INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

C A R A C T E R I Z A C I Ó N D E L
O L E A J E A P L I C A D A A T U X P A N ,
V E R A C R U Z

T E S I S
P A R A O B T E N E R E L G R A D O D E
M A E S T R O E N C I E N C I A S C O N E S P E C I A L I D A D E N H I D R Á U L I C A

P R E S E N T A :
V I C T O R R O S A L E S S I E R R A

Agradecimientos

Gracias a Coral por su amor y paciencia mientras me dedicaba a trabajar en esta tesis.

A mis padres por darme todo su cariño.

A mis hermanos, cuñados y sobrinos por su confianza.

A mis amigos por los buenos momentos.

Mi mayor agradecimiento en este trabajo es, por supuesto, para el Dr. Rodolfo Silva Casarín por haber dirigido esta tesis con gran paciencia y al M. en C. J. Roberto Ruiz y Zurvia Flores por su co-dirección y revisión.

También, a los miembros del consejo de revisión: M. en C. Miguel A. Vergara Sánchez, M. en C. Lucio Fragoso Sandoval y Dr. Juan M. Navarro Pineda, por sus valiosos comentarios y aportaciones a este trabajo.

De manera muy especial al Ing. J. Carlos Sánchez Linares, Jefe del Departamento de Oceanografía de la CFE, y al Ing. José Antonio maza Alvarez, Gerente de estudios de Ingeniería Civil de la CFE, por haberme permitido utilizar parte la información de la C. T. Adolfo López Mateos para esta tesis.

A mi amigo Andrés Esquivel por sus consejos sobre estilo y redacción.

Al Instituto Politécnico Nacional y a mis profesores por la formación profesional que recibí.

Al CONACyT por su apoyo.

ÍNDICE

RESUMEN	V
ABSTRACT	VI
LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABLAS	IX
LISTA DE SÍMBOLOS.....	X
I. INTRODUCCIÓN	1
I.1. ANTECEDENTES	2
I.2. JUSTIFICACIÓN	5
I.3. OBJETIVOS	7
I.4. CONTENIDO Y ORGANIZACIÓN DE ESTA TESIS	8
II. GENERALIDADES DEL OLEAJE.....	9
II.1. INTRODUCCIÓN	9
II.2. TIPOS DE OLEAJE	10
II.3. PARÁMETROS DE CARACTERIZACIÓN	13
II.4. EL OLEAJE COMO PROCESO ESTOCÁSTICO	19
II.5. EL OLEAJE COMO PROCESO ESTACIONARIO	22
II.6. EL OLEAJE COMO PROCESO ERGÓDICO	23
II.7. MODELO ESTADÍSTICO MATEMÁTICO DEL OLEAJE	27
II.8. RESUMEN	32
III. ANÁLISIS ESTADÍSTICO TEMPORAL DEL OLEAJE	33
III.1. DEFINICIÓN DE UN ESTADO DE MAR	33
III.2. DESCRIPCIÓN ESTADÍSTICA DE UN ESTADO DE MAR	34
III.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE UN ESTADO DE MAR	43
III.4. RESUMEN	60
IV. ANÁLISIS ESPECTRAL DEL OLEAJE	61
IV.1. METODOLOGÍA PARA EL ANÁLISIS ESPECTRAL	61
IV.2. PARÁMETROS ESPECTRALES	68
IV.3. MODELOS ESPECTRALES DE UN ESTADO DE MAR	70
IV.4. RESUMEN	77
V. APLICACIÓN	79
V.1. ÁREA DE ESTUDIO: TUXPAN, VERACRUZ	79
V.2. PARÁMETROS ESTADÍSTICOS	81
V.3. PARÁMETROS ESPECTRALES	92
V.4. MODIFICACIÓN A FORMULACIONES ESPECTRALES.	99
V.5. COMPARACIÓN DE OLEAJE MEDIDO CON OTRAS FUENTES INDIRECTAS	104
V.6. RECOMENDACIONES PARA LAS MEDICIONES CON EQUIPO AUTÓNOMO	110
V.7. RESUMEN	116
VI. CONCLUSIONES	117
VI.1. CONCLUSIONES	117
VI.2. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO	119
BIBLIOGRAFÍA	121

GLOSARIO	125
ANEXO 1. ECUACIONES DE MOVIMIENTO DE FLUIDOS IDEALES	127
ANEXO 2. CONVERSIÓN DE REGISTROS CRUDOS DE OLÓMETROS AUTÓNOMOS PACER A SERIES DE TIEMPO	129
ANEXO 3. CALCULO DE ESPECTRO DE ENERGÍA UTILIZANDO EL ANÁLISIS DE FOURIER	137

RESUMEN

En este trabajo se revisan los criterios para el análisis estadístico temporal y espectral del oleaje, mismos que son aplicados para la caracterización del oleaje en Tuxpan, Ver. En cuanto al análisis estadístico temporal, se comparan las distribuciones teóricas de probabilidad de altura de Rayleigh, Tayfun y Carter; y las de periodo de Bretchneider, Cavanié y Longuet-Higgins contra las resultantes de las mediciones en campo. Por otro lado y concerniente al análisis en el dominio de la frecuencia, se comparan los espectros teóricos de Bretchneider-Mitsuyasu, Jonswap-Hasselmann, Pierson-Moscowitz, Neumann, ITTC, ISSC, TMA y Ochi-Hubble con el que se obtiene de los datos de Tuxpan, y se proponen algunas modificaciones a algunos espectros para que se acoplen mejor al derivado de las mediciones. Finalmente se hacen algunas recomendaciones para mejorar la adquisición y procesamiento de datos, y por ende los resultados de estos.

De los resultados más importantes de este estudio, se destaca que la distribución de probabilidad de altura de ola de Tayfun es la que mejor se ajusta a los datos de Tuxpan, y la distribución de probabilidad de Cavanié es la que mejor se acopla a los periodos de ola.

En el caso del análisis espectral se encuentra que el espectro de Bretchneider modificado por Mitsuyasu es el que mejor se acopla al espectro procedente de los datos de Tuxpan.

En el caso del análisis estadístico temporal, se recomienda corregir el nivel medio de la superficie libre del mar utilizando una aproximación de tipo parabólico para eliminar el efecto de marea y ondas de largo periodo dentro de los registros de oleaje. Para el cálculo individual de las olas se empleó el método de cruces por cero.

ABSTRACT

In this work, the criteria for the Wave temporal and spectral statistical analysis were reviewed. These analyses are applied to the site Tuxpan, Veracruz, in the Mexican Gulf coast. In the temporal statistic analysis, the high (Rayleigh, Tayfun and Carter) and period (Bretchneider, Cavanié and Longuet-Higgins) theoretic probability distributions are compared with field data from Tuxpan. By the other hand, in the frequency domain analysis, theoretic spectrums (Bretchneider-Mitsuyasu, Jonswap-Hasselmann, Pierson-Moscowitz, Neumann, ITTC, ISSC, TMA and Ochi-Hubble) are compared with the one obtained from Tuxpan measurements, then changes are made to some spectrums in order to better couple to field data. Finally, some recommendations are made to improve the Wave data acquisition and analysis process methods.

From the study results, it's important to mention that the Tayfun high probability distribution and the Cavanié period probability distribution better fit Tuxpan field data.

In the spectral analysis, the Bretchneider spectrum, modified by Mitsuyasu, better coupled to the spectrum obtained from Tuxpan field data.

In the temporal statistical analysis, correct the mean level using the parabolic approximation, in order to eliminate the tidal and long period wave effects, is recommended. For the registered individual wave calculus the zero up cross method was used.

LISTA DE FIGURAS

Figura II.2-1 Clasificación de las ondas (Munk - Kinsman)	11
Figura II.2-2 Oleaje SEA (local).....	12
Figura II.2-3 Oleaje SWELL (distante).....	12
Figura II.3-1 Definición de ondas progresivas moviéndose en la dirección x , c = celeridad, α es la amplitud de la ola H	14
Figura II.3-2 Definición de ondas progresivas moviéndose en distintas direcciones	16
Figura II.3-3 Estructura de oleaje aleatorio (Pierson et al., 1958)	18
Figura II.6-1 Definición de un conjunto de procesos aleatorios	24
Figura II.7-1 Principios y procedimiento de predicción de oleaje aleatorio (revisado del Seakeeping Symposium, Ochi, 1973)	31
Figura III.1-1 Registros de oleaje medidos en Tuxpan, Ver. en época normal y de tormenta	33
Figura III.2-1 Nivel medio calculado con los tres métodos para el registro del 28/09/95 00:00	37
Figura III.2-2 Nivel medio calculado con los tres métodos para el registro del 29/09/95 09:00	37
Figura III.2-3 Descripción del método de cruces por cero con un registro real	38
Figura III.3-1 Distribuciones normales de probabilidad de registros medidos en Tuxpan, Ver	44
Figura III.3-2 Distribución de probabilidad de excedencia de altura de ola normal	49
Figura III.3-3 Distribución de probabilidades de excedencia de altura de ola de Tormenta.	50
Figura III.3-4 Distribuciones conjuntas de probabilidad altura - periodo de ola correspondientes al registro 28/09/95 00:00	55
Figura III.3-5 Distribuciones conjuntas de probabilidad altura - periodo de ola correspondientes al registro 29/09/95 09:00	56
Figura III.3-6 Distribución de probabilidades de excedencia de periodo de ola normal	58
Figura III.3-7 Distribución de probabilidades de excedencia de periodo de ola de Tormenta	59
Figura IV.1-1 Aplicación de ventanas filtro (trapezio y coseno) a la señal de oleaje normal	64
Figura IV.1-2 Comparación de señal original de oleaje normal y transformada inversa de Fourier	66
Figura IV.1-3 Comparación de señal original de oleaje de tormenta y transformada inversa de Fourier	66
Figura IV.1-4 Espectro de oleaje medido normal y de Tormenta	68
Figura IV.3-1 Espectro de oleaje normal y espectros teóricos calculados	75
Figura V.1-1 Batimetría frente a las costas de Tuxpan, Veracruz	80
Figura V.2-1 Variación de la altura y periodo de ola significativa obtenida estadísticamente	82
Figura V.2-2 Variación del número de olas por muestra de oleaje	83
Figura V.2-3 Correlación de $H1/10$ de datos medidos contra datos teóricos propuestos por Carter	84
Figura V.2-4 Correlación de $H1/10$ de datos medidos contra datos teóricos propuestos por Rayleigh	85
Figura V.2-5 Correlación de $H1/10$ de datos medidos contra datos teóricos propuestos por Tayfun	86
Figura V.2-6 Rosa de oleaje y resumen de referencias cruzadas de altura y periodo de ola significativa correspondientes al periodo del 19/07/94 15:00 al 2/10/95 3:00	91
Figura V.3-1 Variación de la altura y periodo de ola significativa obtenida del espectro de energía	92
Figura V.3-2 Correlación de ola significativa estadística contra espectral	93
Figura V.3-3 Variación de la anchura espectral (épsilon y nu)	94
Figura V.3-4 Correlación de anchura espectral épsilon contra nu	95
Figura V.3-5 Espectros medidos promediados por estación y periodo anual	96
Figura V.3-6 Comparación de espectro anual contra espectros teóricos	98
Figura V.4-1 Correlación de periodo significativo (T_s) y periodo pico (T_p)	99
Figura V.4-2 Correlación de periodo medio (T_z) y periodo pico (T_p)	100
Figura V.4-3 Comparación de espectro anual contra espectros teóricos modificados	103
Figura V.5-1 Transformación del oleaje Sea and Swell, dirección 45N	105
Figura V.5-2 Transformación del oleaje Sea and Swell, dirección 90N.	106
Figura V.5-3 Transformación del oleaje Sea and Swell, dirección 135N	106
Figura V.5-4 Transformación del oleaje Ocean Wave Statistics, dirección 30N	107
Figura V.5-5 Transformación del oleaje Ocean Wave Statistics, dirección 60N	107
Figura V.5-6 Transformación del oleaje Ocean Wave Statistics, dirección 90N	108

Figura V.5-7 Transformación del oleaje Ocean Wave Statistics, dirección 120N108
Figura V.6-1 Señal de oleaje con diferentes intervalos de muestreo112
Figura V.6-2 Distribución de alturas de ola con diferentes intervalos de muestreo113

LISTA DE TABLAS

Tabla III.2-1	Parámetros estadísticos de los registros de ejemplo	42
Tabla V.2-1	Referencias cruzadas de altura contra periodo de ola significativa (dirección N a ENE)	87
Tabla V.2-2	Referencias cruzadas de altura contra periodo de ola significativa (dirección E a SSE)	88
Tabla V.2-3	Referencias cruzadas de altura contra periodo de ola significativa (dirección S a OSO)	89
Tabla V.2-4	Referencias cruzadas de altura contra periodo de ola significativa (dirección O a NNO)	90
Tabla V.3-1	Parámetros espectrales por estación y periodo anual (general)	97
Tabla V.5-1	Diferencias de características de oleaje medidas y obtenidas de fuentes indirectas	109
Tabla V.6-1	Diferencias de características de oleaje variando el intervalo de muestreo	112

LISTA DE SÍMBOLOS

a	amplitud de onda
A	variable aleatoria compleja
A_k	coeficiente de Fourier
$b_1(t^*)$	ventana tipo trapecoide
$b_2(t^*)$	ventana tipo coseno
B_k	coeficiente de Fourier
C	celeridad
E	operador de esperanza matemática
$Erfc$	función de error complementaria
f	frecuencia
$\bar{f}$	frecuencia media
f_c	frecuencia de Nyquist
f_p	frecuencia pico
g	aceleración de la gravedad
h	profundidad
H	altura de ola
$\bar{H}$	altura de ola media
H_{m0}	altura de ola a partir del momento de orden cero
H_{rms}	altura de ola cuadrática media
$H_s=H_{1/3}$	altura de ola significativa
J_0	función de Bessel de orden cero
k	número de onda
L	longitud de onda
m_n	momento espectral de orden n
N	número de elementos en una muestra
Q_p	agudeza del pico espectral
$P(H)$	función de distribución de alturas de ola
$P(T)$	función de distribución de periodos de ola
$P(H,T)$	función de distribución conjunta de alturas y periodos de ola
$R(\tau)$	transformada de Fourier
$S(f)$	función de densidad espectral
Skw	falta de oblicuidad o simetría
t	tiempo
T	periodo
$\bar{T}$	periodo medio
T_p	periodo pico
T_z	periodo medio obtenido mediante cruces por cero
$T_{1/3}$	periodo de ola significativa
U_{10}	velocidad del viento a 10 msnmm
x	coordenada en el eje de las abscisas
y	coordenada en el eje de las ordenadas
z	coordenada vertical
ϕ	potencial de velocidades

β	factor de corrección si se aplican ventanas como filtro
β_i	variable aleatoria
ε	anchura espectral dependiente de momentos: 0, 2 y 4
$\phi(\sigma)$	función de distribución espectral
η	elevación de la superficie libre
$\bar{\eta}$	nivel medio de la superficie libre del agua
λ_j	parámetro de forma espectral
ν	anchura espectral dependiente de momentos: 0, 1 y 2
π	constante 3.1416
θ	ángulo de incidencia
ρ	densidad del fluido
σ	frecuencia angular
$\tau_i(t)$	realización de una muestra
Δt	intervalo de tiempo
Δf	intervalo de frecuencia
∞	infinito
W	ubicación de olómetro