



Memoria del proyecto para optar al Título de
Ingeniero Civil Oceánico

**PARTICIÓN ESPECTRAL MULTIMODAL APLICADA A LA
DETERMINACIÓN DE OLAS DE DISEÑO
APLICACIÓN EN VALPARAÍSO, CHILE.**

Alejandra Elizabeth Rojas Mackenna

Enero 2015

PARTICIÓN ESPECTRAL MULTIMODAL APLICADA A LA DETERMINACIÓN DE
OLAS DE DISEÑO

APLICACIÓN EN VALPARAÍSO, CHILE.

Alejandra Elizabeth Rojas Mackenna

COMISIÓN REVISORA

NOTA

FIRMA

HUGO ACUÑA

Profesor guía

PATRICIO MONÁRDEZ

Docente

PATRICIO WINCKLER

Docente

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 de 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.

Alejandra Rojas Mackenna
Alumna

Hugo Acuña Sfrasani
Profesor Guía

AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a todas las personas que me apoyaron de alguna manera para completar esta gran tarea; en especial por la ayuda de Dios, que me permitió hacer cosas que yo creía imposibles, ya que este trabajo significó para mí un gran desafío en el ámbito profesional pero que me permitió adquirir las herramientas básicas para el gran camino que se viene por delante como profesional.

Primeramente quiero agradecer la oportunidad que me dio Baird & Associates S.A. por darme el tema de desarrollo de mi memoria y facilitarme todos los instrumentos necesarios para llevar a cabo este proceso. Especialmente a mi profesor guía Hugo Acuña, quien tuvo la disponibilidad de ayudar con mis dudas y tomar de su tiempo para el desarrollo y revisión de este documento.

Además, quiero aprovechar esta oportunidad para agradecer a Manuel Contreras, quien en muchas oportunidades me ayudó a resolver problemas relacionados con la elaboración del algoritmo matemático en Matlab.

Finalmente agradezco el apoyo moral y la preocupación que tuvo mi familia, amigos y compañeros de trabajo.

RESUMEN

En el diseño de estructuras costeras, el oleaje de diseño se basa sobre un análisis estadístico de valores extremos en aguas profundas para distintas clases de oleaje de acuerdo su origen y características, para luego ser propagadas hacia aguas someras. En general se asume que el carácter del oleaje que predomina en Chile es bi-modal (dos clases de oleaje en un mismo estado de mar), y para considerar eso en la práctica se acostumbra realizar una partición de los datos espectrales en aguas profundas, analizando por separado la energía proveniente del tercer cuadrante (SW) y del cuarto cuadrante (NW). Por otro lado, a medida que aumentan nuestra comprensión del oleaje, se ha observado que el oleaje reinante en Chile es de carácter multimodal en algunos casos, pudiendo distinguirse más de dos clases que pueden ser relevantes en el análisis de oleaje extremo. Al aplicar la partición espectral por cuadrante, no siempre es posible distinguir con claridad todas estas componentes que tiene el oleaje, especialmente aquéllas provenientes del NW que pueden ser relevantes en el cálculo de oleaje de diseño en casos específicos.

En este proyecto de título se propuso aplicar un método avanzado de partición de espectros, que permito identificar las constituyentes del espectro multimodal.

Se compararon los resultados obtenidos de la determinación del clima de oleaje de diseño, con estos criterios y con los métodos habitualmente utilizados en la ingeniería para realizar la partición de espectros, obteniéndose que el método de partición espectral multimodal es el más preciso, ya que este conserva la energía original de cada *peak* presente en cada estado de mar.

ABSTRACT

In the design of coastal structures, design waves are chosen on the basis of statistical analysis of extreme events in deep waters for different class of waves in accordance with their origin and characteristic, then propagated to shallow waters. In general the wave climatology in the Easter South Pacific Shore is supposed to be bi-modal (two class of waves in the steady state spectrum), and for its consideration, is a common practice to make a partition of the deep waters spectral data, separately analyzing the energy of the incident waves form the third (SW) and fourth (NW) quadrant. On the other side, as our understanding of waves grows, it has been observed that some wave states in Chile have a multimodal character. In the partition by quadrants, is not always possible to distinguish with clarity all the wave components, especially the ones coming from the NW that can be relevant in the design wave calculation for specific cases.

This project sets an application of an advanced wave partition method, to allow the identification of multimodal spectral constituents.

The result of this method was compared with three other partition methods or criteria regularly used, and applied to the determination of extreme waves, concluded that the multimodal spectral partition method is the most accurate because it keep the energy of each peak present in each sea state.

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	1
2. OBJETIVOS, ALCANCES E HIPÓTESIS	5
2.1 OBJETIVOS GENERALES	5
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	5
2.3 ALCANCES	5
2.4 HIPÓTESIS	5
3. MATERIALES	6
3.1 ESPECTRO BI-DIMENSIONAL DE OLAS EN AGUAS PROFUNDAS	6
3.2 MATLAB	9
3.2.1 DESCRIPCIÓN GENERAL	9
3.2.2 VERSIÓN	10
3.3 XWAVE	10
4. MARCO TEÓRICO	11
4.1 OLEAJE EXTREMO O DE DISEÑO	11
4.1.1 METODOLOGÍAS PARA LA SELECCIÓN DE DATOS EXTREMOS	11
4.1.2 PROCESO DE SELECCIÓN DE DATOS	12
4.2 PARTICIÓN ESPECTRAL MULTIMODAL	13
4.2.1 PROBLEMÁTICA QUE ORIGINA LA METODOLOGÍA DE PARTICIÓN ESPECTRAL	13
4.2.2 RESEÑA HISTÓRICA DE LOS MÉTODOS DE PARTICIÓN	13
4.3 CARACTERÍSTICAS DEL CLIMA DE OLEAJE EN CHILE	14
5. METODOLOGÍA	16
5.1 MÉTODOS DE PARTICIÓN	16
5.1.1 ENERGÍA TOTAL	16
5.1.2 PARTICIÓN DEL DOMINIO ESPECTRAL POR CUADRANTES	17
5.1.3 PARTICIÓN DEL DOMINIO ESPECTRAL POR SECTORES	18
5.1.4 PARTICIÓN MULTIMODAL	20
5.2 ALGORITMO DE PARTICIÓN MULTIMODAL	22
5.2.1 AISLAMIENTO DEL PEAK DE ENERGÍA ESPECTRAL	22
5.2.2 IDENTIFICAR Y COMBINAR LOS PEAK ESPECTRALES QUE SON COMUNES	22
5.2.3 REMOCIÓN DE PARTICIONES CON ENERGÍAS BAJAS	24
5.2.4 CÁLCULO DE ESTADÍSTICAS PARA CADA PARTICIÓN	24
5.2.5 DESCRIPCIÓN GENERAL DEL ALGORITMO PARTICIONADOR	24
6. RESULTADOS DE PARTICIONES	26
6.1 ENERGÍA TOTAL	26
6.2 PARTICIÓN DEL DOMINIO ESPECTRAL POR CUADRANTES	28
6.3 PARTICIÓN DEL DOMINIO ESPECTRAL POR SECTORES	29
6.4 PARTICIÓN MULTIMODAL	31

6.5	DISCUSIÓN: ANÁLISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS INTENSIDAD DE PERÍODOS -----	34
6.5.1	<i>ENERGÍA TOTAL VERSUS PARTICIONES POR CUADRANTES</i> -----	34
6.5.2	<i>ENERGÍA TOTAL VERSUS PARTICIONES POR SECTORES</i> -----	36
6.5.3	<i>ENERGÍA TOTAL VERSUS PARTICIÓN MULTIMODAL</i> -----	38
6.5.4	<i>PARTICIÓN POR SECTORES VERSUS MULTIMODAL</i> -----	40
7.	ANÁLISIS DE VALORES EXTREMOS EN EL NODO VALPARAÍSO -----	43
7.1	LISTA DE MAYORES TORMENTAS -----	44
7.1.1	<i>COMPARACIÓN DE SELECCIÓN DE TORMENTAS</i> -----	47
7.2	ANÁLISIS DE VALORES EXTREMOS DE TORMENTAS -----	50
7.2.1	<i>TERCER CUADRANTE</i> -----	50
7.2.2	<i>CUARTO CUADRANTE</i> -----	52
7.2.3	<i>RESUMEN</i> -----	54
7.3	DISCUSIÓN: RESULTADOS DE ANÁLISIS DE VALORES EXTREMOS -----	56
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES -----	58
8.1	CONCLUSIONES -----	58
8.2	RECOMENDACIONES PARA INGENIERÍA -----	59
9.	REFERENCIAS -----	60
ANEXO 1: ALGORITMO PARTICIONADOR DE ESPECTROS		
ANEXO 2: CONTROL DE CALIDAD Y ANÁLISIS DE ERROR		
ANEXO 3: ANÁLISIS DEL CARÁCTER MULTIMODAL		

Lista de tablas

TABLA 5.1:	SECTORES IDENTIFICADOS POR LA INSPECCIÓN VISUAL. -----	19
TABLA 5.2:	RESUMEN DE METODOLOGÍAS. -----	21
TABLA 5.3:	PARÁMETROS UTILIZADOS PARA LA IDENTIFICACIÓN DE SISTEMAS DE OLEAJE Y REMOCIÓN DE ENERGÍAS. -----	25
TABLA 6.1:	CRITERIOS DE SEPARACIÓN. -----	32
TABLA 7.1:	RESUMEN DE PARÁMETROS DE DISTRIBUCIÓN UTILIZADOS. -----	43
TABLA 7.2:	SELECCIÓN DE MAYORES TORMENTAS DE ACUERDO A LA ENERGÍA TOTAL Y EL MÉTODO DE PARTICIÓN DEL DOMINIO ESPECTRAL POR CUADRANTES. -----	44
TABLA 7.3:	SELECCIÓN DE MAYORES TORMENTAS DE ACUERDO AL MÉTODO DE PARTICIÓN DEL DOMINIO ESPECTRAL POR SECTORES. -----	45
TABLA 7.4:	SELECCIÓN DE MAYORES TORMENTAS DE ACUERDO AL MÉTODO DE PARTICIÓN ESPECTRAL MULTIMODAL. -----	46
TABLA 7.5:	COMPARACIÓN DE SELECCIÓN DE TORMENTAS OBTENIDAS POR LA ENERGÍA TOTAL Y EL MÉTODO DE PARTICIÓN POR CUADRANTES. -----	48
TABLA 7.6:	COMPARACIÓN DE LA SELECCIÓN DE TORMENTAS ENTRE LOS RESULTADOS DE LA PARTICIÓN DEL DOMINIO ESPECTRAL POR SECTORES Y LA PARTICIÓN DEL DOMINIO ESPECTRAL MULTIMODAL. ---	49
TABLA 7.7:	RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE VALORES EXTREMOS NODO VALPARAÍSO. ENERGÍA TOTAL Y PARTICIÓN DEL DOMINIO ESPECTRAL POR CUADRANTES. EL CÁLCULO SUPERIOR E INFERIOR INDICA LA BANDA DE CONFIANZA — + 2 DESVIACIONES ESTÁNDAR. -----	54

TABLA 7.8: RESULTADOS DEL ANÁLISIS DE VALORES EXTREMOS NODO VALPARAÍSO. PARTICIÓN DEL DOMINIO ESPECTRAL POR SECTORES Y PARTICIÓN MULTIMODAL. EL CÁLCULO SUPERIOR E INFERIOR INDICA LA BANDA DE CONFIANZA $- + 2$ DESVIACIONES ESTÁNDAR. -----	55
---	----

Lista de figuras

FIGURA 1: EJEMPLOS DE ESPECTROS UNI-MODAL (A), BI-MODAL (B) Y TRI-MODAL (C).-----	1
FIGURA 2: EJEMPLO DE RECONSTRUCCIÓN ESPECTRAL. -----	3
FIGURA 3: POSICIÓN GEOGRÁFICAS NODO VALPARAÍSO. -----	4
FIGURA 4: ÁREA DE COBERTURA DE OLAS DEL PACÍFICO. -----	6
FIGURA 5: PUNTOS DE VALIDACIÓN OLAS DEL PACÍFICO. -----	7
FIGURA 6: GRÁFICO DE VALIDACIÓN DE HMO DE OLAS DEL PACÍFICO VS. TOPEX EN VALPARAÍSO. -----	8
FIGURA 7: COMPARACIÓN DE LAS SERIES DE TIEMPO, OLAS DEL PACÍFICO VS MEDICIONES DE LA BOYA TRIAXYS EN VALPARAÍSO. -----	9
FIGURA 8: PROCEDIMIENTO GENERAL PARA EL DISEÑO DE OLEAJE EXTREMO. -----	11
FIGURA 9: COMPARACIÓN ENTRE LAS SERIES SELECCIONADAS AM Y POT PARA UN PERIODO COMPRENDIDO ENTRE 1980 Y 1984. -----	12
FIGURA 10: PROCESO PARA DETERMINAR EL OLEAJE EXTREMO O DE DISEÑO. FUENTE: ELABORACIÓN PROPIA. -----	13
FIGURA 11: ENERGÍA TOTAL CONSIDERADA PARA LA ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS DE RESÚMENES. -----	17
FIGURA 12: EJEMPLO DE PARTICIÓN ESPECTRAL (POR CUADRANTE) APLICADA A CADA ESTADO DE MAR DEL NODO VALPARAÍSO. -----	17
FIGURA 13: ROSA DE INTENSIDAD DE PERÍODO DEL NODO VALPARAÍSO. -----	19
FIGURA 14: EJEMPLO DE PARTICIÓN ESPECTRAL (POR SECTORES) APLICADA A CADA ESTADO DE MAR DEL NODO VALPARAÍSO. -----	19
FIGURA 15: EJEMPLO DE PARTICIÓN ESPECTRAL MULTIMODAL APLICADO A UN ESTADO DE MAR DEL NODO VALPARAÍSO. -----	20
FIGURA 16: EJEMPLO DE PARTICIÓN ESPECTRAL. LA DIRECCIÓN DE LAS FLECHAS INDICA EL CAMINO DE MAYOR PENDIENTE. -----	22
FIGURA 17: ROSA DE INTENSIDAD NODO VALPARAÍSO – ENERGÍA TOTAL. CONSIDERO TODOS LOS ESTADOS DE MAR DE LA BASE DE DATOS.-----	26
FIGURA 18: EJEMPLOS DE ENERGÍAS OCULTAS AL CONSIDERAR EL CÁLCULO DE LOS PARÁMETROS DE RESÚMENES CON LA ENERGÍA TOTAL DEL ESPECTRO. -----	27
FIGURA 19: RESULTADOS DE LA PARTICIÓN DEL DOMINIO ESPECTRAL POR CUADRANTES, NODO VALPARAÍSO. CONSIDERO TODOS LOS ESTADOS DE MAR DE LA BASE DE DATOS.-----	28
FIGURA 20: RESULTADOS DE LA PARTICIÓN DEL DOMINIO ESPECTRAL POR SECTORES, NODO VALPARAÍSO. CONSIDERO TODOS LOS ESTADOS DE MAR DE LA BASE DE DATOS. -----	30
FIGURA 21: ROSA DE INTENSIDAD DE PUNTO DE PERIODO PEAK EN FUNCIÓN DE LA DIRECCIÓN PEAK PARA LOS 30 AÑOS DE DATOS DE VALPARAÍSO. CONSIDERANDO TODAS LAS LISTAS DE PARTICIONES OBTENIDAS.-----	31
FIGURA 22: RESULTADOS DE AGRUPACIÓN POR PARTICIÓN MULTIMODAL, NODO VALPARAÍSO. A) SWELL REMOTO DEL NW Y B) SEA Y SWELL CERCANO DESDE EL NW AL S. -----	33
FIGURA 23: RESULTADOS DE AGRUPACIÓN POR PARTICIÓN MULTIMODAL, NODO VALPARAÍSO. A) SWELL REMOTO DEL SW Y W Y B) SEA - SWELL CERCANO DEL SW. -----	33
FIGURA 24: COMPARACIÓN ENTRE LA INTENSIDAD DE PERÍODOS DE LA ENERGÍA TOTAL (A) Y LOS RESULTADOS DE LAS PARTICIONES POR CUADRANTES (B) Y (C). -----	35
FIGURA 25: COMPARACIÓN ENTRE LA INTENSIDAD DE PERÍODOS DE LA ENERGÍA TOTAL (A) Y LOS RESULTADOS DE LAS PARTICIONES POR SECTORES (B), (C), (D) Y (E). -----	37
FIGURA 26: COMPARACIÓN ENTRE LA INTENSIDAD DE PERÍODOS DE LA ENERGÍA TOTAL (A) Y TODOS LOS RESULTADOS DE LA PARTICIÓN MULTIMODAL APLICADA A CADA ESPECTRO EN PARTICULAR (B). -	38

FIGURA 27: RESUMEN DE LAS AGRUPACIONES DE LOS SISTEMAS DE OLEAJES DETERMINADOS POR EL MÉTODO DE PARTICIÓN MULTIMODAL. -----	39
FIGURA 28: COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE INTENSIDAD DE PERIODOS PARA EL SWELL REMOTO DEL SW Y W. -----	40
FIGURA 29: COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE INTENSIDAD DE PERIODOS PARA ÉL SEA Y SWELL CERCANO DEL SW. -----	41
FIGURA 30: COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE INTENSIDAD DE PERIODOS PARA ÉL SWELL REMOTO DEL NW. -----	41
FIGURA 31: COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE INTENSIDAD DE PERIODOS PARA ÉL SEA Y SWELL CERCANO DEL NW A S. -----	42
FIGURA 32: COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE ALTURA EXTREMAS EN FUNCIÓN DE PERÍODOS DE RETORNOS PARA OLEAJES REMOTOS DEL TERCER CUADRANTE. BASADOS EN OLAS DE 1980 A 2009. -----	50
FIGURA 33: COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE ALTURA EXTREMAS EN FUNCIÓN DE PERÍODOS DE RETORNOS PARA OLEAJES CERCANOS DEL TERCER CUADRANTE. BASADOS EN OLAS DE 1980 A 2009. -----	51
FIGURA 34: COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE ALTURA EXTREMAS EN FUNCIÓN DE PERÍODOS DE RETORNOS PARA OLEAJES REMOTOS DEL CUARTO CUADRANTE. BASADOS EN OLAS DE 1980 A 2009. -----	52
FIGURA 35: COMPARACIÓN DE RESULTADOS DE ALTURA EXTREMAS EN FUNCIÓN DE PERÍODOS DE RETORNOS PARA OLEAJES CERCANOS DEL CUARTO CUADRANTE. BASADOS EN OLAS DE 1980 A 2009. -----	53