



Ing. Nelson Noziglia

Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de la Marina Mercante.

El método probabilístico-determinístico en la Ingeniería Naval

"La naturaleza oculta sus secretos porque es sublime, no porque sea tramposa".

A. Einstein

La discusión entre las concepciones probabilísticas y determinísticas en la Física, sigue vigente, y ella persiste aún entre notables pensadores de nuestra época. Sin embargo, la "Teoría Probabilística" es por el momento, la de "moda", que parece dar solución más aceptable a las cuestiones que presenta esa ciencia natural. Según el Premio Nóbel de Química, Ilya Prigogine, nacido en Rusia y nacionalizado belga, expresa que: *"El Universo no es un reloj, es un caos; a nivel de los electrones la Física clásica no tiene validez, y la estructura de la materia no puede definirse por las leyes de carácter determinísticas. El mundo es eventual, caótico e imprevisible"*. La meteorología es un ejemplo de la imprevisión determinística, como lo es el estado del mar al que me referiré.

Los sistemas caóticos no son la excepción, son la regla en la naturaleza. Para este científico la Física contemporánea se basa en las probabilidades; para él la visión mecanicista del Universo, carece de carácter científico, se basa en

teorías nacidas en el Siglo XVIII, ya superadas. El ideal de la ciencia determinística es inaceptable, la certeza no se concibe en nuestro mundo. La Ciencia Física, al igual que las Humanas, surgen de la suma de azares.

Para I. Prigogine, la conocida frase de A. Einstein: *"Gott würfelt nicht"* ("Dios no juega a los dados") para sostener que la naturaleza obedece a leyes determinísticas, no es real, incluso algunos acotan "que sí juega a los dados", y que además los dados "están cargados". *"Con criterio probabilístico, la Física no describe propiedades, sino probabilidades, no existen leyes que revelan el futuro de los sistemas, sino leyes que expresan las variaciones en el tiempo de las probabilidades, no existen leyes que revelan el futuro de los sistemas, sino leyes que expresan las variaciones en el tiempo de las probabilidades, y que se refieren a conjuntos de un gran número de casos"*. (La Física. Aventura del Pensamiento: A. Einstein, L. Infeld).

La Teoría Determinística es irreconcili-

able con la Probabilística. René Thom, matemático francés, poseedor de la medalla Fields del año 1918, equivalente en esta disciplina al Premio Nóbel, que no se otorga en Matemática, se expresa diciendo que: "el mundo es inteligible y ordenado", es decir "Dios no juega a los dados". René Thom, es considerado autor de la Teoría de las Catástrofes (1960), aunque en ella han tenido particular participación los rusos Andranov y Poriaguin (1937).

El trabajo sobre *Stabilité Structulle et Morphogénese*, lo presentó Thom en 1972, donde proponía el empleo de la teoría topológica de los sistemas dinámicos para la modelización de los fenómenos de crecimiento (Biología); este matemático propuso una nueva ciencia que se llamó Semiofísica. Se discute si la teoría propuesta por Thom se corresponde con las teorías de las singularidades.

La Teoría de las Catástrofes es el estudio, desde el punto de vista cualitati-

vo, de las variaciones de las soluciones de las ecuaciones diferenciales. Mientras que el Análisis Matemático trata procesos continuos, diferenciables o suaves, la teoría de Thom, considera las transiciones bruscas. Los puntos catástrofe contienen las características significativas del proceso analizado, es un cambio traumático que se aprecia como una respuesta brusca del sistema, a un cambio suave en la solici-tación externa. Anteriormente, cuando se detectaban en una experiencia dispersiones y oscilaciones no periódicas, se las relacionaba a imperfec-ciones del propio experimento.

Actualmente se admite que gran parte de esas oscilaciones están relacionadas con las características intrínsecas de la cuestión donde ocurre el caos. Se define como Caos, al comportamiento de sistemas dinámicos, que presentan características mixtas, con entropía positiva; estos sistemas no poseen so-luciones determinísticas, y no es posi-ble anticipar el futuro del fenómeno.

Pero finalmente A. Einstein admitió que *"el orden puede nacer del caos, y ello debería regir el carácter de la ciencia moderna"*. Esto permite el análisis Probabilístico-Determinístico, que se aplica a la cuestión bajo análisis, en este caso en el campo de la Ingeniería Naval y Oceánica. Se considera equi-vocadamente que A. Einstein concibi-ó un determinismo de tipo laplaciano, él osciló entre el determinismo y una concepción más amplia, que acepta la legalidad probabilística.

K. Popper aclara que *"las ideas dife-rentes de R. Thom e I. Prigogine permi-ten determinar que cada una de ellas está cuestionada por la otra"*, esto es lo denominado falsabilidad, y es la base de la ciencia. Particularmente, y como Ingeniero Naval preferiría que prosperara la Teoría Determinística, pero para que ello ocurra es necesario conocer las funciones que se aplican a los fenómenos físicos, por ejemplo en

nuestro caso, las funciones que rigen el mar agitado, y ello aún no lo ha po-dido aportar la Matemática; en con-secuencia resulta aceptable la solu-ción probabilística, que pasa ahora a ser una herramienta necesaria para el Ingeniero Naval.

Sin lugar a dudas, el mar confuso pre-senta situaciones caóticas, sólo anali-zables en la actualidad por el método probabilístico, sobre la base de análi-sis estadísticos representativos del fe-nómeno. La estabilidad latitudinal de los buques en el mar, si bien se analiza y analizó tradicionalmente por mé-todos determinísticos, brazos intrín-secos de la reacción de la carena, a causas extrínsecas, producidas por el mar; los criterios de aceptación del comportamiento, resultan del análisis estadístico de las respuestas del bu-que, es decir se combinan, como pro-pone A. Einstein, ambos criterios.

En la actualidad el método probabilís-tico tiene aplicación preponderante en la Ingeniería Naval, en especial en grandes buques de mar o artefactos particulares (plataformas). Los conve-nios internacionales ya prescriben esta metodología de cálculo, así por ejem-plo: subdivisión estanca, embarque de agua sobre cubierta, estabilidad y franco bordo de pesqueros y platafor-mas fuera de costa, etc. Por otra parte el análisis de la resistencia estructural y el de fallas, están sujetos en los bu-ques a este criterio de análisis. Los Re-gistros de Clasificación lo aplican pa-ra la determinación de fórmulas de-terminísticas que permiten la obten-ción de los escantillones, o dimensio-nes de los elementos estructurales.

Está ya muy lejano a la realidad, basar los estudios de la optimización del proyecto de un buque, en un supues-to de un mar con olas regulares de tipo trocoidal (Gerstner – 1802), que sólo determina soluciones aceptables en casos de buques de poca eslora, y en mares ideales. En el procedimien-

to estadístico que se aplica, los datos se interpretan como valores obteni-dos de un universo, y el problema consiste en determinar sus caracterís-ticas, es decir las probabilidades de que aparezcan en futuras extracciones de muestras, estableciéndose una ley de naturaleza probabilística. Eviden-temente el empleo de esta metodolo-gía requiere, como en la mayoría de los problemas que se presentan en la ingeniería, el uso de la interdisciplina, en este caso particular con la Oceanografía y la Matemática Probabilística.

A los alumnos de ingeniería, se les debe informar sobre las necesidades del trabajo interdisciplinario, dado el campo que abarca su profesión; in-cludiendo en ello la interdisciplina en Matemática, Física, etc.. Es obvio que el trabajo en esta forma requiere el conocimiento por parte de ambas o más partes de la cuestión a resolver, y de la compatibilización de los resulta-dos, así como la perfecta individuali-zación de los temas de consultas y sus limitaciones, lenguajes, etc. En la ac-tualidad la formación del Ingeniero Naval debe contener un fuerte sus-tento en los métodos probabilísticos, lo que significa una novedad en las currículas, de la misma forma que lo fue la Informática en su momento y que actualmente tiene una funda-mental incidencia.

Bases en que se sustenta el método

El Método Probabilístico a que se ha-ce referencia en este trabajo, permite finalmente valorar las probabilidades de que a causa de un determinado ri-gor del mar donde navega un buque, éste no sobrepase, en las respuestas re-queridas -que pueden ser: movimien-tos, embarques de agua, esfuerzos, etc.- los valores de los criterios estable-cidos, de características probabilísticas. Las respuestas de los buques a la ac-ción del mar, están directamente in-fluenciadas por el estado del mar, y por la capacidad intrínseca de la nave;

o habilidad para reaccionar a esos efectos, cuestión que se denomina: comportamiento en el mar; *tenue a la mer*; *seakeeping* o *seakiness*.

Un buque como cuerpo flotante, posee seis (6) grados de libertad; tres (3) traslaciones y tres (3) giros sobre sus ejes baricéntricos ortogonales. Con excepción del movimiento de traslación, que es el requerido para la propulsión, los restantes, tanto traslaciones como giros, requieren un análisis particular pues afectan cuestiones que hacen a las condiciones de seguridad, comodidad, resistencia estructural, operación. Además, el rigor del mar, traducido en características de ondas particulares, de alturas, frecuencias y direcciones diversas, determina momentos flectores, esfuerzos de corte, momentos torsores, que deben ser compensados con estructuras adecuadas.

Las bases para el análisis "probabilístico" de los buques se sustentan en:

1. Conocimiento de la sollicitación en forma probabilística.

Para obtener el rigor de la sollicitación de una nave en el mar, se emplea en este método un elemento de características probabilísticas, obtenido por valores estadísticos propios del lugar de análisis, y como consecuencia de un muestreo de gran magnitud, por ejemplo muestras obtenidas según métodos precisos, durante cincuenta años de verificaciones. Esta es una tarea de los oceanógrafos y así se determina el estado del mar en el lugar, en forma de espectro función de la frecuencia de la onda (ω s).

El espectro denominado de potencia, resulta ser la suma de las energías de todos los componentes de las olas que tienen su frecuencia en esa banda. Tal determinación se realiza sobre la base de la frecuencia (ω), hallando la transformada de Fourier de la fun-

ción autocorrelación de la función estocástica del mar irregular.

Sin pretender incursionar en el tema matemático profundo que rige la cuestión, puede sintetizarse que, si a la función periódica en el tiempo que se denomina "energía" de la función, se la desarrolla en series de Fourier, se logra obtener la potencia media:

$$\overline{W} = \frac{1}{T} \int_0^T (\overline{W} C_0 + \sum_n^\alpha C_n \cdot \text{Sen}(\omega_n + \varepsilon_n))^2 \cdot dt$$

operando:

$$W = C_0^2 + 1/2 \sum_n^\alpha C_n^2;$$

que permite admitir que la potencia media de la función "energía" en el período T, es igual a la suma de las potencias medias de sus componentes armónicos.

La densidad espectral de potencia entre dos frecuencias ω sucesivas, se define como:

$$S(\omega_n) = \frac{W(\omega_n) - W(\omega_n - 1)}{\Delta(\omega_n)}$$

La función densidad espectral de potencia, función de la frecuencia de las olas, se simboliza S (ω), y recién tuvo aplicación práctica cuando St. Denis y Pearson demostraron la teoría de la superposición, que determina que del estado del mar irregular (su energía), que puede obtenerse de la suma de la energía de olas elementales componentes, se puede lograr la respuesta de los buques, también para esas olas elementales y en forma de espectro, en este caso de respuesta, también f (ω).

Si se admite que el mar irregular está formado por olas elementales sinusoidales, de las que se puede hallar las energías unitarias.

$$E_s = \rho g \lambda^{1/2} a^2, \gamma$$

admitiendo que por ser elementales:

$\lambda = 1$, y ρ y $g = \text{ctes.}$, resulta que E_s es proporcional a $a^2 / 2$, o bien: $2 E_s$ proporcional a a^2

En virtud de ello, si por muestreo se determina la probabilidad de aparición, en una determinada zona, olas de frecuencia (ω), y admitiendo que están formadas por sinusoidales elementales, se calcula a^2 , y se grafica la curva de variación:

$$S(\omega) = a^2 d\omega^{-1}$$

El área bajo la curva es la varianza, y como se indicó, representa la severidad del mar en el lugar, de un espectro unidireccional.

$$I^2 = \int_0^\alpha S(\omega) d\omega$$

Existen espectros multidireccionales, que no se tratan en el presente, pero que son reales para el cálculo en los buques. Del espectro de potencia del mar en el lugar S (ω), se obtienen las conclusiones probabilísticas, haciendo uso de la Matemática Probabilística, en este caso, siendo:

$m_0 =$ área bajo la curva del espectro, que representa la varianza, resulta:

Amplitud de las olas más frecuentes = $m_0^{1/2}$

Promedio de amplitudes de olas (H) = $1,25 m_0^{1/2}$

Promedio de olas significativas (H1/3) = $2,0 m_0^{1/2}$

Promedio de amplitudes de las 10 olas más altas (H 1/10) = $2,55 m_0^{1/2}$

La probabilidad de que en un determinado tiempo aleatorio del proceso, la magnitud de la amplitud de una ola exceda un determinado valor H_c , para una distribución normal, resulta de:

$$P_{(H_c)} = 1 - \text{fer}(H_c / 2 m_0^{1/2})$$

fer = función error (de tablas matemáticas)

Sin embargo para el caso de que más del 60% de las olas del sistema tengan una amplitud igual o menor que $m_0^{1/2}$ (más frecuentes), se puede determinar la excedencia porcentual ($\epsilon\%$), con relación al valor requerido de la amplitud sobre la base de la expresión calculada:

$$\epsilon (\%) = 129,5268 \cdot e^{-1,7098 \times Hc/m_0^{1/2}}$$

que se ha graficado y se presenta en la figura 5, que resulta de la regresión exponencial de los valores dados en (3). (Figura 1)

Para el análisis probabilístico tratado, se hacen las siguientes especulaciones: -El proceso del mar irregular responde con suficiente aproximación a las siguientes características: Estocástico; Estacionario; Ergódico, Estocástico-Ergódico; Gaussiano. En lo que concierne a esta última característica, que significa que la variable aleatoria está normalmente distribuida, y la función responde a la expresión normal de Gauss, ello está siendo objeto de ajustes, y se analiza un modelo más realista, donde el proceso estocástico se considera "débilmente gaussiano", es decir un sistema no lineal, y la no gaussianidad del mar, lo que conforma el "Modelo Estocástico de Componentes Cuadráticas de Olas", debido a Osborne – Dogliani.

En este caso la densidad biespectral de la ola, se define como: la transformada de Fourier de la función covarianza, dividida $(2\pi)^2$. Existen, como es sabido, otras funciones para determinar la distribución normal, una de ellas es la debida al físico inglés John William Street Lord Rayleigh (1842–1919). Cuando el tiempo de observación del fenómeno en el mar es de más de media hora, las caracte-

rísticas pueden considerarse constantes en ese lapso, y obtener la función representativa de la superficie en el tiempo, lo que permite calcular la función densidad de potencia antes mencionada.

Los espectros de potencia, para algunos casos, pueden obtenerse por fórmulas determinísticas en general función del viento o frecuencia (ω_0) en la zona analizada. Existen varios espectros estandarizados, así por ejemplo: Pierson-Moskowitz; W.S. Pierson; Derbyshire Neuman; TIC; este último corresponde al Internacional Towing Tank Conference (ITTC), es el más utilizado, y aceptado por el International Structures Congreso, responde a la expresión:

$$S(\omega) = \frac{A}{\omega_0^5} \cdot e^{B/\omega_0}$$

donde:

ω_0 = frecuencia de la ola (1/s)
A y B = constantes que valen:

$$A = 0,7789801 ; (8,10 \times 10^{-3} g^2)$$

$$B = 3,11 / H_{1/3}^2$$

Con estas fórmulas se obtiene el Espectro Absoluto, que luego debe ser corregido, en su caso por el encuentro entre el buque y el tren de olas, actuando con la velocidad correspondiente a esa circunstancia.

Se agrega como ejemplo, ambos espectros obtenidos por la fórmula ITTC (Figura 2).

2. Operador de respuesta del buque a la acción del mar

Considerando, sobre la base del Análisis de Sistemas, que "sistema" es un conjunto de objetos entre los cuales

Figura 1

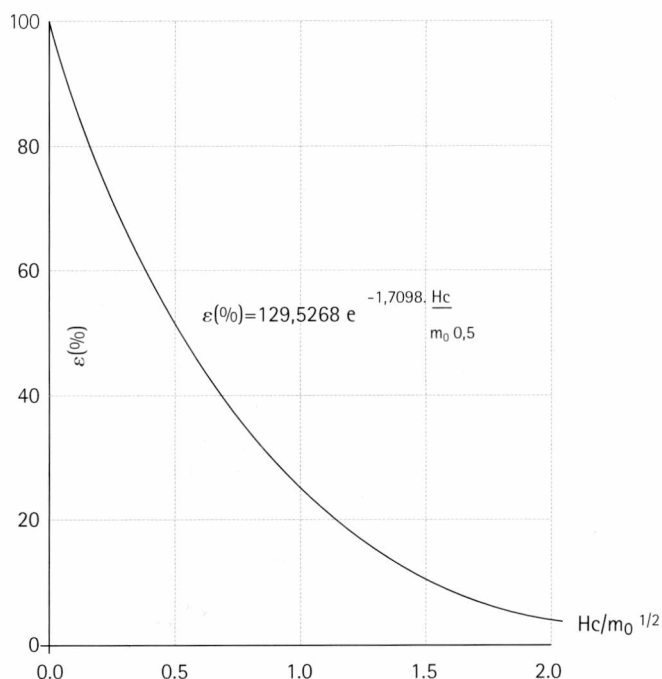
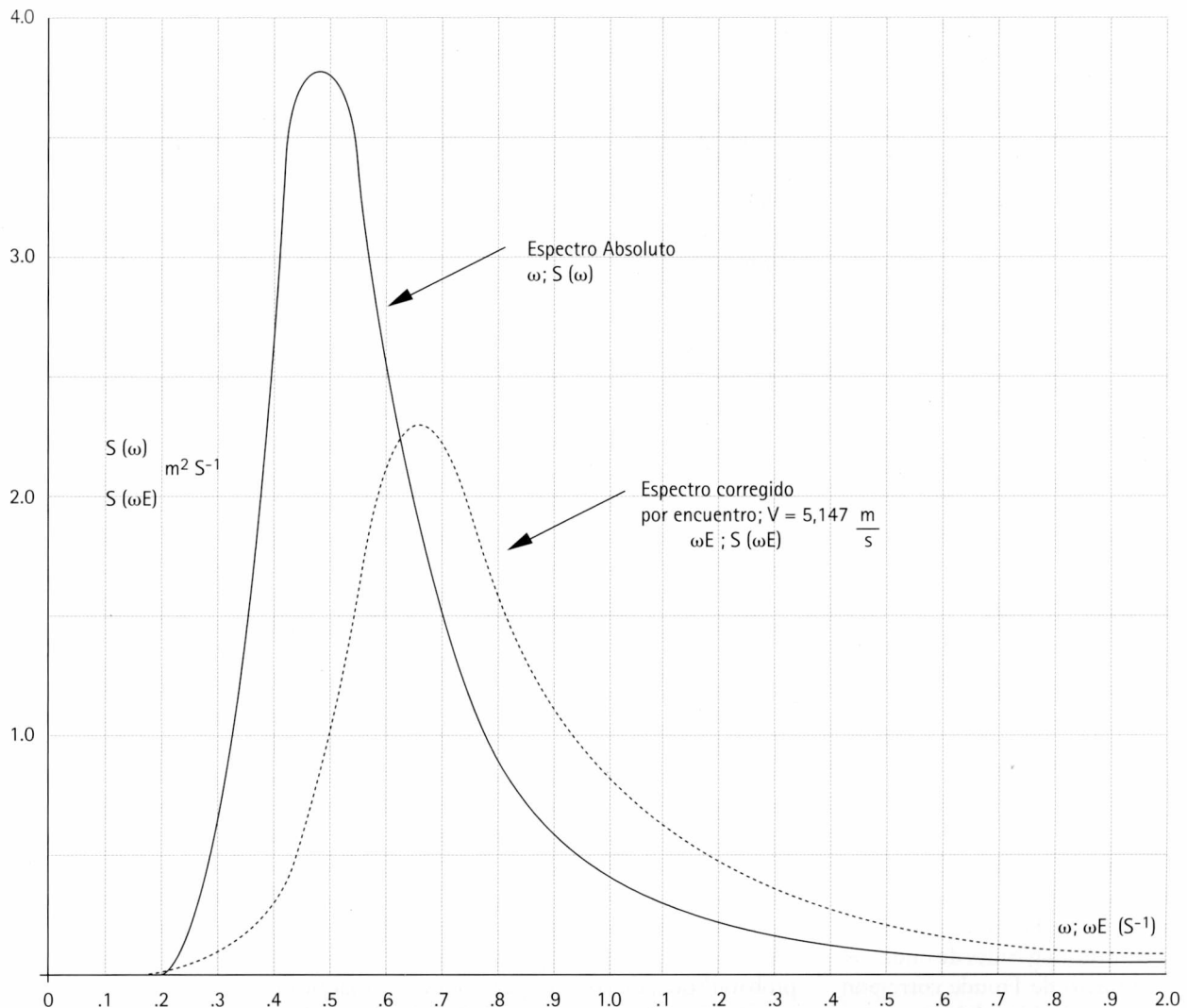


Figura 2



existen conexiones de cualquier tipo, y donde se distinguen tres tipos de variables:

Variables de estado: que en el caso de un buque son las coordenadas cartesianas de su baricentro. Los tres ángulos que identifican la posición de un sistema solidario con el buque, con origen en el baricentro, y las velocidades de traslación y angulares en relación a los ejes principales.

Variables de entrada: que caracterizan las acciones externas al sistema (el

efecto del mar) o bien Operador de Respuesta en Amplitud; RAO.

El RAO se obtiene de la relación entre la amplitud de respuesta $Y(\omega)$, y la de entrada a la misma frecuencia $X(\omega)$.

$$RAO = \frac{\text{Amplitud de respuesta para } \omega}{\text{Amplitud de entrada para } \omega}$$

Este elemento fundamental en la determinación por el método probabilístico-determinístico naval, es de total responsabilidad del Ingeniero Na-

val, el espectro de potencia $S(\omega)$, del Oceanógrafo. El operador RAO, se presenta como una función de la frecuencia ω , y se denomina Función de Transferencia.

$$H_x y = RAO^2$$

Los valores de RAO, que permiten pasar de las características que determina el espectro $S_x(\omega)$, a la respuesta del buque, haciendo uso de los $H_x y$, se puede obtener de diferentes formas, a saber:

- a. Con modelos de buques a escala (en tanques de experiencia).
- b. Con mediciones en buques reales.
- c. Con cálculos directos, sobre la base de la respuesta a las sollicitaciones impuestas producidas por olas elementales sinusoidales.
- d. Por aplicación de la teoría de bandas (*Strep Theory*), que permite sobre la base de una división ideal en bandas o franjas verticales del buque, sollicitadas por las fuerzas inerciales, hidrostáticas, hidrodinámicas y por la perturbación del mar sinusoidal elemental, determinar respuestas del buque.

Por ejemplo, las Funciones de Transferencia para hallar las respuestas de un buque en las frecuencias ω , son para algunos de los movimientos:

$$\text{Rolido: } H_{\theta y} = \frac{(Y_{\theta} \omega)^2}{X_{\omega}}$$

$$\text{Cabeceo: } H_{\alpha y} = \frac{(Y_{\alpha} \omega)^2}{X_{\omega}}$$

$$\text{Movimiento vertical (Heaving) = } H_{zy} = \frac{(Y_z \omega)^2}{X_{\omega}}$$

Para buques con similitudes geométricas e hidrodinámicas, existen valores tabulados de H_{xy} , en general sobre la base de longitudes de ondas, eslora y número de Froude correspondientes a la velocidad del buque.

3. Respuesta del buque a la acción de la variable de entrada

La respuesta buscada del buque, se obtiene relacionando la variable de entrada, en este caso el espectro $S_x(\omega)$, con las funciones de transferencia H_{xy} correspondientes a la respuesta específica. Este resultado se obtiene también en forma de espectro, en este caso "espectro de salida", que es la variable de salida, función de ω , $S_y(\omega)$.

Variables de salida: que son las nuevas coordenadas del baricentro, los

ángulos de rolido, cabeceo, de giro con respecto a un eje vertical ($Y_{\alpha} \omega$), en función del tiempo. En el caso del análisis bajo estudio, la variable de entrada se representa con el espectro de potencia $S(\omega)$, y para pasar a la variable de salida en los movimientos u otras variables, debe hacerse uso del denominado Operador de Respuesta. Es demostrable que la respuesta de un buque a una perturbación de carácter sinusoidal, como es el caso de olas elementales componentes, presenta también una variación cíclica sinusoidal, a la misma frecuencia que la sollicitación, con amplitud proporcional y con defasaje correspondiente. El coeficiente de proporcionalidad y el defasaje se obtienen como función unívoca de la frecuencia ω , y del ángulo de encuentro (buque tren de olas) φ . A esta función se la denomina Operador de Respuesta $A(\omega, \varphi)$.

Conocido el espectro de respuesta $S_y(\omega)$, pueden obtenerse en operaciones sucesivas, y para ello el cálculo, las previsiones probabilísticas que permiten diagnosticar el comportamiento del buque (movimientos, esfuerzos, etc.). Se utiliza el mismo criterio matemático indicado para las previsiones obtenibles con el espectro de entrada, en lo relativo a características probabilísticas de las olas, pero en este caso para las previsiones probabilísticas de salida.

Al buque se lo ha considerado en este proceso como un sistema fijo a parámetros constantes, es un sistema de características intrínsecas invariables en el tiempo, que transforma cualquier realización del proceso estocástico, que representa la respuesta a las acciones del mar donde se encuentra. La transformación se determina en una forma determinística, dentro de un proceso probabilístico. Por ello en este trabajo se denomina Método Probabilístico-Determinístico, aunque es común la simplificación de denominarlo Probabilístico.

Para la solución del problema en una forma razonablemente práctica; y con resultados adecuados, es necesario realizar hipótesis simplificadoras. La hipótesis fundamental se basa en que el sistema mar irregular-buque, puede ser considerado lineal, ello implica que:

- a. existe proporcionalidad directa entre causa y efecto
- b. es válido el principio de superposición de efectos, lo que significa admitir, en forma similar a la hipótesis aplicada para el mar irregular, en el sentido que resulta de la superposición de olas elementales componentes; que las respuestas del buque se pueden obtener por la suma de las respuestas al efecto considerado (movimientos, esfuerzo, etc.) de cada ola elemental de ese mar, en todas las frecuencias.

Es decir, sintetizando:

1. El mar irregular posee una energía correspondiente a la suma de las energías de las olas elementales unitarias componentes que lo forman.
2. La respuesta de un buque a la acción de un mar irregular, es igual a la suma de las respuestas de ese buque a la acción de las olas elementales componentes.

Analíticamente, la respuesta de un buque Y_B , a "n" ondas de elevaciones unitarias, cuyas elevaciones en función del tiempo es $Y_u(t)$; resulta igual a "n" veces la respuesta del buque Y_b a cada ola elemental.

$$Y_B = \sum_1^n Y_b$$

Obtenido el espectro de salida $S_y(\omega)$, es necesario, determinar, por medio de la Matemática Probabilística, sobre la base del área del referido espectro (varianza), los valores probabilísticas, tal como se indicó para el caso del espectro de entrada, y comparar los resultados con los criterios de aceptación adoptados.

Cabe aclarar que para el cálculo "probabilístico" de la subdivisión estanca previsto por la SOLAS (IMO), se utiliza un procedimiento particular, que no parte obviamente del espectro de entrada del mar, dado que la respuesta requerida no está afectada por él. Como complemento ilustrativo, se incluyen en el presente los resultados de determinaciones probabilísticas-determinísticas, con sus espectros de salida y conclusiones probabilísticas, para los siguientes casos:

Pesquero de mar:

$L_{pp} = 45 \text{ m}$, $H \frac{1}{3} = 4,50 \text{ m}$ navegando en el Atlántico Sur.

1. Rolido.

Valores probabilísticos obtenidos sobre la base del área m_0 bajo el espectro de salida.

Varianza = $m_0 = 0,792$

Promedio de la amplitud de rolido doble = $1,25 m_0^{1/2} = 1,112^\circ$

Amplitud significativa del rolido doble = $2,00 m_0^{1/2} = 1,78^\circ$

Promedio de la amplitud doble de rolido, de los 10 valores más elevados del sistema = $2,25 m_0^{1/2} = 2,26^\circ$

Probabilidad de exceder el ángulo θ_{im} considerado crítico para el caso ($24,5^\circ$, inmersión del borde la cubierta). $\rightarrow 0$ (Figura 3).

2. Cabeceo o Pitching

Para el mismo buque y conclusiones probabilísticas sobre la base del espectro de salida:

Varianza: $m_0 = 0,3045$

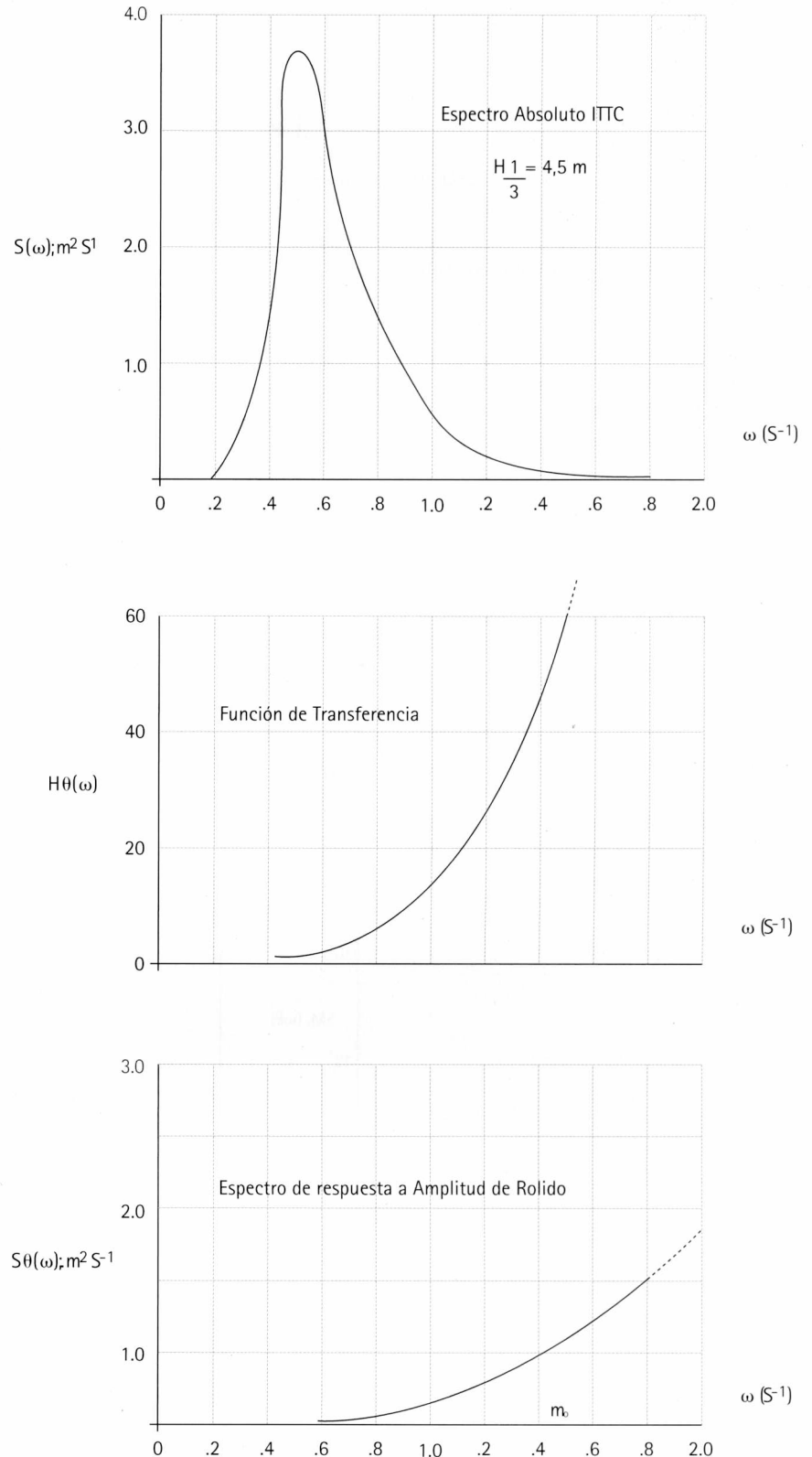
Ángulo más frecuente = $0,551^\circ$

Promedio de ángulo = $0,6895^\circ$

Promedio de ángulos significativos = $1,102^\circ$

Promedio de los 10 ángulo mayores = $1,405^\circ$

Figura 3



La probabilidad de superar el ángulo longitudinal impuesto, en este caso 7° (funcionamiento de motores eléctricos), empleando la fórmula correspondiente, resulta: $P \rightarrow 0$ (Figura 4).

-Barcaza fluvial: $L_{pp} = 80,00$
 Momento Flector: $H \ 1/3 = 2,50 \text{ m}$
 (Río de la Plata)

Las conclusiones probabilísticas son:

- $m_0 = 428400$
- $m_0^{1/2} = 654,522 \text{ tm}$
- $1,25 \ m_0^{1/2} = 818,153 \text{ tm}$
- $2,00 \ m_0^{1/2} = 1309,04 \text{ tm}$
- $2,55 \ m_0^{1/2} = 1669,03 \text{ tm}$

Considerando el módulo resistente longitudinal reglamentario (RINA, ABS), y la tensión máxima de trabajo para un acero naval Clase A, se determina que el M_f máximo admisible, que en este caso resulta: 4916,257 tm. La probabilidad de sobrepasar este valor, utilizando el procedimiento indicado, tiende a 0, lo que determina que el módulo resistente adoptado es aceptable, considerando además la forma de operación de estas barcazas (distribución irregular de la carga, varaduras, etc.). (figura 5).

Figura 4

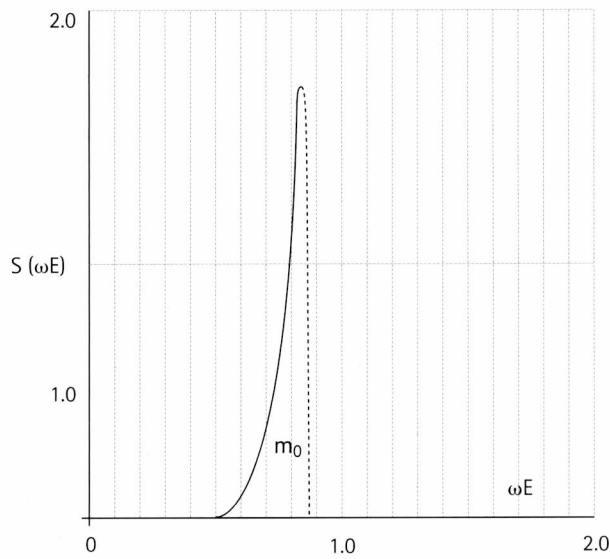
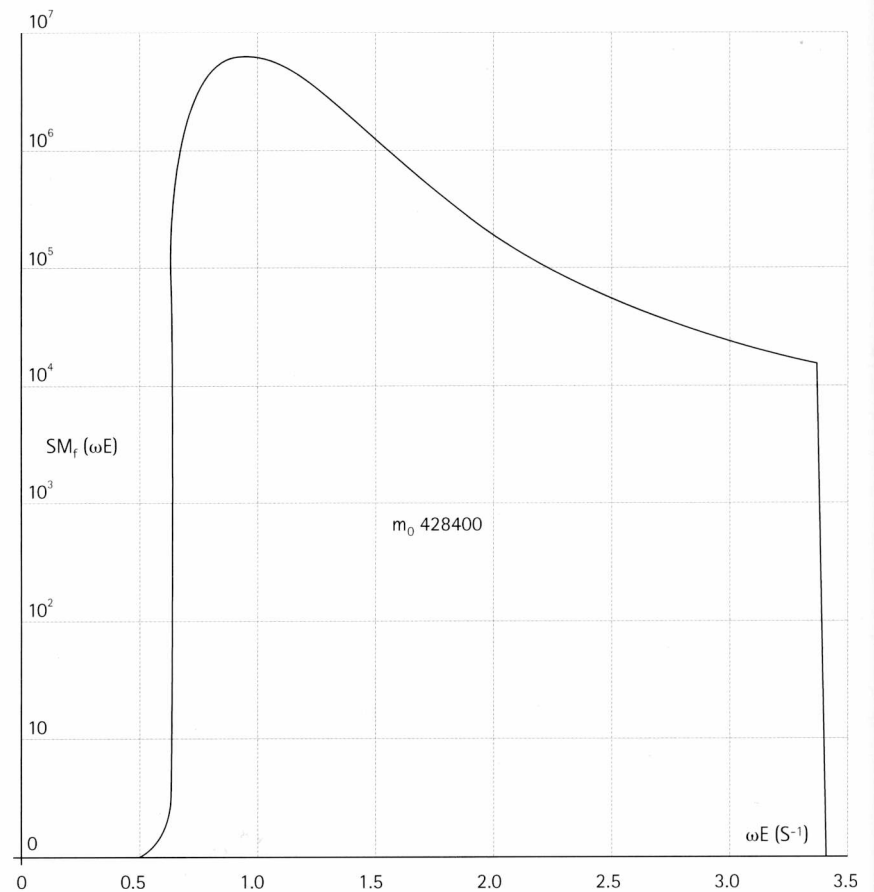


Figura 5



Espectro de respuesta de momento flector en amplitud
 $H \ 1/3 = 2.50 \text{ m}$

Bibliografía

- (1) – A comparison of various theoretical wave spectra – Neuman-Pierson
- (2) – Arquitectura naval – Teoría del buque – N. Noziglia
- (3) – Basic ship theory – K. J. Rawson y E. C. Tupper
- (4) – Structural design of sea going ships – N. Barabanon
- (5) – Il comportamento delle navi in mare tempestuoso – F. Marega
- (6) – La física aventura del pensamiento – A. Einstein – L. Infeld
- (7) – On the motion of ships in confused sea – St Denis – Pierson
- (8) – Ship motion in regular and irregular seas – Korvin Kroukosky – Lewis
- (9) – Ships non deterministic design and the practical naval architect – Huynb Ducbau
- (10) – Stochastic modeling of quadratic wave components – M. Dogliani
- (11) – Theory of seakeeping – Korvin Kroukosky
- (12) – Méthodes statistiques del ingénieur – Bowker, A.H. ; Liberman G.L.
- (13) – La perturbazione del mare in tempesta-Castagneto – (Tec ital, 1964)
- (14) – Probability and random processes – Davenport M.B.
- (15) – Sistemas dinámicos estocásticos – D'attellis – Moia – Pano (RA)
- (16) – Second order non linear effects in ocean surfaces waves – Osborne A. R.. – Dogliani M. – (RINA Italia 1988)
- (17) – Il calcolo dei movimenti e delle sollicitazioni in mare tempestoso, per messo del metodo dello spettro di energia e della teoria della sovrapposizione (La Marina Italiana. Dic 1963) – Spinell, L.
- (18) – Cálculo de los movimientos del buque en olas irregulares – (Ing. Naval 513) Rodriguez Rubio A.
- (19) – Del caos y esas cosas (2001) - Revista argentina de enseñanza de la ingeniería – Año 2, N° 3 –Nápoles Vallés, Juan E.