

José Antonio Aláez Zazurca

**COMPORTAMIENTO DEL
BUQUE EN LA MAR**

30 de Marzo de 1995

EL EXCMO. SR. D. JOSÉ ANTONIO ALÁEZ ZAZURCA, ES DOCTOR INGENIERO NAVAL, CATEDRÁTICO DE UNIVERSIDAD, CONTRALMIRANTE-DIRECTOR DEL CANAL DE EXPERIENCIAS HIDRODINÁMICAS DE EL PARDO, PRESIDENTE DE LA E.T.T.C.

Es para mí un gran honor haber sido invitado a dar una conferencia en esta Cátedra «Jorge Juan» dedicada a la memoria de uno de los más grandes científicos de nuestra Patria. Jorge Juan fue sin duda un buen representante de esos hombres que perteneciendo a los ejércitos prestaron un apoyo inestimable al desarrollo intelectual y material de España. Es preciso recordar que allá por el siglo XVIII cuando se produjo la transformación del espíritu científico el estado tuvo que apoyarse en el ejército y la marina para vencer las enormes dificultades que la mayoría de las instituciones presentaban al reformismo intelectual. El resultado fue que a lo largo del siglo XVIII, la práctica totalidad de las actividades científicas estuvieron vinculadas a los ejércitos. No deja, por menos, de ser curioso comprobar que en el momento en que las necesidades económicas, comerciales y sociales impulsan el desarrollo tecnológico, puesto que las militares han perdido parte de su preponderancia sean los miembros de las fuerzas armadas quienes lo dirijan. Pues bien Jorge Juan fue uno de ellos y como hombre de la Ilustración su buen hacer se extendió a muchos campos, aunque para nosotros tenga la gloria añadida de haber sido el que introdujo la profesión de ingeniero naval en España. Su libro *Examen Marítimo* demuestra que sus conocimientos eran comparables a los de los más eminentes sabios de la época, y en cierta medida sentó las bases de los futuros estudios del comportamiento del buque en la mar.

INTRODUCCIÓN

Durante muchos años los barcos se han proyectado para que tuvieran el mejor comportamiento posible en aguas tranquilas, es decir era la velocidad en una mar en calma la que definía sus principales características hidrodinámicas. Sin embargo la experiencia ha demostrado que las

predicciones en aguas tranquilas rara vez responden a la realidad, ya que en pocas ocasiones se navega en esa clase de mar. Además, aunque así fuera, la degradación que sufre el comportamiento de un barco cuando está sometido a la acción de las olas -debido a los movimientos y cargas que inducen- obligaría a estudiar lo que le sucedería en su presencia.

A pesar de esta recomendación pocas veces hasta ahora se ha analizado, en la fase de proyecto, la capacidad de un barco para negociar la mar. En primer lugar porque todavía no se tiene experiencia suficiente sobre los procedimientos de modificar las formas de un barco de manera que, mejorando el comportamiento en la mar¹, no se empeoren otras características hidrodinámicas u operacionales. Faltan además criterios prácticos que permitan conocer de antemano lo que le va a suceder a una embarcación cuando esté navegando en una mar agitada. Ciertamente es que en los últimos años la situación ha mejorado, y que al menos para buques de guerra ya se han establecido ciertas normas: los valores de la aceleración vertical en algunos puntos, los de los ángulos de balance y cabezada, o el número de pantocazos o de embarques de agua por hora son algunos ejemplos. Sin embargo estos criterios sólo se pueden comprobar en el barco ya construido. Hacen falta muchas más pruebas de mar y ensayos con modelos a escala reducida, para que la experiencia así adquirida sirva de guía práctica en los comienzos del proyecto.

Un poco de historia

Aunque el interés por estudiar lo que le sucede a un buque en una mar real, es decir con olas, sea relativamente reciente hubo ya en otros tiempos voces reclamando embarcaciones capaces de aguantar la mar. En una carta que Lord Nelson envió al Almirantazgo Británico mientras estaba manteniendo el sitio de Tolón decía: «If I am to watch the French I must be at sea; and if at sea must have bad weather; and if the ships are not fit to

¹ Una, en mi opinión, buena definición de lo que se entiende por el comportamiento en la mar de un buque es la que lo considera: «como la capacidad de cualquier embarcación de realizar bien y sin peligro los cometidos para los que ha sido concebido, aunque las condiciones de mar y viento sean adversas».

stand bad weather, they are useless².» (Si tengo que vigilar a los franceses debo estar en la mar; y en la mar hace mal tiempo; y si los barcos no son capaces de soportar el mal tiempo, no sirven para nada). Ciertamente es que Nelson se refería más a que la lejanía de sus bases naturales le impedía contar con buques en perfecto estado, que a los inconvenientes que el estado de la mar le planteaba; sin embargo lo que sí dejaba patente es que no eran útiles si por las razones que fueran no eran capaces de aguantar la mar.

Hasta mediados del siglo XIX poca atención se había prestado a la hidrodinámica del buque. Durante el siglo XVIII, gracias al trabajo de algunos eminentes científicos entre los que se encontraba D. Jorge Juan, se habían sentado las bases de la teoría matemática de la Arquitectura Naval estableciéndose los principios fundamentales. Aunque algún interés había existido antes, todo comenzó en 1748 cuando la Academia de Ciencias de Berlín propuso como tema para la concesión del premio de 1750, la teoría de la resistencia de los fluidos. Producto de esta convocatoria fue el trabajo de D'Alambert «Essai d'une Nouvelle Theorie de la Resistance des Fluides», que aunque no obtuvo el premio contiene la primera descripción del campo creado por un fluido en movimiento. En él está enunciada su famosa paradoja según la cual un cuerpo sumergido en un fluido perfecto³ no experimenta ninguna clase de resistencia al movimiento. Es también a partir de esa fecha que la Academia de Ciencias de París propone con relativa frecuencia a los sabios de todo el mundo estudios relacionados con la Arquitectura Naval. Surge por entonces Euler a quien muchos consideran el verdadero padre de la hidrodinámica⁴. Su labor con relación a ella es comparable a la de Newton con la mecánica. Supo reunir ideas en aparieren-

² Bryant, A., *Nelson*, p. 91, Fontana Books, 1972.

³ Se considera que un fluido es ideal o perfecto cuando no tiene viscosidad y es incompresible.

⁴ Aunque *Hidrodinámica* fue el título que Daniel Bernoulli le dio al tratado que publicó en 1738, lo que en él se analizaba estaba más cercano a la hidráulica tradicional y a la hidrostática que a la hidrodinámica clásica. No parece justo, sólo por haber utilizado esa palabra, darle a Bernoulli un mérito que en lo relativo a la hidrodinámica no tiene. Si lo tiene, y mucho, en otros campos. Ver Rouse, H., e Ince, S., *History of hydraulics*, pág. 95, Dover Publications, Inc., Nueva York, 1963.

cia inconexas y darles unidad, lo que no es más que la base fundamental para el progreso científico. Junto a sus múltiples trabajos en casi todas las ramas de la ciencia de aquella época, publicó su famoso tratado de arquitectura naval *Scientia Navalis* que con el de Bouguer *Traité du navire, de sa construction et de ses mouvements* constituyó la base del famoso *Examen Marítimo* publicado en 1771 por el español Jorge Juan. Un examen de la bibliografía posterior muestra que a partir de 1800 los trabajos de hidrodinámica del buque se multiplican y especializan. Aparecen también estudios sobre las olas cuyo punto de partida es sin duda la *Theorie der Wellen* publicada por F. Gerstner en 1804 y en el que se enuncia la teoría de la ola trocoidal. A pesar de estos y de otros estudios que a lo largo del siglo XIX se fueron publicando, los buques se seguían construyendo en función de la experiencia, de poco o nada servía la teoría. Tal vez la razón principal era, y aún casi lo sigue siendo en estos momentos, la dificultad de resolver teóricamente los problemas que los barcos plantean; tan grave es la situación que ni aún ahora con procedimientos de cálculo excelentes pueden llegarse a soluciones prácticas partiendo de las ecuaciones que definen los problemas.

El empleo creciente de la propulsión mecánica y el del hierro para construir el casco cambió el panorama. Conocer de antemano la velocidad que iba a dar un buque no era sólo una curiosidad científica, se había convertido en una necesidad práctica. Hasta entonces navegar era una peligrosa aventura. Allá por los siglos XVII y XVIII en la travesía a las Américas se perdía uno de cada cinco barcos⁵ que lo intentaba; sin llegar a esos extremos lo cierto es que se zarpaba y no se sabía con exactitud cuando se llegaba. La propulsión mecánica permitió el establecimiento de líneas regulares, al no depender la velocidad del buque de una fuerza, en gran medida imprevisible, como es la del viento. Ya se podía intentar predecir la duración del viaje. Sin embargo para hacerlo era preciso instalar la maquinaria adecuada a la velocidad que se pretendía que desarrollase la embarcación. Era, por tanto, necesario idear algún procedimiento de conocer de

⁵ Pike, D., *The challenge of the Atlantic*, pág. 34, Patrick Stephens, Northamptonshire, Inglaterra.

antemano su resistencia al avance. El desarrollo científico de la época hacía la tarea más sencilla ya que poco a poco se iban mejorando los conocimientos sobre los fenómenos que intervienen en el comportamiento hidrodinámico de los buques.

Los estudios fueron multiplicándose aunque no se analizaban por igual todas las características hidrodinámicas del buque. De los seis posibles movimientos que puede realizar, algo se había estudiado sobre la resistencia al avance, poco sobre el balance y la cabezada, menos sobre el gobierno y nada sobre el resto. Allá por 1860 las cuestiones teóricas más importantes que ocupaban la atención de la arquitectura naval eran las relacionadas con las formas y la resistencia y las circunstancias que afectaban al balance y la cabezada⁶. Luego empezó a analizarse la maniobrabilidad. Aunque siempre con la dificultad de aplicar directamente la teoría a la resolución de problemas prácticos, la hidrodinámica había dejado de ser algo desconocido. Esto no quiere decir, ni mucho menos, que la teoría fuera ya capaz de resolver los problemas sin embargo fue un importante paso avante. De este período fueron los trabajos de Navier, Reech, Scott Russell, Rankine, Lord Kelvin y desde un punto de vista más práctico W. Froude que al enunciar su famosa ley de comparación abrió las puertas a la moderna experimentación. El éxito práctico del método de Froude, puesto que conduce a un procedimiento posible del que se consiguen predicciones que se acercan a los resultados reales, fue en cierto punto culpable de que la teoría se abandonara un poco. No obstante el desarrollo teórico de la mecánica de fluidos siguió su curso y de él se aprovechó la hidrodinámica cuando necesitó de una mayor base científica. El nacimiento de la ciencia aeronáutica que hacía posible una de las más viejas aspiraciones del hombre, volar, fascinó a muchos científicos que abandonaron en parte la menos espectacular hidrodinámica. Se había navegado siempre y nadie dudaba de que se seguiría haciendo aunque no se supiera mucho más acerca de la ciencia naval. Sin embargo volar era algo nuevo y atrayente que, por fin, estaba al alcance de la mano y había que tratar de conseguirlo.

⁶ Woolley, J., «On the rolling of Ships». *Transactions of the Institution of Naval architects*, pág.3, vol. II, año 1861.

Cayeron en el olvido trabajos tan interesantes como el de Michell sobre la resistencia por formación de olas de un buque. Ya en este siglo, en la década de los veinte, gracias al impulso de científicos como sir Tomas Havelock y Ludwig Prandtl comenzó una nueva era para el estudio de la resistencia de un buque.

En lo que a los movimientos se refiere muchas vueltas se le había dado al balance pero los estudios no avanzaban todo lo rápido que se quería, no se obtenían resultados prácticos. Se tropezaba siempre en la misma piedra, había que suponer la forma de la superficie del mar pues no se sabía ni como era ni como representarla matemáticamente. En general las hipótesis eran que la embarcación se movía: o porque se forzaba el movimiento en una mar en calma, o por la acción de olas regulares. Esas eran las que tomaban Froude y Krylov, pioneros del estudio moderno de los movimientos del buque. Sin embargo casi nunca la superficie del mar es una ola regular, por lo que no es de extrañar que no les fuera posible encontrar soluciones numéricas en casos reales. Daban a la superficie del mar la forma de una senoide⁷ o de una trocoide⁸, líneas bastante diferentes de la que sigue la superficie de una mar agitada. Por otra parte las olas, a pesar de su aparente uniformidad, nunca se repiten. Cierto es que a una elevación le sucede una depresión, pero siempre tienen algo diferente; quizás en

⁷ La imagen real más parecida a la de una ola senoide es la de una ola de pequeña altura que se mueve en aguas muy profundas. Cuando la altura de una regular es grande la forma no se puede sustituir por la de una senoide, aunque en ocasiones se pueda aproximar por la suma de varias del mismo período.

⁸ El perfil de la ola trocoide corresponde al de la trocoide que es la curva engendrada por un punto situado en el radio de un círculo que rueda sobre una recta. A pesar de que en la realidad la forma de las olas de gran amplitud se parece bastante a la de la trocoide, matemáticamente nunca se le ha tenido mucha consideración por ser el flujo que define rotacional cuando debería ser, por suponer que el fluido es ideal y perfecto, irrotacional. Esto significa que la ola no podría desarrollarse a partir de una situación de reposo inicial. Sin embargo, suponiendo que la ola ya está formada, la teoría de la ola trocoide es correcta dando, en algunos casos, una buena aproximación a la realidad. La teoría de la ola trocoide se debe a Franz Josef von Gerstner (1756-1832), quien tomó como punto de partida la existencia de una serie de superficies de igual presión situadas en la superficie y a diferentes profundidades. Rouse e Ince obra citada en la nota 3, págs. 109-112.

ello descansa su gran atracción. Frecuentemente la mar es confusa llegando las olas de todas partes, aunque, dentro de la confusión casi siempre existe una dirección predominante. Fue precisamente la complejidad de los registros⁹ de la superficie del mar lo que, a finales del siglo XIX, hizo escribir a Lord Rayleigh¹⁰ que «aparentemente la principal ley que sigue la mar, es que no sigue ninguna».

Y no es que no hubiera necesidad de hacer estudios. Se perdían muchos barcos y había un gran interés en saber las causas, aunque sólo se vislumbrara como abordar, y no del todo, los movimientos de balance. El blindaje de los cascos y las pesadas torres de los barcos de guerra, acarrearban un considerable aumento de pesos. Para ahorrarlo se disminuía el francobordo, sin medir muy bien las consecuencias. Aunque por esas fechas ya se conocía la teoría de la estabilidad transversal, no había todavía ningún procedimiento de calcularla cuando el buque se escoraba un ángulo grande, por lo que se desconocía la importancia del francobordo en esos casos. Cuando en 1870 el acorazado británico *Captain* se hundió en una moderada tormenta se atribuyó el desastre al par escorante producido por las velas unido a una incorrecta estimación de pesos en el proyecto y al escaso francobordo. Voces había descargando de culpa al francobordo y aunque el balance seguía siendo la principal preocupación, se empezaban a tener en cuenta otros aspectos de la acción de la mar. La discusión sobre la altura del francobordo en los buques de guerra siguió, aunque algunos opinaran que la masa de agua embarcada en cubierta amortiguaba el balance. Poco a poco, sin embargo, los hechos demostraron que si se aumentaba el francobordo en especial a proa el barco embarcaba menos agua. Los proyectos iban poco a poco teniendo en cuenta la influencia del comporta-

⁹ Un registro es la representación gráfica de los valores de las elevaciones o depresiones de la superficie del mar en un punto o en una zona determinada, en función del tiempo o de la distancia. Generalmente es en función del tiempo; para obtener una imagen fidedigna de la realidad conviene que las medidas se tomen durante 20 ó 30 minutos, con intervalos de 1 a 3 horas, durante 1 ó 2 años. Existen también medidas en puntos diferentes en el mismo instante de tiempo para lo que se usan técnicas fotográficas.

¹⁰ Citado por O., M., Philips en : *The dynamics of the upper ocean*, pág. 3, Cambridge University Press, 1966.

miento en la mar, aunque no se contara todavía con una base teórica o experimental sólida, y muchas de las conclusiones estuvieran equivocadas. El aumento del agua embarcada en los buques de guerra alemanes de la serie Narvik, se achacó a un aumento en el ángulo de cabezada producido por el montaje de una torre doble de cañones de 5,9 pulgadas en el castillo de proa. Eso significaba añadir 50 toneladas bien a proa en un buque de 3000 toneladas de desplazamiento. Estudios modernos han demostrado que, navegando a 20 nudos y en una mar 5 (altura significativa de ola 3,25), la instalación de la batería modificaba el ángulo de cabeceo una insignificancia de 2,60° a 2,62°. Sin embargo reducía el francobordo de 6 m. a 5,78 lo que aumentaba la probabilidad de embarque de agua al doble de un 0,76% a un 1,2%, lo que sí justificaba el aumento apreciable del agua embarcada¹¹.

En 1953 dio comienzo la época moderna de los estudios del comportamiento en la mar. En un famoso trabajo publicado en ese año Manley St. Denis y J. Pierson¹² apoyándose en trabajos anteriores¹³ consiguieron ordenar la aparente confusión de la superficie del mar, sentando las bases para calcular los movimientos de un buque. Al contrario de lo que decía Lord Rayleigh demostraron que la superficie del mar puede describirse matemáticamente de modo muy preciso, aunque eso sí estadísticamente.

Acción de las olas.

Las olas son siempre un obstáculo, y a veces hasta un grave peligro, para la navegación. Su existencia marca la principal diferencia entre el proyecto de una estructura marina, sea móvil o fija, y el de cualquier otra

¹¹ Brown, D., K., *Weather and warship; past, present and future*. International Conference on Seakeeping and Weather, Londres, 1995.

¹² St. Denis, M., y Pierson, W., J., «On the motions of ships in confused seas», *Transactions of The Society of Naval Architects and Marine Engineers*, págs. 280-357, Volumen 61, año 1953.

¹³ En 1952 Pierson, que era metereólogo, fue capaz de aplicar las teorías que Rice, Tukey y Hamming habían empleado en la teoría de las comunicaciones al estudio de las olas reales. Analizando registros de olas consiguió dar una explicación lógica no sólo a la irregularidad de las olas sino que estableció las leyes que gobiernan el desarrollo de la superficie del mar.

situada en tierra; no hay fenómeno que influya más en la vida y comportamiento de los barcos que las olas. Esto es así, no sólo porque son capaces de zarandear, destrozar e incluso hundir cualquier embarcación por grande que sea, sino porque el propio barco al navegar va generando olas, mayores cuanto mayor es la velocidad, que frenan su avance

En la figura 1¹⁴ se han dibujado algunas de las difíciles situaciones en las que puede encontrarse una embarcación como resultado de la acción de la mar; movimientos exagerados, fuertes cargas (especialmente impactos), y abundante embarque de agua, son las consecuencias más peligrosas de esa acción. Todas ellas pueden llegar a comprometer seriamente la vida de la nave. Sin llegar a tan grave circunstancia se pueden producir otros efectos que de algún modo deterioran el comportamiento de la embarcación. Los movimientos, por ejemplo, reducen la capacidad de los equipos y sistemas, causan fatiga y malestar a los hombres, y aumentan la probabilidad de avería. A veces los movimientos del casco inducen otros, periódicos, en los líquidos encerrados en los tanques; cuando el período de excitación está cercano al del movimiento del fluido en el tanque, pueden aparecer fuerzas de gran magnitud, que hay que tener en cuenta en el proyecto. En cuanto a las cargas estructurales los fuertes golpes en el pantoque¹⁵

¹⁴ Faltinsen, O., M., *Sea loads on ships and offshore structures*, pág. 6, Cambridge University Press, 1990.

¹⁵ El movimiento que la mar induce en un buque, hace que, en ocasiones cuando las olas grandes, la proa o la popa se eleven por encima de la superficie del agua. Cuando el extremo de la embarcación vuelve a entrar en el agua se produce un impacto que será tanto mayor cuanto mayor sea la velocidad relativa entre la zona del casco de que se trate y la de la superficie del agua en ese punto. Al chocar se produce un repentino cambio de aceleración llegando a dar la impresión de que el barco se ha parado; algunos autores definen el slamming como el súbito cambio de aceleración del buque. La violencia del choque también depende de la resistencia que el casco ofrece al movimiento; por eso darle a la proa un cierto abanico (flare) hace la entrada más suave y disminuye la fuerza del impacto.

Para que se produzca slamming es preciso que el valor de la velocidad relativa de entrada en el agua supere un cierto valor que por, ejemplo, para buques de 520 piés de eslora varía entre 10 y 14,3 piés por segundo; en uno de ellos el valor mínimo que se midió fue 12,8 piés por segundo. La duración del exceso de presión que genera el slamming, para buques de las mismas características, oscila aproximadamente entre 0,08 y 0,12 segundos, aunque sobre la exactitud de estos valores existen fuertes dudas. Ver Jones, N., «Slamming damage», *Journal of Ship Research*, vol. 17, N° 2, Junio 1973, págs. 80-86.

(slamming), son las que más daños suelen causar. Son también las altas presiones asociadas con estos impactos el origen de daños locales; frecuentemente van seguidas de una vibración de alta frecuencia de toda la estructura del barco que se conoce como «whipping»¹⁶, y que dura de treinta segundos a un minuto dependiendo de la violencia del golpe. A veces la fuerza que liberan las olas al romper sobre la estructura de la embarcación puede también causar graves accidentes, llegando a ocasionar su pérdida. En barcos grandes los momentos flectores y de torsión, y las fuerzas a las que están sometidas las estructuras al moverse entre olas, son también considerables por lo que se les debe prestar una especial atención. De menor entidad son otros efectos como la pérdida involuntaria de velocidad, la disminución de estabilidad, o el «broaching»¹⁷.

Para mejorarlo es fundamental tratar de reducir los movimientos y las cargas inducidas por la mar. De esta manera se podrá mantener la velocidad, sea cual sea el estado de la mar, y se garantizará el que la embarcación pueda desempeñar los cometidos para los que ha sido concebida; la reducción en las cargas permitirá disminuir el peso de acero, ya que la estructura podrá ser más ligera, lo que abaratará el coste. Además, y esto es

¹⁶ En general el impacto que se produce al volver a entrar el casco en el agua se transmite a toda la estructura que actúa como una viga continua. El desplazamiento de la zona en la que la fuerza del impacto se aplica, hace que el barco-viga flexione; cuando trata de recuperar la posición inicial la rigidez de la estructura hace que la viga flexione en sentido contrario. El resultado es una vibración, que se transmite a lo largo de la eslora, que recuerda a la que se cuando una vara o un látigo se mueven rápidamente en el aire; de ahí debe provenir el nombre whipping con el que este fenómeno se conoce en inglés. Ver Saunders, H., S., *Hydrodynamic in ship design*, Volume III, pág. 297, SNAME, Nueva York, 1965.

¹⁷ Broaching, como whipping, es otra de las palabras de muy difícil traducción, de las que la ingeniería naval está salpicada. Consiste en el involuntario atravesamiento a la mar de la embarcación cuando navega con mar de popa o cercana a ella. La acción de la ola da origen a un par - que no puede ser contrarrestado por el pequeño que, por llevar la mar de popa, produce el timón - que tiende a colocarla paralela a las crestas por lo que, si las olas son grandes o rompientes, la embarcación puede correr peligro de perderse. También se llama broaching a la aparición repentina en la superficie del mar de un submarino que navega cercano a ella. Para más detalles ver Saunders, H., E., *Hydrodynamics in ship design*, Volume III, pág. 160, SNAME, Nueva York, 1965.

muy importante, la disminución de movimientos y cargas aumentará la seguridad del barco y de su tripulación. Por consiguiente cuando se quiere realizar un buen proyecto¹⁸, uno de los principales factores a tener en cuenta es la capacidad que la embarcación tiene para realizar su cometido en las condiciones de mar y tiempo -atmosférico- que es más probable que se encuentre en la zona por la que se espera tenga que navegar.

Tres son los procedimientos que tradicionalmente se emplean en la hidrodinámica del buque para averiguar los movimientos y las cargas que las olas inducen sobre los barcos: cálculos teóricos, ensayos con modelos geoméricamente semejantes, y pruebas con barcos reales. No cabe duda que el último de los tres, las pruebas con el barco real, es el que da los resultados más fiables. Sin embargo el conocimiento de la realidad llega tarde; una vez que el barco ya se ha construido no hay manera de modificar las formas del casco para mejorarlas, si es que las pruebas han demostrado que no son muy buenas. Además de ser caras, las pruebas de mar son difíciles de realizar en las condiciones que se desea; el estado de la mar es el que hay en el momento y lugar en el que se llevan a cabo, que puede no coincidir con el que se quisiera que hubiera¹⁹. Pensando en la embarcación que se acaba de construir la principal aplicación de las pruebas de mar es conocer como se comporta en la realidad. Sin embargo la utilidad de las pruebas de mar no se queda ahí, sirven también²⁰ para comprobar la validez de las predicciones realizadas tanto por la teoría como por la experimentación, y por consiguiente permiten ir mejorando poco a poco los procedimientos de la correlación modelo-buque. Además el conocimiento de lo que realmente sucede hace más sencillo establecer criterios fiables sobre algunos problemas concretos como pueden ser los daños que el mal

¹⁸ Lloyd, A., R., «Seakeeping, The Dynamics of Ships». Proceedings of a Royal Society Discussion Meeting mantenido el 28 y el 29 de Junio de 1990, págs. 67-78, Londres 1991.

¹⁹ El famoso LEWEX experimento (Labrador extreme waves experiment), llevado a cabo en aguas de la península del Labrador, se planeó para febrero- marzo esperando encontrar mares con olas de gran altura. Sin embargo ese año (1987) la mar fué mucho menos dura de lo que se esperaba. En cualquier caso los resultados del experimento fueron excelentes, y han marcado un hito en la investigación oceanográfica.

²⁰ Hutchinson, B., L., *Seakeeping studies: A status report*, SNAME Transactions, Vol. 98, 1990, págs. 263-317.

tiempo causa en las estructuras o la altura más conveniente de la amurada. Es posible que en el futuro puedan aplicarse a las pruebas de comportamiento en la mar de un buque las llamadas técnicas de identificación. Estas técnicas permiten resolver las ecuaciones diferenciales que gobiernan cualquier fenómeno específico, calculando previamente sus coeficientes. Hasta ahora sólo se han aplicado para determinar las características de maniobrabilidad y resistencia al avance.

Los ensayos con modelos geoméricamente semejantes permiten hacer pruebas sistemáticas, mediante las que se puede conocer la influencia de cada uno de los parámetros principales de la embarcación en sus características hidrodinámicas. Basta para ello construir varios modelos, en los que se han cambiado alguno de sus parámetros principales para poder valorar su influencia. El principal inconveniente de los ensayos con modelos geoméricamente semejantes es el procedimiento de extrapolación, es decir el modo de obtener lo que haría el barco real a partir de los resultados obtenidos probando un modelo de tamaño reducido. Para disminuir la influencia en los resultados de la diferencia en tamaño -lo que se conoce como efecto de escala-, conviene construir modelos grandes; los límites al tamaño vienen generalmente impuestos por el de las instalaciones en las que se van a efectuar los ensayos. A veces, para eliminar estas limitaciones y por consiguiente disminuir el efecto de escala, los modelos se ensayan en estanques naturales con el inconveniente que supone la pérdida del control de las condiciones ambientales.

En los últimos años, gracias al empleo de ordenadores de gran capacidad, muchos de los estudios relacionados con la hidrodinámica del buque se llevan a cabo resolviendo numéricamente las ecuaciones diferenciales que definen matemáticamente el problema de que se trate²¹. Estos

²¹ Fue Lagrange quien, en 1788, afirmó que podía determinarse completamente el movimiento de un fluido integrando, si es que era posible, las ecuaciones diferenciales que lo definen. Lagrange se refería a las ecuaciones del flujo potencial que habían sido establecidas por Euler en 1755. No se adelantó mucho en esa idea hasta que en 1945 Von Neumann propuso, al parecer por vez primera, usar el ordenador para integrar las ecuaciones de la mecánica de fluidos ya que la capacidad de cálculo había mejorado mucho y parecía posible encontrar soluciones matemáticas fiables.

métodos son baratos y fáciles de usar. Además pueden emplearse para calcular muchas alternativas, correspondiendo cada una a diferentes valores de las variables, lo que permite valorar su influencia en la fase de proyecto y por consiguiente seleccionar la que hubiera dado mejores resultados. El principal inconveniente de los programas para calcular las características hidrodinámicas de un buque por medio del ordenador, es la gran cantidad de simplificaciones que es preciso realizar para resolver las ecuaciones de manera que, en muchas ocasiones, la ecuación final no representa la realidad.

Representación de la superficie del mar

Para conocer la respuesta de un buque es preciso encontrar un procedimiento para representar matemáticamente la superficie del mar. Como se ha puesto de manifiesto a lo largo de este trabajo esto no ha sido una tarea fácil debido a que su característica más sobresaliente es la irregularidad. Un observador colocado en un punto fijo que la contemple sólo notará que a una cresta le sigue un seno pero tanto la amplitud como la frecuencia y la dirección de propagación varían de un momento a otro.

Durante los primeros tiempos de la navegación la gente de mar había desarrollado una escala que clasificaba y describía el estado de la mar en función de la velocidad del viento. En 1805 el almirante inglés Sir Francis Beaufort desarrolló un sistema numérico que se aplicaba a la escala que utilizaban los marineros. En 1903 la escala se modifica relacionando la velocidad del viento con los números de la escala por la fórmula²²:

$$U = 1,87 B^{3/2}$$

en la que U es la velocidad del viento en millas por hora y B es el número que le corresponde en la escala de Beaufort. Por esas fechas la escala de Beaufort era el único procedimiento de clasificar los estados de la mar. Desde entonces en todo el mundo se tomó como costumbre juzgar la fuerza del viento por el aspecto de la superficie del mar.

²² Khandekar, M., L., *Operational analysis and prediction of ocean wind waves*, págs. 43-67, Springer-Verlag Nueva York, Inc., 1989.

Los estudios más serios sobre las olas que se forman en la superficie del mar comenzaron durante la segunda guerra mundial como respuesta a la necesidad de predecir su estado antes de llevar a cabo una operación anfibia. En 1943 H. Sverdrup y W. Munk desarrollaron el primer procedimiento de hacerlo, en cumplimiento del encargo que el año anterior habían recibido de la marina norteamericana. Desgraciadamente los resultados fueron clasificados y no vieron la luz hasta 1947. Sverdrup y Munk utilizaron una descripción estadística introduciendo el concepto de la altura significativa de ola. Este parámetro se define como la media del tercio de olas de mayor altura presentes en el mar en un momento determinado. Representa la altura que un observador experimentado apreciará al estimar la altura de la ola en una dada condición de mar. El método de predicción de Sverdrup y Munk fue mejorado por Bretschneider después de analizar una gran cantidad de datos procedentes tanto de medidas en la mar como en laboratorio. Estas técnicas obtenían las características de una ola significativa, que es un parámetro estadístico, pero no tenían en cuenta el carácter espectral de la superficie del mar que las oscilaciones irregulares que mostraban los registros ponían de manifiesto. La representación espectral²³ de la superficie del mar en el campo de la frecuencia fue introducida por Neumann (1953), Pierson (1954) y James (1955). Del espectro²⁴ pueden deducirse todos los parámetros de las olas.

El origen de la representación espectral de la superficie del mar fue el análisis de los registros que era la única información disponible. Los registros no son más que historia, ya que dan sólo el comportamiento de la superficie del mar en el tiempo en el que se obtuvieron. Si se tomaran otros

²³ La idea de descomponer un complejo fenómeno físico en sus componentes individuales se debe a Newton, cuando descubrió que, por medio de un prisma, la luz del sol estaba formada por una serie de colores, que iban del rojo al violeta, cada uno con una longitud de onda distinta. El espectro indicaba como la intensidad de la luz variaba con respecto a la longitud de onda. Desde entonces la técnica espectral se ha aplicado a una gran cantidad de problemas físicos.

²⁴ El espectro de las olas es una función que describe matemáticamente la distribución del cuadrado de las alturas de las olas en función de las frecuencias. Como la energía potencial de las olas es función del cuadrado de su altura, al espectro de las olas se le suele llamar espectro de energía.

en lugares próximos al mismo tiempo o en el mismo lugar, después de transcurrido un breve intervalo de tiempo, el resultado sería completamente distinto. Dicho en términos sencillos ni el registro, ni una pequeña parte del mismo se repiten. No es por tanto más que una muestra de los que podría tenerse, pero es imprescindible aun así sacar de ellos conclusiones.

St. Denis y Pierson en su ya clásico trabajo citan algunos de los métodos propuestos para analizar un registro, y cómo el único aceptable es el que se basa en el análisis del espectro obtenido a partir de un modelo estadístico, representando la superficie del mar en términos de probabilidad. Si ni siquiera una parte del registro se repite, parece lógico pensar que la superficie del mar está distribuida al azar. Cuando los métodos determinísticos fallan no es arriesgado buscar la solución en términos de probabilidad. No debe sin embargo perder de vista que la representación que se establezca debe encerrar los mismos atributos que los que se dedujeran de otra, que se hubiera obtenido a partir de otro registro. Es decir hay que buscar, dentro de la aparente confusión, el principio que gobierna la mar. Para esto se hacen intervenir las causas físicas que gobiernan el fenómeno.

Las olas que se forman en la superficie del mar tienen muy variados orígenes basta alterar el equilibrio de la superficie de una mar en calma para iniciarlas. En ese instante entran en juego las fuerzas restauradoras que, al tratar de devolver el sistema a la forma inicial, dan origen a un proceso cuyo resultado son las olas. En el caso del comportamiento en la mar de un buque las olas están generadas por el viento. El mecanismo por el cual el viento hace crecer las olas no viene al caso y, sea cuál sea, lo que se produce es un traspaso de energía del aire al agua. No es difícil imaginar que cuanto más tiempo esté soplando el viento mayor será la ola. Cabe preguntarse si se podrá alcanzar un límite. Es decir si transcurrido un cierto tiempo, aunque el viento siga soplando las olas no aumentarán de tamaño. El límite es la pendiente de la ola -relación entre la altura y la longitud- cuyo máximo valor es $1/7$. Cuando las olas pequeñas exceden de ese valor se rompen; las olas largas aceptan más energía y crecen en altura más que las cortas cuando están sometidas al mismo viento. Por tanto según la superficie del mar va tomando energía del viento, las olas van haciéndose mayores, pudiendo así almacenar más energía. Nuevas olas se van formando sobre las de mayor longitud. De esta manera en la zona en la que el

viento se mueve a mayor velocidad que las olas hay un amplio espectro de longitudes de ola. Aunque el viento produce olas de muchas longitudes, las más cortas alcanzan la máxima altura rápidamente y se destruyen mientras que las más largas continúan creciendo. Una imagen simplificada del desarrollo de las olas en la zona en la que se generan está dibujada en la figura 2. De acuerdo con lo anterior se pueden distinguir dos zonas de estado de la mar: la que existe en el lugar en el que se está generando, que algunos llaman mar de viento, y la mar de fondo, que es la que hay una vez que las olas se han escapado de la influencia del viento que las ha originado. La mar de viento es más corta, las olas tienen más pendiente y es más confusa que la de fondo.

Los tres factores que más influyen en la energía que el viento transmite a las olas son la velocidad del viento, la longitud en la dirección de propagación del viento del área sobre la que ha estado soplando y el tiempo durante el cual lo ha estado haciendo. Para cada valor de la velocidad del viento hay una distancia y un tiempo mínimos para alcanzar un mar totalmente desarrollado. Aunque el viento siga soplando el estado de la mar no cambiará ya que la energía que toma de la atmósfera se disipa. Se concluye que la energía encerrada en las olas creadas por la acción del viento, y siempre que se cumplan ciertas condiciones, es constante. Es pues en ella en donde se puede encontrar el modo de normalizar la aparente confusión.

En términos sencillos lo anterior no es más que afirmar que la energía existente en un registro de olas tomado en un instante, es la misma que tendría otro tomado un instante después, siempre que se cumplieran ciertas condiciones. Ha llegado el momento de pensar en los parámetros estadísticos que caracterizan los registros y en su relación con la energía que es lo que define el fenómeno.

Se parte de una serie de registros tales como los de la figura 3, que no son más que un ejemplo de todos los posibles que hubieran podido obtenerse; es decir son realizaciones de una función aleatoria²⁵. Las caracte-

²⁵ Una función aleatoria es aquella que está especificada por los resultados de una observación y que puede tomar valores distintos cuando ésta se repite muchas veces.

terísticas del conjunto se expresan en términos de sus valores estadísticos. Por ejemplo en un instante $t = t_1$, las amplitudes en cada una de las realizaciones son diferentes, pero puede calcularse la media de todas ellas. Se consigue con esto tener la media de todo el conjunto en el instante t_1 . Lo mismo puede hacerse para cualquier otro valor de t , por ejemplo t_2 . Ahora bien la descripción de un proceso aleatorio necesita de una gran cantidad de información, es decir el número de realizaciones n debe ser muy grande y en muchas ocasiones es difícil conseguir las, por lo que, al menos en principio, hay una gran limitación. Sin embargo, por fortuna, es posible muchas veces suponer que el proceso goza de ciertas propiedades que simplifican en gran medida el problema.

La primera es suponer que es estacionario lo que quiere decir que las propiedades estadísticas del conjunto no cambian cuando lo hace el tiempo. Es decir que los valores obtenidos para $t = t_1$ son los mismos que resultarían en $t = t_2 = t_1 + \tau$, para cualquier valor de τ . Las consecuencias son que la media es constante en el tiempo y que la función de autocorrelación no depende más que de la diferencia en el tiempo²⁶.

Cuando además las propiedades estadísticas pueden calcularse a partir de las medias temporales de una realización el proceso es ergódico. Si esta hipótesis se cumple se elimina la necesidad de tener más de una realización. Basta una sola para calcular las variables estadísticas. Si el proceso estadístico depende no sólo del tiempo sino también del espacio, la hipótesis ergódica significa que hay que tomar también medidas espaciales. Esto requiere que el proceso sea homogéneo en el espacio y estacionario en el

²⁶ La función de autocorrelación muestra la dependencia de los valores de la función aleatoria obtenida en un cierto momento de los obtenidos en ese mismo momento o en otro. Su expresión matemática es:

$$R_{xx} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} [X^i(t_1) X^i(t_1 + \tau)]$$

Cuando τ es igual a cero la función de autocorrelación se convierte en el valor cuadrático medio.

tiempo. En el estudio de las olas y del movimiento de un buque se supone que se cumple la hipótesis ergódica, aunque no pueda demostrarse. Se acepta porque si no se hiciera sería imposible resolver el problema. Por otra parte, una vez la mar desarrollada²⁷ y dada la conexión entre la función de autocorrelación y el espectro de energía, no es muy aventurado asegurar que el proceso es débilmente ergódico. Es decir que la citada hipótesis es satisfecha sólo por la media y la función de autocorrelación. En este caso con estos dos parámetros basta. Transformando del dominio del tiempo al de las frecuencias por medio de las relaciones de Wiener-Khintchine se tiene, recordando que el valor cuadrático medio es un caso particular de la función de autocorrelación, la curva que representa el espectro de energía, fig.4. Cada ordenada de la curva es la contribución al valor cuadrático medio de las componentes que tienen frecuencias comprendidas entre ω y $\omega + \delta\omega$.

Fue esto lo que sugirió la idea de representar la irregularidad de la superficie del mar por medio de un número infinito de olas regulares de diferentes frecuencias y direcciones de propagación. La distribución de la energía de cada una de estas olas en función de la frecuencia y la dirección de propagación se conoce con el nombre de espectro de las olas. Cuando la distribución de la energía se representa únicamente con respecto a la frecuencia se tiene el espectro de frecuencias; mientras que cuando se hace con respecto a la frecuencia y la dirección de propagación, lo que se tiene es el espectro direccional de las olas.

Entre las infinitas maneras de representar esta suma la más simple es quizás:

$$\eta \{r, t\} = \sum_{i=1}^n \eta_i \{r, t\} \quad (2)$$

en la que

$$\eta_i \{r, t\} = a_i \cos \{ \overline{K_i r} - w_i t + \delta_i \} \quad (3)$$

²⁷ Se dice que un mar está completamente desarrollado a una dada velocidad del viento cuando todas las posibles componentes del espectro, comprendidas entre las frecuencias $\omega=0$ y $\omega=$ están presentes con la máxima cantidad de energía.

En las que:

a_i es la amplitud de cada ola individual

\bar{r} es el vector que fija el punto en el que se desea tener la elevación.

k_i es el número de la ola en la dirección de propagación, es decir:

$$\bar{K}_i = K \cos\theta_i \bar{i} + K \text{sen}\theta_i \bar{j}; K = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (4)$$

λ es la longitud de la ola.

La fase δ_i , que es distinta para cada ola elemental, es la variable aleatoria y se escoge al azar para cada componente. La única condición que debe cumplir es que todas las fases posibles deben tener la misma probabilidad. En este caso la fase δ_i no es tan importante como la amplitud a_i , especialmente si el tiempo de observación es grande en comparación con el período de las olas. En estas condiciones habrá olas de todas las posibles frecuencias y las diferencias de fase entre ellas cambiarán constantemente, con lo que la diferencia de fase inicial no es importante. Cuando las olas tienen la misma dirección θ es constante. La representación es válida cuando la amplitud es pequeña y puede admitirse la hipótesis de linealidad.

Volviendo a la ecuación (2), en la que cada valor de η_i puede tomarse como una realización, debido a haber tomado δ_i como una variable aleatoria, el valor medio es cero, mientras que el valor cuadrático medio es:

$$\bar{\eta}^2 = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n a_i^2 = m_0. \quad (5)$$

Como la energía de la ola es $\frac{1}{2} \eta a_i^2$ por unidad de superficie, (5) permite calcular la amplitud de una hipotética ola senoidal que tuviera la misma energía por unidad de área como el complejo sistema de olas sinusoidales. Esto es la base de la representación espectral y muestra, que en una superposición de oscilaciones periódicas sin aparente relación entre ellas la energía media de la ola resultante es equivalente a la suma de la energía media de cada una de las olas que la componen.

En la parte superior de la figura 4 está representado el espectro direccional de energía que corresponde a una cierta mar. Si se divide el eje x en una serie de bandas estrechas de anchura $\delta\omega$ alrededor de una frecuencia central ω_n , el área de cada una de estas bandas, que es una medida de la energía asociada a la frecuencia central del trozo ω_n , será $S(\omega) \delta\omega$, luego teniendo en cuenta lo que vale la energía de la ola es:

$$a_n = \sqrt{2S(\omega_n) \delta\omega}$$

En la parte inferior de la figura 4 se han dibujado las posibles componentes del espectro de la parte superior. Para conseguir una realización, es decir un registro del estado de la mar durante un cierto período de tiempo, basta con combinarlas con las fases escogidas al azar. Cada combinación aleatoria de las fases da diferentes realizaciones.

Durante los treinta últimos años se han desarrollado varios espectros teóricos útiles cuando se dan las condiciones para las que han sido deducidos y no tiene información más exacta. Los más famosos son: el de Bretschneider (1959); el de Pierson-Moskowitz (1964); el Jonswap (Joint North Sea Wave Project 1973); y el de la ITTC.

Es importante aclarar que en estudio del comportamiento se consideran tres diferentes dominios: tiempo, frecuencia y probabilidad. No son más que diferentes procedimientos de describir el mismo fenómeno. Cada uno tiene sus ventajas para resolver ciertos problemas, así que según de lo que se trate se escoge uno u otro.

Cálculo de los movimientos

Los seis simples movimientos que puede experimentar un buque en la mar no tienen la misma importancia ni las consecuencias son las mismas, teniendo en cuenta además que el tamaño de la embarcación juega un papel muy importante. Los tres principales son el balance, la cabezada y la oscilación vertical.

Las ecuaciones que los gobiernan son:

$$\sum_{k=1}^6 [[M_{jk} + A_{jk}] \ddot{\eta}_k + B_{jk} \dot{\eta}_k + C_{jk} \eta_k] = F_j e^{-i\omega t} \quad (7)$$

semejante a la que aparece en un sistema masa-muelle-amortiguamiento. En la del buque M_{jk} son las componentes de la matriz de masas de la estructura; A_{jk} corresponden a la masa añadida; B_{jk} son los del amortiguamiento; C_{jk} son los de las fuerzas restauradoras; η_k representan los movimientos y F_j las amplitudes complejas de las fuerzas y momentos perturbadores. Las ecuaciones del barco son diferentes de las habituales de un sistema de este tipo en el que los coeficientes y la excitación son funciones de la frecuencia. Para una frecuencia dada son constantes y el sistema tiene solución. Para otra frecuencia tanto los coeficientes como las fuerzas excitadoras serán diferentes.

Para poder resolver las ecuaciones del movimiento es preciso conocer los coeficientes de las ecuaciones. Aunque podrían determinarse experimentalmente el procedimiento sería muy laborioso por lo que los ensayos se emplean para medir directamente los movimientos.

Mucho se ha trabajado buscando métodos teóricos para determinar los coeficientes. Aunque se ha avanzado algo en este campo todavía hay que hacer un gran número de hipótesis, lo que impide llegar a soluciones cuantitativas fiables.

Experimentalmente Pierson y St. Denis supusieron que el movimiento de un buque en un mar irregular es la suma de las respuestas a cada una de las componentes de ese mar; y que en mares regulares del mismo período pero de diferente altura, la amplitud del movimiento es proporcional a la altura de la ola, es decir la respuesta es lineal. Basta pues hacer ensayos a varias velocidades en olas regulares de diferentes longitudes, y por consiguiente con distintos períodos de encuentro, para encontrar la respuesta de un buque a la acción de una mar definida por su espectro. La figura 5 es un ejemplo del procedimiento a seguir.

Criterios de comportamiento

La parte más compleja del estudio del comportamiento de un buque en la mar es decidir a la vista de los valores obtenidos de los ensayos, de los cálculos o de ambos, si los movimientos son aceptables. Caso de que no lo sean será preciso modificar el proyecto de manera que esos valores lleguen a ser aceptables. Son en general muy difíciles de establecer ya que dependen no sólo de las características del buque sino también de la misión que debe desempeñar.

No es de extrañar el que hayan sido los barcos de guerra los primeros a los que se haya tratado de fijar esta clase de criterios, ya que para ellos no es sólo su comportamiento hidrodinámico lo que la mar pone a prueba, sino que el deterioro que produce en su eficacia puede hacerlo inservible para la misión que tiene asignada. Esto sin contar que puede facilitar su destrucción, sino su capacidad de superar un combate pueden verse gravemente comprometidas por la acción de la mar; no hay que olvidar que los combates se ganan normalmente cuando se disfruta de alguna ventaja, por muy pequeña que sea, sobre el enemigo. Mantener la capacidad de lucha intacta en cualquier condición de mar y viento, no perder velocidad por muy dura que sea la mar o tener la posibilidad de que un helicóptero despegue aunque el tiempo sea inclemente, pueden darla. Es, por consiguiente, aconsejable tratar de poseer barcos que disfruten al máximo de esas, o parecidas, cualidades. En los tiempos de los barcos de vela, las cosas eran diferentes. Los navíos de combate podían, en ocasiones con dificultad, capear un temporal, nadie sin embargo pretendía que combatieran con mal tiempo; por este motivo era frecuente que las flotas descansaran en invierno. Como se ha dicho más arriba el uso de la propulsión de vapor cambió la situación puesto que ya era posible llegar a un lugar determinado en la fecha prevista, hubiera o no hubiera viento, lo que estimuló el establecimiento de líneas regulares. Ciertamente es que con mal tiempo la navegación se complicaba, pero era tal la mejoría con respecto a la situación anterior que se soportaba sin graves quejas. En lo que a los barcos de guerra se refiere, al estar las flotas compuestas principalmente de buques de gran porte, acorazados y cruceros, el mal tiempo no influía en el resultado del combate pues reducía la capacidad de los buques propios y la de los del enemigo en la misma proporción. La aparición de nuevos tipos de buques de guerra tales como los antiguos torpederos, o los más modernos submarinos y portaviones, cambió esta situación puesto que la mar les afectaba de distinta manera; ya era conveniente tratar de mejorar el comportamiento de los más pequeños para que pudieran desempeñar en cualquier condición de mar y viento su cometido.

Los criterios corresponden a tres aspectos diferentes:

Habitabilidad. Trata de las condiciones ambientales en las que la dotación desempeña su tarea del modo más eficaz sin que se vea influenciada

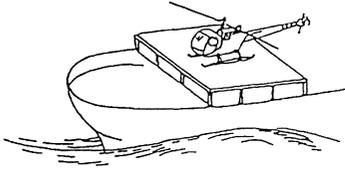
por el comportamiento de la embarcación. Es de una gran importancia en buques de guerra en los que la dotación debe estar siempre físicamente en forma para cumplir las misiones que tengan asignadas.

Operatividad. Se refiere a comprobar el funcionamiento correcto de todos los equipos e instrumentos de a bordo, a la seguridad de la carga y al mantenimiento de buenas cualidades maniobreras.

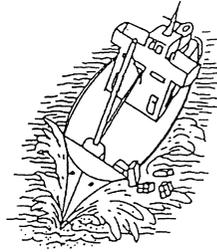
Supervivencia. Trata de los factores de vital importancia para impedir que el barco se pierda cuando resulten, por acción de la mar, dañadas partes fundamentales de la embarcación.

Es costumbre actualmente representar la capacidad de un buque para negociar la mar por medio de un diagrama polar en el que se muestra, de acuerdo con la dirección por donde la recibe, la máxima velocidad que puede alcanzar. Este diagrama combinado con el de la probabilidad de que exista una mar determinada define la probabilidad de que un buque pueda desempeñar su misión en un área determinada. Casi siempre las situaciones más peligrosas se presentan con mar de proa.

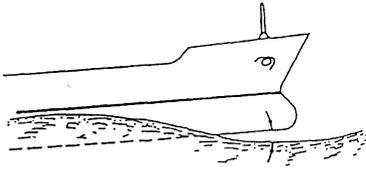
En los buques mercantes se están empezando a emplear paquetes de programas de ordenador que de acuerdo con la información de los estados de mar y viento van aconsejando, con una frecuencia determinada, el rumbo y la velocidad más conveniente para la seguridad y economía de la navegación. Los datos meteorológicos y atmosféricos llegan de los centros de predicción, mientras que su influencia sobre el barco se estima según distintos criterios. La pérdida de velocidad por la acción de la mar y el viento se suele dividir en dos partes: voluntaria e involuntaria. La primera es la que el capitán o comandante ordena para reducir posibles daños en la carga, equipos o estructura, o para disminuir aceleraciones excesivas que perturban la vida y el trabajo a bordo. La involuntaria, que puede ser directa o indirecta, es la que se produce con independencia de las órdenes del capitán.



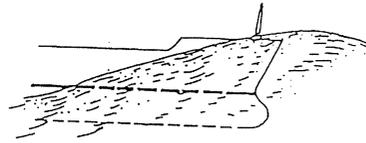
Movimientos



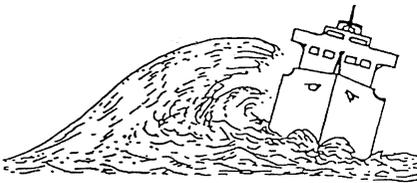
Aceleraciones



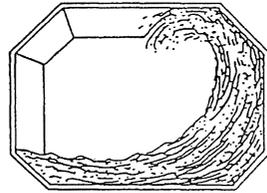
Slamming



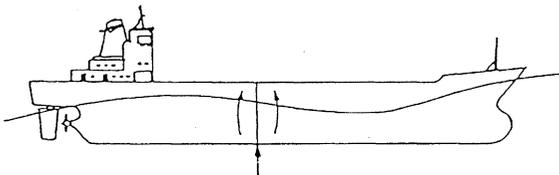
Embarque de agua



Olas rompientes



Movimiento de líquido en tanques



Esfuerzos estructurales

Figura 1

El esfuerzo cortante transmite directamente energía al fluido.

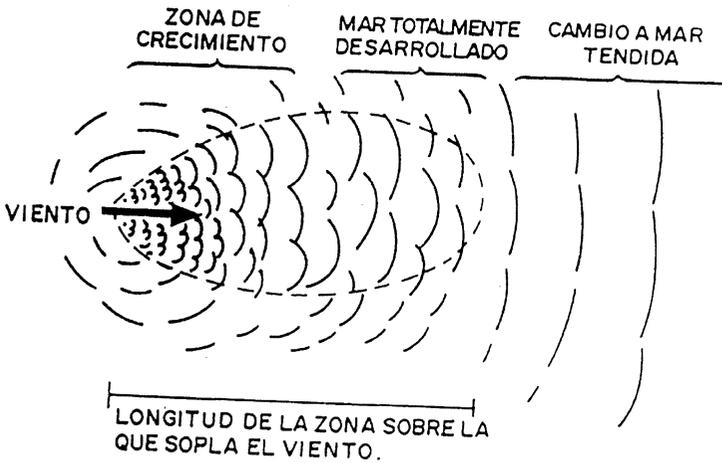
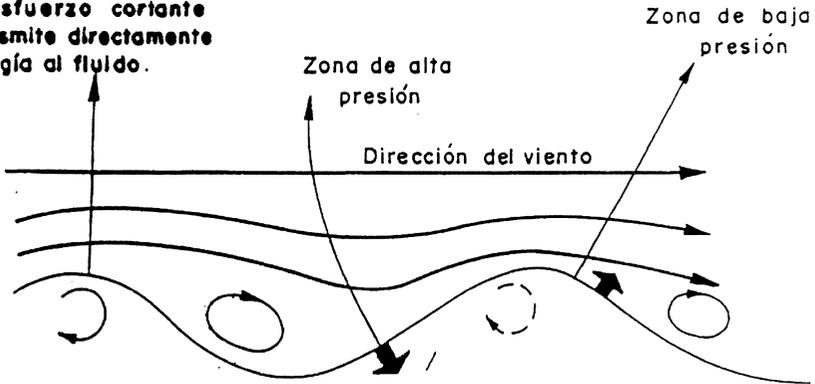


Figura 2

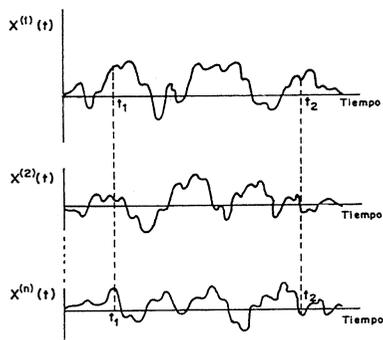
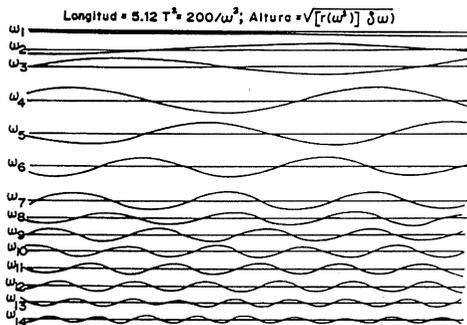
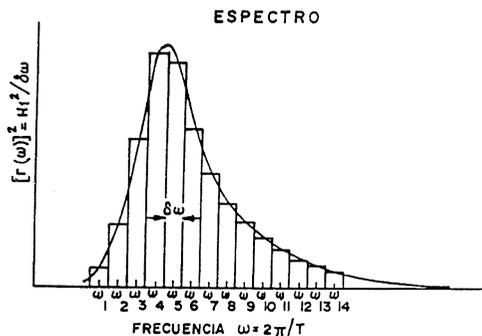


Figura 3



Componentes del espectro

Figura 4