

I. Introducción

El oleaje es el fenómeno principal a considerar en estudios y diseños de ingeniería marítima, ya que éste es el que aporta los mayores esfuerzos actuantes sobre las obras costeras. Se define el oleaje como una sucesión de ondas u olas sobre una superficie de agua que, en principio, su origen se debe a la transferencia de energía del viento a la superficie del agua, para luego propagarse hasta alcanzar tierra. El oleaje se clasifica dentro de las ondas de gravedad como las más energéticas generadas por el viento.

Los métodos para analizar el oleaje se dividen en el método estadístico temporal y el método espectral mismos que se describen en esta tesis.

El análisis estadístico temporal utiliza el método de cruces por cero para separar cada ola del tren (muestra) que se ha medido. Este tren, de longitud finita, es un conjunto de olas medidas en un lapso determinado de tiempo y representa un estado de mar. Con este análisis se pueden identificar las distribuciones de probabilidad de las características predominantes del oleaje como la altura de ola y el periodo.

Por otro lado, el análisis espectral nos permite conocer las características del oleaje por medio de un análisis en el dominio de la frecuencia. Dado que el oleaje que es una señal compleja, puede analizarse como un espectro de energía de diferentes frecuencias y así, estimar sus características. Para este análisis se hace uso del concepto de *transformada de Fourier*.

La importancia de comparar las herramientas teóricas con los datos medidos nos permitirá evaluar la eficiencia de cada una de estas herramientas para tener un criterio más amplio al momento de decidir cual de ellas utilizar.

1.1. Antecedentes

El Instituto Politécnico Nacional, como proveedor de tecnología para México, motiva la propuesta de solución para obtener el máximo aprovechamiento de la información de oleaje disponible para el diseño de obras marítimas, que es el problema al que los técnicos se enfrentan en su desarrollo profesional; ésta es mi experiencia personal de cinco años de trabajo en la CFE.

La necesidad de construir obras marítimas más seguras y económicas ha motivado a estimar las características del oleaje con mayor aproximación a la realidad, por lo que se han desarrollado diferentes métodos, como los empíricos, matemáticos y estadísticos, para definir dichas características.

La generación de ondas sobre una superficie de agua por viento y su propagación resultante ha sido, sin duda, observada a través de la historia. Sin embargo, la formulación matemática del movimiento del oleaje tuvo que esperar hasta el siglo XIX. En 1802, el matemático Gerstner, publicó en Praga la teoría trocoidal del oleaje para olas en aguas profundas, y en 1844 Airy, en Inglaterra, desarrolló una teoría de ondas de pequeña amplitud cubriendo el rango completo de aguas profundas a aguas someras. Después, en 1847, Stokes estableció una teoría de ondas de amplitud finita en aguas profundas, la cual, posteriormente, se extendió a aguas intermedias. Esta teoría es ahora conocida como la teoría del oleaje. La existencia de una onda solitaria con una sola cresta que se propaga sin cambio de forma en aguas someras, fue descubierta por Russell en 1844; su descripción teórica fue dada por Boussinesq en 1871, y en forma independiente por Rayleigh en 1876. Más tarde, en 1895, Korteweg y De Vries derivaron una teoría de olas periódicas permanentes de amplitud finita en aguas someras, la cual se conoce hoy en día como la teoría Cnoidal de oleaje.

Aunque las teorías fundamentales del oleaje fueron establecidas al final del siglo XIX, pasaron muchas décadas antes de que los ingenieros civiles tuvieran la posibilidad de

hacer uso total de estas teorías en aplicaciones prácticas. Una excepción es la teoría de la presión del oleaje permanente descrita por Sainflou en 1928, ingeniero del Puerto de Marsella; este trabajo atrajo la atención de ingenieros portuarios poco después de su publicación, y la fórmula de presión de Sainflou fue adoptada en muchos países para el diseño de rompeolas verticales [Ref. 19].

Durante la segunda guerra mundial, la necesidad de información para la planeación de operaciones militares, para el desembarco de Normandía, estimuló el interés en la predicción de las características del oleaje. Los oceanógrafos H. U. Sverdrup¹ y W. H. Munk² [Ref. 48] combinaron relaciones teóricas y empíricas para desarrollar un método de previsión³ de altura de ola significativa (el promedio del tercio más alto de alturas de un tren de olas). Después, este método fue utilizado para localizar mejores rutas marítimas [Ref. 2]. Poco más tarde esta teoría mejoró para convertirse en el método SMB, desarrollado por Sverdrup, Munk y Bretchneider quienes entendieron claramente que las olas están compuestas por varias ondas largas y pequeñas. El concepto de altura de ola significativa se basa en la comprensión del oleaje como un proceso aleatorio. Sin embargo, este concepto ha sido algunas veces malentendido al representar olas de altura y periodo constantes. La teoría de oleaje monocromático y los resultados experimentales obtenidos con un tren de olas regulares, frecuentemente han sido aplicados directamente a problemas reales, bajo la suposición de que el oleaje regular corresponde exactamente a la altura significativa.

El concepto de representación espectral del oleaje en el dominio de la frecuencia fue introducido por Neumann en 1953 [Ref. 31] y Pierson en 1954 [Ref. 34]. Ulteriormente, Pierce llevó a cabo trabajos de investigación fundados en el análisis estocástico de las ondas oceánicas.

¹ Harald Ulrik Sverdrup, (Nov. 15, 1888, Sogndal, Nor.--. Ago. 21, 1957, Oslo) Explico las corrientes ecuatoriales y ayudó a desarrollar el método de predicción de oleaje rompiente.

² Walter Heinrich Munk, (Am. Geofísico y oceanógrafo)

³ Se utiliza la palabra **previsión** como traducción del término en inglés *hindcasting*

Los estudios de Rice (1944 -1945), determinaron las relaciones analíticas existentes entre energía espectral y probabilidad de amplitud de onda en un proceso gaussiano aleatorio, aplicado al campo de las comunicaciones; sin embargo, con este trabajo y a través de un análisis espectral fue posible evaluar los diferentes parámetros (periodo y altura de onda) característicos de un mar aleatorio.

El primer estudio de las características de la altura de ola de un registro de oleaje, fue realizado en 1952 por Longuet-Higgins [Ref. 27], quien introdujo los siguientes conceptos de previsión:

- Oleaje direccional
- Oleaje de banda ancha
- Oleaje no gaussiano
- Oleaje no lineal
- Distribución conjunta de periodos y alturas.

Por otra parte, St. Denis [Ref. 46] y Pierson establecieron en 1953 un enfoque estocástico para ondas aleatorias. A estas investigaciones siguieron las de Walden en 1964 y las de Hogben y Lumb en 1967.

En las últimas décadas se ha incrementado los trabajos, sobre todo de aplicación; sin embargo, no tomando en cuenta los de Pierson (1955), Borgman (1972) y Battjes (1977), son pocos los que tratan de modelos estadísticos y estocásticos.

Es importante tomar en cuenta el desarrollo tecnológico en materia de oleaje, para aplicarlo a México, que, como muchos otros países, tiene carencias de información. Es necesario aprovechar adecuadamente todas las fuentes de investigación, como las que se han descrito anteriormente, para avanzar en el conocimiento del oleaje de los mares de nuestro país.

1.2. Justificación

México se encuentra situado en el norte del Continente Americano, en el hemisferio occidental, hacia el oeste del meridiano de Greenwich con coordenadas geográficas entre los meridianos 118° 27' 24" y 86° 42' 36" O y entre los paralelos 32° 43' 06" N y 14° 31' 54".

La extensión territorial del país es de 1'964,381.7 km², con una superficie continental de 1'959,248.3 km² y una insular de 5,133.4 km²; esta extensión lo ubica en el decimocuarto lugar entre los países del mundo con mayor territorio.

México colinda en su parte norte con los Estados Unidos de América, a lo largo de una frontera de 3,152.2 Km, y al sureste con Guatemala y Belice con una frontera conjunta de 1,149.2 Km de extensión; la longitud de sus costas continentales es de 11,122.5 Km. [Ref. 23].

Del total del litoral mexicano, el 28% pertenece al Golfo y al mar Caribe y el 72%, al Pacífico. Las aguas territoriales suman casi tres millones de kilómetros cuadrados. Sobre la línea costera se encuentran alrededor de 130 lagunas que cubren 15,000 km² [Ref. 23].

Las actividades marítimas del territorio mexicano se concentran en:

a) 45 puertos de variadas dimensiones de los cuales sólo 21 tienen capacidad para el tráfico de altura (al extranjero), por donde se realiza el 80% de las exportaciones de productos mexicanos. Este porcentaje debe incrementarse en el futuro con el fin de satisfacer las demandas y compromisos como aquellos que se han establecido en el tratado de libre comercio con EU, Canadá y otros países de América Latina [Ref. 28].

b) La Secretaría del Medio ambiente, Recursos Naturales y Pesca (SEMARNAP) está llevando a cabo un programa para el mejoramiento de lagunas en todo el país.

c) La industria petrolera es el principal elemento de la economía mexicana. En el año de 1995 se extrajeron diariamente 2'685,000 barriles, por lo que la explotación de los campos petrolíferos costa afuera van adquiriendo una importancia cada vez más creciente.

d) La Comisión federal de Electricidad (CFE) cuenta actualmente con más de 6 centrales termoeléctricas y una nucleoelectrica para la generación de energía en las costas de México. Esta demanda va en aumento.

e) En las últimas décadas, el turismo se ha incrementado notablemente. El fondo nacional de Turismo (FONATUR) cuenta actualmente con cinco centros turísticos en las costas y ha promovido otros siete. También se han construido 44 marinas, actualmente en operación.

Por lo anterior, y considerando que México no cuenta con información sistemática del oleaje en su litoral, se hace necesario impulsar y desarrollar investigaciones más profundas sobre el fenómeno del oleaje que permitan contar con herramientas para ejecutar proyectos y construir estructuras más seguras y menos costosas, lo que justifica la elaboración del presente trabajo.

1.3. Objetivos

Los objetivos de esta tesis son:

a) Identificar las características más importantes del oleaje, su tipo de espectro y su distribución de probabilidad de altura y periodo de ola a partir de las mediciones realizadas en las costas de Tuxpan, Veracruz.

b) Comparar los resultados de las mediciones con los métodos tradicionales de predicción de las características de ola y presentar sus diferencias.

c) Recomendar los criterios que hayan resultado más adecuados para mejorar los métodos utilizados para la obtención y procesamiento de registros de oleaje con equipo autónomo.

La metodología empleada para lograr los objetivos es la siguiente:

- Recopilación bibliográfica de los principales trabajos de análisis de señales de oleaje y el marco teórico que gobierna las leyes de la dinámica del oleaje.
- Definición del método estadístico temporal para el análisis de señales y comparación de distribuciones de probabilidad de altura y periodo de ola así como de la conjunción de ambos.
- Descripción del método para análisis de señales en el dominio de la frecuencia (espectral) y comparación de formulaciones espectrales.
- Aplicación de los métodos expuestos a los datos medidos en Tuxpan, Ver. y comparación de resultados teóricos contra medidos.
- Conclusiones del estudio.

1.4. Contenido y organización de esta tesis

CAPÍTULO I

Introducción al tema, definición de los objetivos, antecedentes y justificación del estudio.

CAPÍTULO II

Se describen las generalidades del oleaje; se detallan los tipos de oleaje que existen, sus parámetros característicos; se define la física que gobierna el fenómeno del oleaje, y se analiza el oleaje como un proceso estocástico, estacionario y ergódico que satisface las condiciones de asimetría y compatibilidad.

CAPÍTULO III

Se presentan los distintos modelos de caracterización estadística del oleaje para altura y periodo de ola más la probabilidad conjunta de ambos.

CAPÍTULO IV

Se tipifica el análisis espectral del oleaje, mediante el cual se pueden definir las características de éste en función de su energía

CAPÍTULO V

Se comparan las distribuciones de probabilidad, teóricas contra medidas, de alturas, periodos y conjunción de los dos; asimismo, se cotejan los espectros teóricos con los medidos y se propone un método de registro y procesamiento de registros de oleaje medidos con equipo autónomo.

CAPÍTULO VI

Se concluyen y presentan los resultados del estudio y se recomienda el desarrollo de futuros trabajos para continuar con el avance en el conocimiento del oleaje en México.

I. INTRODUCCIÓN	1
I.1. ANTECEDENTES	2
I.2. JUSTIFICACIÓN.....	5
I.3. OBJETIVOS	7
I.4. CONTENIDO Y ORGANIZACIÓN DE ESTA TESIS	8