 26: Configuración de contraste de la boya con el resto del ambiente.....	34
Figura 27: Circunferencia final que logra envolver la imagen de la boya por completo	34
Figura 28: Punto de grabación de la boya.....	36
Figura 29: Sensor de presión, modelo TWR-2050.	37
Figura 30: Figura de ubicación del sensor de presión en relación a las boyas.....	37
Figura 31: Sensor de presión en su estructura rígida.....	38
Figura 32: Configuración de tiempo de muestreo.....	39
Figura 33: Configuración de instalación, muestreo de mareas y muestreo de oleaje.	40
Figura 34: Resumen de configuración del sensor.	41
Figura 35: Visualización de datos por muestreo del sensor de presión, utilizando RBR data loggers.....	42
Figura 36: Primeros 10 minutos de variaciones del nivel del mar (N) obtenido por el sensor de presión.....	43
Figura 37: Primeros 10 minutos de variaciones del nivel del mar (N) obtenido por el S.P.O.V	43
Figura 38: Fragmento de medición del 18-10-2015.....	44
Figura 39: Trayectoria de la boya (movimiento en sentido horario), producida por el oleaje	44
Figura 40: Desplazamientos horizontales de la boya con respecto al tiempo.....	45
Figura 41: Boya en presencia de oleaje y corrientes de direcciones perpendiculares entre sí, observados con la cámara de video	46
Figura 42: Proyección del movimiento de la boya captado por cámara.....	47
Figura 43: Trayectoria de la boya, observada desde el punto de vista de la cámara	47
Figura 44: Desplazamientos de la boya proyectados en Z'.	48
Figura 45 : Variaciones del nivel del mar captadas en la toma 1 del muestreo 4.	49
Figura 46: Imágenes obtenidas desde la cámara al inicio y termino de la toma 1 del muestreo 4.....	49

Figura 47: Variaciones del nivel del mar y sus rectas de tendencia, en los periodos especificados.....	50
Figura 48: Serie de datos corregida mediante el proceso demostrado en la Figura 47. ...	50
Figura 49: Conjunto de olas de alturas H_a , H_b , H_c y periodos T_a , T_b y T_c , propagándose en dirección a una boya en reposo.	51
Figura 50: Trayectorias orbitales de la boya producto de las olas observadas en la Figura 49.	51
Figura 51: Evolución del movimiento orbital de la boya con el paso de las olas c , b y a . .	52
Figura 52: Boya y sensor de presión en $t = 0$, con una ola de periodo T , longitud de onda L y altura H , propagándose en dirección a éstos.	53
Figura 53: Comparación entre el sensor de presión (medición euleriana) y el S.P.O.V (medición lagrangiana).	54
Figura 54: Series de tiempo resultantes de la medición de la cresta de ola en la Figura 52.	54
Figura 55: Componentes horizontales de desplazamientos en la serie del S.P.O.V.	55
Figura 56: Componentes verticales de desplazamientos en la serie del S.P.O.V. vs variaciones del nivel del mar registradas por el sensor de presión.....	55
Figura 57: Serie de trayectorias orbitales del S.P.O.V vs variaciones del nivel del mar registradas por el sensor de presión.	56
Figura 58: Movimientos orbitales en una ola según su cresta (sentido + en x) y su valle (sentido - en x).	57
Figura 59: Selección de ola mediante la identificación de valle y cresta, utilizando los desplazamientos horizontales del registro.	57
Figura 60: Series de oleaje en distintas líneas de tiempo.	59
Figura 61: Resultado de la interpolación de las series n_b y n_p bajo una misma línea de tiempo.....	59
Figura 62: Muestreo 1, a) Comparación de las series completas de n_b y n_p . b) Zoom de visualización de datos. c) Correlación entre n_b y n_p	60
Figura 63: Muestreo 2, a) Comparación de las series completas de n_b y n_p . b) Zoom de visualización de datos. c) Correlación entre n_b y n_p	60
Figura 64: Muestreo 3, a) Comparación de las series completas de n_b y n_p . b) Zoom de visualización de datos. c) Correlación entre n_b y n_p	61

Figura 65: Muestreo 4, a) Comparación de las series completas de nb y np. b) Zoom de visualización de datos. c) Correlación entre nb y np.	61
Figura 66: Identificación de los cruces por cero hacia abajo, para las dos series de oleaje obtenidas durante los muestreos	62
Figura 67: Muestreo 1, a) Correlación Tb y Tp. b) Correlación entre Hb y Hp.....	62
Figura 68: Muestreo 2, a) Correlación Tb y Tp. b) Correlación entre Hb y Hp.....	63
Figura 69: Muestreo 3, a) Correlación Tb y Tp. b) Correlación entre Hb y Hp.....	63
Figura 70: Muestreo 4, a) Correlación Tb y Tp. b) Correlación entre Hb y Hp.....	63
Figura 71: a) Comparación de Hs. b) Comparación de H1/10. c) Comparación de Hrms. 64	
Figura 72: Comparación de espectros energéticos para el muestreo 1.....	65
Figura 73: Comparación de espectros energéticos para el muestreo 2.....	65
Figura 74: Comparación de espectros energéticos para el muestreo 3.....	66
Figura 75: Comparación de espectros energéticos para el muestreo 4.....	66
Figura 76: a) Comparación del periodo peak espectral. b) Comparación del periodo medio. c) Comparación del periodo energético.....	68
Figura 77: a) Comparación de la altura significativa. b) Comparación de la pendiente significativa de ola (wave steepness). c) Comparación de la pendiente promedio de ola. 68	
Figura 78: a) Comparación de la varianza (m_0). b) Comparación del momento espectral de orden 2. c) Comparación del momento espectral de orden 4.	68
Figura 79: a) Comparación del momento espectral de orden -1. b) Comparación del momento espectral de orden 1.	69

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Resumen de muestreos, días 12 y 15 de octubre del 2015 (Líneas diagonales corresponden a la repetición de los valores en las filas).	30
Tabla 2: Resumen de muestreos, días 16 y 18 de octubre del 2015 (Líneas diagonales corresponden a la repetición de los valores en las filas).	31
Tabla 3: Ajuste fotográfico para muestreo, el 12-10-2015.....	35
Tabla 4: Ajuste fotográfico para muestreo, los días 15, 16 y 18-10-2015.....	35
Tabla 5: Parámetro de ajuste por perspectiva, junto con los elementos involucrados en su cálculo.	36
Tabla 6: Alturas características de ola, para todos los muestreos.....	64
Tabla 7: Características espectrales resultantes del análisis	67

RESUMEN:

Utilizando una técnica de percepción remota por video, algoritmos para el procesamiento de imágenes y una boya de color, se logró realizar un registro de la desnivelación instantánea del nivel del mar producto del oleaje. Este método de medición puede ser visto como una alternativa a costosas boyas oceanográficas y radares. El sistema está en desarrollo y resultados preliminares muestran que, bajo condiciones normales, alturas y periodos de oleaje pueden ser registrados con un nivel de confianza aceptable, sin embargo, son necesarias pruebas en condiciones extremas (tormentas, visibilidad reducida debido a la neblina, mediciones posteriores al ocaso, etc) y automatización del procesamiento de imágenes para análisis en tiempo real.

La boya fué instalada en playa la Boca (Concón, Valparaíso) y luego monitoreada desde la costa utilizando la cámara de video. El desplazamiento vertical de la boya es inferido en cada fotograma y convertido a elevación de la superficie del agua mediante un software libre de procesamiento de imágenes. Experimentos de prueba del sistema de medición propuesto versus un sensor de presión, muestran coeficientes de correlación del 91 - 96%, 91 - 97% y 96 - 98% en variaciones del nivel del mar, altura y periodo de ola respectivamente.