

Índice general

I	Propiedades físicas del agua de mar	15
1.	La Oceanografía	17
1.1.	Introducción	17
1.2.	El surgimiento de la Oceanografía	17
1.3.	Las escalas en Oceanografía	19
1.4.	La Ingeniería Naval y la Oceanografía Física	20
2.	Propiedades físicas del agua de mar	21
2.1.	La estructura molecular del agua	21
2.2.	Presión	22
2.3.	Salinidad	23
2.3.1.	Factores que afectan a la salinidad	24
2.4.	Temperatura	25
2.5.	Densidad	28
2.6.	Diagramas TS	30
2.7.	Estabilidad	31
2.8.	La velocidad del sonido	33
2.9.	Anexos de cálculo	34
2.9.1.	Temperatura potencial	34
2.9.2.	La Ecuación de Estado del Agua de Mar	35
II	Mareas	39
3.	Conceptos de Astronomía	41
3.1.	Círculos grandes y círculos pequeños	41
3.2.	Coordenadas esféricas polares	43
3.3.	La ley del coseno en trigonometría esférica	44
3.4.	Coordenadas Ecuatoriales	45
3.5.	Tiempos	46
4.	Marea astronómica	49
4.1.	La marea de equilibrio	50
4.2.	El Potencial de Marea	54
4.2.1.	La fuerza de marea y el potencial asociado	56
4.2.2.	Expresión en coordenadas ecuatoriales horarias: coeficientes geodésicos y de perturbación	61
4.2.3.	El potencial de Doodson	66



4.2.4.	El potencial de Cartwright, Tayler y Edden	69
4.2.5.	Otros desarrollos	69
5.	Análisis y predicción	73
5.1.	Preparación de los datos	73
5.2.	Mínimos cuadrados	76
5.2.1.	La representación de las corrientes	79
5.3.	Las ondas de marea	82
5.4.	Predicción	83
5.4.1.	El datum y referencias en marea vertical	83
5.4.2.	La predicción armónica	86
5.5.	Anexos de cálculo	86
5.5.1.	Mínimos cuadrados	86
5.5.2.	Programas de análisis de mareas	87
6.	Energía mareomotriz	89
6.1.	Energía	89
6.2.	Potencia en un fluido oscilatorio	90
6.3.	Vector de transmisión de energía	93
6.4.	Marea y fricción	94
6.5.	Fuente de datos	94
6.6.	La central mareomotriz	95
6.7.	Turbinas	95
6.8.	Un caso práctico	97
III	Corrientes	103
7.	Corrientes sin fricción	105
7.1.	Introducción	105
7.2.	Movimiento inercial	106
7.3.	Corrientes geostróficas	107
7.3.1.	Geopotencial	107
7.3.2.	El modelo de corrientes geostróficas	108
8.	Corrientes con fricción	113
8.1.	Introducción	113
8.2.	La solución de Ekman	113
8.2.1.	La importancia de la solución de Ekman	118
8.3.	La solución de Sverdrup	119
8.3.1.	Aplicación de la Ecuación de Sverdrup	120
IV	Oleaje	123
9.	La onda de Airy	125
9.1.	Introducción	125
9.2.	Hipótesis de partida	125
9.3.	Las ecuaciones del movimiento	126
9.4.	Condiciones de contorno	127
9.4.1.	Condiciones cinemáticas	127

9.4.2. Condición dinámica	128
9.5. Potencial de velocidades	128
9.6. Resumen	130
9.7. Hipótesis adicionales y reformulación de las condiciones de contorno	130
9.8. Solución a la ecuación de Laplace	131
9.9. Parámetros de la onda	135
9.10. Aproximaciones asintóticas	135
9.11. Campo de velocidades	136
9.12. Trayectoria de las partículas	137
9.13. Campo de presiones	137
9.14. Energía y propagación de energía	137
10. Teorías de orden superior	139
10.1. Introducción	139
10.2. La elección de teoría	139
10.3. Teoría de Stokes II	140
10.4. Onda Cnoidal y solitaria	142
10.5. Uso de las teorías	143
11. Fenómenos del oleaje	145
11.1. Introducción	145
11.2. Generación del oleaje	145
11.3. Refracción y asomeramiento	146
11.4. Difracción	148
11.5. Rotura del oleaje	149
12. Análisis espectral	153
12.1. La FAC y el espectro	153
12.2. Análisis de registros	156
12.3. Parametrización	158
12.4. Espectro direccional	159
12.5. Anexo de cálculo	161
13. Análisis estadístico	167
13.1. Procesos estocásticos	167
13.1.1. Ergodicidad, estacionariedad y homogeneidad en oleaje .	170
13.2. A corto plazo	170
13.2.1. Análisis estadístico	171
13.3. Análisis a largo plazo: extremos	178

Prólogo

Oceanografía es el nombre general que se da al estudio científico y sistemático de los océanos. La primera parte del nombre deriva de *Okéano*, el río que rodeaba la tierra conocida por los griegos. La segunda parte del nombre, (*grafía*), significa literalmente *descripción*. En los últimos tiempos se emplea también Oceanología, cambiando *grafía* por *logos*, conocimiento, pero con el mismo significado. Históricamente se divide por grandes disciplinas en Física, Biológica, Química y Geológica. Este libro se dedica a la Oceanografía Física orientada hacia los propósitos de la Ingeniería Naval y Oceánica.

La necesidad del conocimiento del mar y sus procesos, la Oceanografía, por parte del Ingeniero Naval y Oceánico es indiscutible y el nexo entre ambas es indivisible. No solamente porque es el medio en el que se desarrollan los proyectos en Ingeniería Naval, sino también por la necesidad del Ingeniero Naval y Oceánico de poder verificar sus competencias y trabajar con profesionales de otras ramas del conocimiento y de la empresa. En una sociedad que demanda cada vez más verdaderos expertos en los distintos campos con la capacidad de interactuar los unos con los otros, es donde el Ingeniero Naval y Oceánico debe mejorar su preparación.

Desde el punto de vista físico, entender y separar las escalas de los movimientos en el océano es fundamental en la Ingeniería. Así, cuando el movimiento de las aguas se debe a las variaciones del campo gravitatorio debidas al movimiento de los astros, principalmente Luna y Sol respecto a la Tierra, se habla de marea astronómica. La escala de tiempo práctica de las mareas va desde pocas horas hasta 18,6 años. Cuando las subidas y bajadas alternas del nivel del mar se deben a fenómenos meteorológicos se habla de marea meteorológica y su escala de tiempo es de horas a días, superponiéndose a la astronómica. Suele ser complicado separar ambos efectos. El oleaje actúa en escalas temporales mucho menores. Se tiene desde la mar de viento, con períodos de 1 s a 6 s, hasta el oleaje debido a temporales con períodos de 6 s hasta más de 12 s. Hay oleajes que son singulares y que se observan en la confluencia de grandes corrientes como los que se dan en el cabo de Buena Esperanza, en donde chocan la Corriente Circumpolar Antártica y la Corriente de Agulhas (de las Agujas) produciendo olas gigantes, con el consiguiente peligro para los buques que navegan en la zona. Otros movimientos del agua, debidos a causas geológicas, con repercusiones costeras gravísimas son los maremotos, llamados también *tsunamis* (palabra japonesa para *ondas de puerto*).

El texto comienza por describir con cierto detalle las propiedades físicas del agua de mar para sintetizar su análisis en la ecuación de estado y en los diagramas Temperatura-Salinidad. Naturalmente, la estructura de la columna de agua y su estabilidad son tratadas a continuación. Esto reviste cierta importan-

cia en el diseño de las operaciones relacionadas con plataformas petrolíferas. De la misma manera, la distribución de las propiedades físicas del agua de mar son importantes ya que los materiales de muchos buques son elegidos en función del rango de latitudes en el que va a trabajar, siendo muy distintos los requerimientos de un buque con capacidad polar de los que trabajarán en, por ejemplo, $\pm 30^\circ$ de latitud.

La segunda parte presta atención a las mareas y a las corrientes. El tratamiento de la fuerza de marea se hace de forma estricta desde un punto de vista físico-matemático y sin salir del marco de la Mecánica Clásica. Los conceptos astronómicos necesarios se presentan justo antes. El objetivo es llegar al desarrollo del Potencial Generador de Marea y a la explicación de alguno de los catálogos de marea al uso en Oceanografía. En este sentido la Geodesia Física es mucho más rica y la Oceanografía Física no se puede separar de ésta en lo que respecta a la Teoría de Mareas. Se aborda el análisis y la predicción de las mareas y de las corrientes desde la única fuente válida posible, el conocimiento del Potencial Generador de Mareas. Es conveniente la descripción precisa de filtros que eliminan la marea de las series temporales y que dejan ver otros efectos que ésta enmascara. Por otro lado, las corrientes son tratadas igual que las mareas cuando se consideran componente a componente, combinando al final los resultados que se obtienen para llegar a la elipse de corrientes, cuyos parámetros son deducidos elegante y formalmente. Todos estos conocimientos son la base para poder atacar el problema de la marea como fuente de energía. La teoría de su explotación con fines energéticos es expuesta en detalle, dando indicaciones de cómo se deben hacer los cálculos relacionados.

La tercera parte está dedicada a describir las corrientes que no son de naturaleza astronómica. De entre todos los modelos destacan el modelo de Ekman, que explica los afloramientos, y el modelo básico de Sverdrup para explicar el esquema general de corrientes que se observa en los océanos. Sin embargo, como el que debe tener más interés para el Ingeniero Naval y Oceánico es el de Ekman, se desarrolla con cierta atención, esbozando solamente el de Sverdrup, sin menospreciar los de Stommel y Munk, que se escapan al objetivo de este libro.

La cuarta parte está dedicada al oleaje. Los modelos teóricos de ondas de amplitud finita más importantes son el modelo de onda lineal de Airy, válido en la mayoría de los casos, los modelos casi-lineales de Stokes (con Stokes II suele ser suficiente) y el modelo de onda Cnoidal con su correspondiente aproximación a la onda solitaria, válido en el proceso de aproximación final y rotura y en la descripción de los *tsunamis*. Se presentan con rigor los métodos espectrales para el estudio del oleaje. Es usual encontrar procedimientos en la Ingeniería que dependen de la parametrización del espectro de energía del oleaje. Los métodos estadísticos para el estudio del oleaje se detallan extensamente y se dan definiciones e indicaciones sobre cómo calcularlos a partir de un registro de datos. La parte final se dedica al régimen de temporales que es el procedimiento que da como resultado la altura de ola de cálculo, el parámetro necesario para el dimensionamiento de una obra o estructura en contacto con el medio marino.

El texto está pensado para cubrir parte del temario de las asignaturas Oceanografía, Ingeniería Oceánica y Descripción de Buques y Artefactos para la Explotación de Recursos Marinos Minerales y Energéticos en el Máster en Ingeniería Naval y Oceánica de la Universidad de Cádiz. Surge, innegablemente, por la necesidad de tener un texto lo más unificado posible. Tal necesidad se ha visto cubierta desde que dos de los autores dan clase y dos las han recibido

en el Máster en Ingeniería Naval y Oceánica de la Universidad de Cádiz. Sin embargo, los lectores potenciales son estudiantes de Máster o profesionales de la Ingeniería Naval y Oceánica, de Ingeniería Civil, de las Ciencias Marinas y de Ciencias Físico-Matemáticas que deseen un aproximación desde un punto de vista físico-matemático a algunos de los fenómenos que gobiernan la dinámica marina. Se ha procurado incluir el material que se ha considerado básico para un Ingeniero Naval y Oceánico, así que se han tenido que cometer omisiones, dando más importancia a unos temas que a otros.

Muchas de las referencias que se han incluido son fáciles de conseguir, incluso hay material disponible en la web para los que los autores han renunciado a sus derechos y pueden ser descargados gratuitamente. El texto no es original, no presenta material novedoso. Un libro de texto sobre una materia tan desarrollada no puede tener partes originales. Aún así, se han referenciado todas las fuentes consultadas a lo largo del mismo.

Cada parte de este libro termina con un capítulo, no numerado, titulado *Reflexiones*. Ahí se concentran los ejemplos, descripciones y aplicaciones, así como la explicación de la necesidad del Ingeniero Naval de conocer los conocimientos expuestos. Lógicamente, es conveniente estudiar con detenimiento cada capítulo para poder comprender el alcance de las reflexiones.

Este libro ha sido elaborado empleando exclusivamente herramientas libres. Se ha usado L^AT_EX como programador de textos, *Gimp* para procesar imágenes y las gráficas científicas se han elaborado usando la versión libre de *QtiPlot*. Siempre bajo Linux. Se han incluido algunos códigos de programación. Para ello se ha recurrido al más que clásico FORTRAN, pero con compiladores gratuitos para todos los sistemas operativos. Es interesante que el lector estudie el uso de los índices en los distintos códigos y que se compare éste con la formulación de las expresiones que resuelven. En futuras ediciones se incluirán códigos en otros lenguajes.

Los autores desean agradecer al Dr. Ingeniero Naval D. José María de Viña la lectura atenta y su crítica sincera al manuscrito, lo que sin lugar a dudas lo ha mejorado. A D. Jesús Alonso, Decano Territorial del Colegio Oficial de Ingenieros Navales en Andalucía por su crítica y su ayuda para aclarar el texto original. De la misma manera, a los revisores anónimos que han analizado el texto, lo que ha supuesto una mejora sustancial en aspectos que todos pensábamos que estaban claros.

Entonces, estimado lector, antes de que comiences el estudio te rogamos indulgencia ante los errores que encuentres sabiendo que solamente hay cuatro responsables.

J. Alonso, J. Vidal, G. Piñero y F. Quesada

*Este libro está dedicado a nuestras familias,
con quienes siempre estamos en deuda*