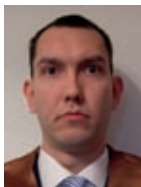




Figura 1. La Gran Ola de Kanagawa.



Rodrigo Pérez Fernández

Doctor Ingeniero Naval e Ingeniero Naval por la Universidad Politécnica de Madrid. Actualmente continúa su labor de soporte técnico del Sistema FORAN en SENER. En 2009 recibió el primer premio y medalla de oro a la mejor ponencia presentada en el 48º Congreso de Ingeniería Naval e Industria Marítima celebrado en Vigo. rodrigo.perez.fernandez@alumnos.upm.es



Miguel Lamas Pardo

Ingeniero Naval y Océánico por la Universidad de la Coruña, MBA-Executive por la Universidad Pontificia de Comillas-ICADE, además cursó Administración y Dirección de Empresas en la UNED. Desde finales de 2009 colabora con "The Seasteading Institute", un think-tank de Silicon Valley; a su vez, prepara su Tesis Doctoral sobre el mismo tema. mlamas@seasteading.org

El comportamiento en la mar de estructuras flotantes

Palabras clave: ingeniería naval, comportamiento en la mar y diseño de buques.

Key words: naval engineering, seakeeping, ship design.

Abstract:

Seakeeping ability is a measure of how well-suited a floating structure is to conditions when underway. A ship, boat, vessel or any other floating structure which has good seakeeping ability, is said to be very seaworthy and is able to operate effectively even in high sea states.

Resumen:

El comportamiento en la mar (seakeeping en inglés) es una medida de la capacidad que tiene una estructura flotante para adaptarse a las condiciones a las que está sometida. Un barco, bote, barcaza, plataforma o cualquier otra estructura flotante que tenga buena capacidad de comportamiento en el mar; se dice que es muy "marinera" y por tanto es capaz de desempeñar su propósito de forma efectiva, incluso en estados de la mar adversos.

En el famoso grabado de la figura 1 (la Gran Ola de Kanagawa, del artista japonés Katsushika Hokusai, 1823-1829) podemos ver cómo una pequeña barca de pesca es capaz de sobrevivir a grandes olas, pero está lejos de ser una condición confortable para el pescador que va a bordo. Estas dos ideas diferentes, supervivencia y confort, son las ideas críticas a tener en mente en el diseño de cualquier estructura flotante. En principio, la primera de ellas, la supervivencia, ha sido ampliamente estudiada en la ingeniería naval desde hace décadas, con los criterios de estabilidad intacta, e incluso con los criterios de estabilidad tras averías cuando la estructura era dañada. No obstante, la idea de que una estructura ha de ser confortable solamente se ha empezado a desarrollar recientemente, gracias en parte a las nuevas aplicaciones informáticas que permiten predecir, de forma bastante fiable, el comportamiento de la estructura cuando se somete a un cierto estado de la mar:

El comportamiento en la mar: espiral de diseño de estructuras flotantes

Diseño de buques

El comportamiento en la mar impacta directamente en el diseño del

buque. Al determinar las dimensiones principales y al desarrollar las disposiciones generales de los espacios internos se tienen en cuenta los movimientos del buque. Por ejemplo, en la mayoría de los buques las partes más hacia proa experimentan los peores movimientos y normalmente no son aceptables para disponer de camarotes, ni de pasajeros, ni de tripulación. En casos excepcionales, donde los movimientos del buque suponen una amenaza para la tripulación, estructura o maquinaria, o cuando los movimientos del buque interfieren con la capacidad del buque para cumplir su misión, el diseño ha de ser modificado de manera que los movimientos del buque se vean reducidos.

Para ilustrarlo mejor dentro de todo el proceso de diseño del buque, presentamos la espiral de diseño (figura 2). La espiral describe el proceso como una secuencia de disciplinas específicas de diseño, tanto de síntesis (por ejemplo la geometría del casco, disposición) como de analítica (por ejemplo, estabilidad, comportamiento en la mar), con el objeto de alcanzar un diseño equilibrado que cumpla los requerimientos. La espiral ilustra muy bien importantes características del proceso de diseño, como la interactividad y la elaboración progresiva del diseño. Sin embargo, la espiral represen-

ta el proceso a un nivel macroscópico. Algunas de esas disciplinas incorporan cientos de actividades; el comportamiento en la mar es un buen ejemplo de ello.

En relación con el comportamiento en la mar, la comparación entre diferentes diseños o la evaluación de un diseño concreto contra criterios específicos depende de una información precisa relacionada con tres conceptos que describiremos en las siguientes secciones. La evaluación del comportamiento en la mar depende fuertemente del ambiente marino al que los buques están sujetos y los criterios que se usan para comparar dichos diseños. Ésta es una de las razones por la que comparar comportamientos en el mar es mucho más complicado que comparar resistencia al avance en aguas tranquilas o requerimientos de potencia para alcanzar una velocidad determinada. Ello implica que el análisis de comportamiento en la mar sea un problema mucho más difícil comparado con el de resistencia en aguas tranquilas, y hasta hace muy poco haya jugado un pobre segundo lugar en el diseño hidrodinámico preliminar para la mayoría de los buques.

Esto es particularmente cierto en la flota mercante, siendo la evaluación del comportamiento en la mar del buque abordado relativamente tardía en la espiral de diseño (como se ve en la figura 2) por medio de caros modelos a escala ensayados en canales de experiencias. De hecho, las características de comportamiento en la mar del buque dependen de tantos factores interrelacionados que es virtualmente imposible decir lo que pasará si se hace un cambio específico a las formas del casco sin hacer un análisis detallado razonable. Esto es porque el comportamiento en la mar de un buque depende no sólo de la respuesta en movimientos del casco, sino también del entorno marino en el que éste se encuentra y del criterio contra el que se evalúa el buque (los tres conceptos principales que serán desarrollados más adelante). Afortunadamente, los diseñadores tienen hoy en día varias herramientas para la evaluación del comportamiento en la mar;

Figura 2. Espiral genérica de diseño del buque



ideales para un diseño preliminar. Con estas herramientas se pueden comparar fácil y rápidamente un gran número de diseños candidatos, de los cuales se selecciona el mejor. Los programas informáticos de comportamiento en la mar son suficientemente sofisticados y los ordenadores, hoy en día, lo suficientemente potentes como para analizar un diseño potencial en cuestión de minutos; dicha evaluación no podría hacerse en un canal de experiencias con tanta agilidad.

Con el análisis adecuado es posible, por tanto, optimizar una forma de un casco para rutas específicas (las condiciones de la mar que el buque probablemente se encuentre en esas rutas) y las características que son importantes para completar con éxito la misión del buque. Por ejemplo:

- Un buque de carga puede ser optimizado para reducir la resistencia al avance.
- Un buque de pasaje puede ser optimizado para el confort del pasaje.
- Un buque de guerra podría ser optimizado para minimizar el movimiento en la cubierta helicóptero.

Cada una de las partes del problema que describiremos más adelante —entorno marino, respuesta en movimientos y criterios— es de igual importancia; sin embargo, quizás la tercera es la menos comprendida y requiere una consideración cuidadosa.

Industria offshore

Podemos ver que el comportamiento en la mar es el último proceso en la espiral de diseño de los buques y que, hasta hace poco, ha sido relegado a un segundo plano, lo que podría suponer un problema en algunos buques donde el comportamiento en la mar es un factor clave. Ése es el caso de las estructuras offshore y cualquier otra estructura diseñada para mantener la posición en una localización determinada durante la vida completa de la estructura, en las que, por tanto, la resistencia y la propulsión no son ya factores claves como en los buques tradicionales.

La seguridad y disponibilidad de las estructuras offshore, diseñadas para un propósito determinado en

una localización concreta, dependen ampliamente de sus capacidades de comportamiento en la mar. El ingeniero naval ajusta estas capacidades durante el proceso de diseño adoptando dimensiones y forma del casco y distribución de los pesos. Todas estas propiedades son fijadas de forma extensa durante las etapas de diseño más tempranas. Para evitar cambios costosos en etapas más tardías, el diseño tiene que chequearse con los requerimientos de las sociedades de clasificación y los límites admisibles para una operación eficiente. Normalmente, los ingenieros diseñan el casco de forma interactiva, moviendo los vértices y líneas, y usando un sistema de diseño asistido por ordenador, CAD. Solamente después de la evaluación de la forma ya completa del diseño de la carena, se conocen parámetros relevantes como el desplazamiento, centros de flotación, etc. Las características de comportamiento en la mar se evalúan en un paso separado. Los procesos de cambios interactivos de geometría y las evaluaciones se repiten hasta que el diseño cumple con los requerimientos. Por tanto, la espiral de diseño de una estructura offshore es diferente a la de un buque. La figura 3 muestra un ejemplo de la espiral de diseño de una estructura semisumergible (Clauss, 2001).

Los tres principales problemas/conceptos para comprender el comportamiento en la mar

En general, como hemos visto, la capacidad operativa de barcos y estructuras offshore depende del comportamiento en la mar en las áreas específicas para las que se ha diseñado que opere el artefacto. Dada una área concreta de operación, el porcentaje de tiempo que el buque operará en condiciones apropiadas a su misión en un estado de la mar particular se puede determinar a partir de una base de datos oceanográfica y posteriormente a través de la aplicación del concepto del R.A.O. (Response Amplitude Operators), que es una función de transferencia que define la respuesta del buque a ese estado de la mar particular. La predicción de respuesta en movimientos se comparará con los criterios límite de movimientos para obtener los índices de operatividad. Sin embargo, los índices de operatividad están afectados fuertemente por la elección de dichos criterios límite.

Es decir, el procedimiento para evaluar el comportamiento en la mar está basado en la probabilidad de exceder unos movimientos de respuesta del buque en un entorno marino particular y que los tres mismos conceptos explicados en la sección



anterior sean compatibles con la misión del buque. Por tanto, se requiere describir los tres conceptos principales para comprender el comportamiento en la mar de un artefacto. O en otras palabras, el análisis de comportamiento en la mar es esencialmente un problema que consta de tres partes.

Primer problema/concepto: el entorno marino

Se trata de realizar la estimación de las condiciones del entorno marino que probablemente se vaya a encontrar el buque. Esto incluye tanto el estado de la mar; como la velocidad del viento, corriente... o una combinación de dichas condiciones en una determinada región geográfica. Las bases de datos oceánicas y los espectros de olas obtenidos a partir de ellas definen el ambiente marino.

Segundo problema/concepto: la respuesta en movimientos del buque

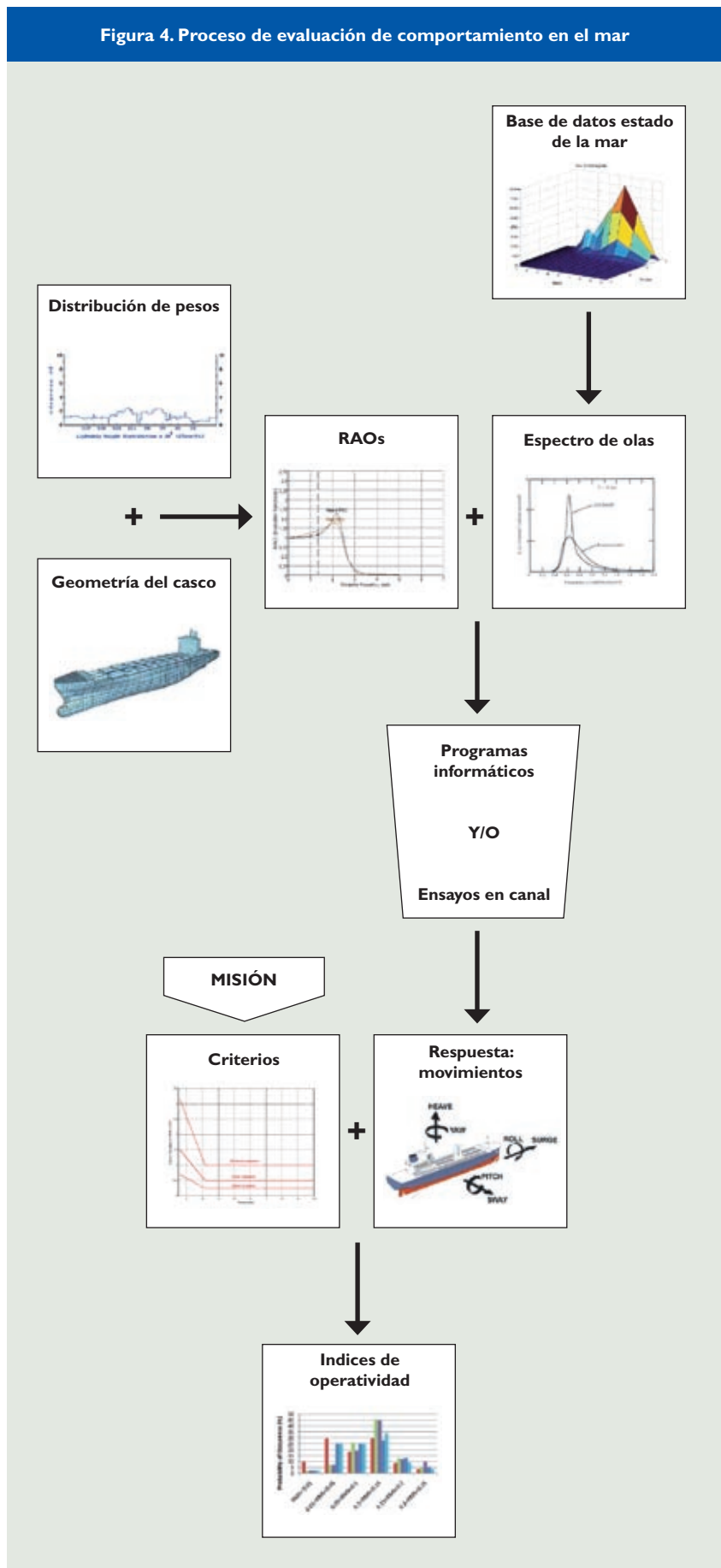
Se trata de predecir la respuesta del buque en forma de movimientos a las condiciones del entorno marino. Las respuestas son una función de:

- 1.- Las condiciones de diseño del estado/entorno marino descritas anteriormente, que proporcionan el espectro de olas.
- 2.- Las características del buque: geometría del casco (carena) y distribución de pesos, que dan la función de transferencia (RAO), que es usada para evaluar el movimiento de un buque en los seis grados de libertad.

Según hemos comentado anteriormente, hoy en día los ordenadores han facilitado este problema, con varios programas comerciales disponibles. En el pasado, la única opción eran los ensayos en canales de experiencias, pero no eran asequibles en la mayoría de los proyectos.

Tercer problema/concepto: misión del buque y criterios límite

Consiste en definir la misión que el buque tiene intención de acometer; a partir de ella se obtiene el criterio usado para evaluar el comportamiento



del buque en la mar. Estos criterios, por tanto, también definen la manera por medio de la cual se compara el funcionamiento de diferentes buques con misiones similares. La misión es el papel que ha de desempeñar el buque mientras está en la mar; y su cumplimiento o no viene dado por los criterios límite de movimiento: los límites establecidos para la respuesta del buque. Éstos están basados en los movimientos del buque y las aceleraciones experimentadas e incluyen:

- Criterios de confort tales como ruido, vibración y mareas.
- Valores basados en el desempeño, tales como reducciones involuntarias de la velocidad.
- Fenómenos observables tales como inmersión de la proa.

Claramente, un buque de perforación y un ferry tienen diferentes misiones y operan en diferentes entornos. Los criterios de comportamiento también serán diferentes. Ambos pueden ser considerados “marineros”, aunque por diferentes razones basados en criterios distintos. En el caso de un ferry o cualquier otro buque de pasaje, el criterio lo conforman los límites de habitabilidad.

Evaluación del comportamiento en la mar

Una vez que hayamos resuelto los tres problemas anteriores, entonces estaríamos en posición de llevar



a cabo la evaluación del comportamiento en la mar para obtener los índices de operatividad.

La figura 4 muestra de forma resumida el proceso de evaluación de comportamiento en el mar:

Ejemplo. Buque de acomodación offshore “Dan Swift”

Para entender mejor el proceso mostramos a continuación de forma breve un caso de cómo se evalúa el comportamiento en la mar. Se trata de un buque de acomodación offshore, y

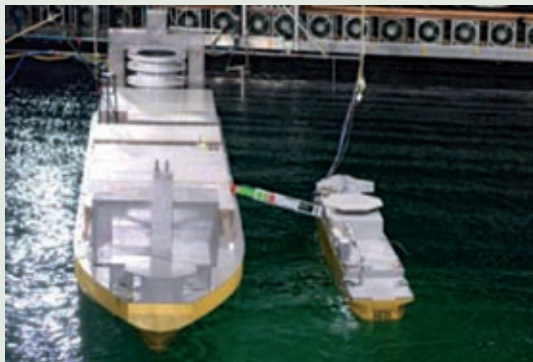
que está a medio camino entre un buque de pasaje y un artefacto offshore. Pero en él, el comportamiento en el mar es vital, ya que, como se verá a continuación, está diseñado para permanecer en una posición determinada de la costa de Brasil, proporcionando en todo momento confort como hotel flotante, sin importar las condiciones del entorno marino.

Misión y criterios

El buque se usa para proporcionar servicios de hotel al personal que trabaja a bordo de plataformas petrolíferas y buques de procesamiento y almacenamiento (FPSO). La transferencia de personal se hace por medio de una pasarela flexible entre el buque y la plataforma. El esfuerzo máximo de esta pasarela es un factor importante en el tiempo de inactividad de la misma, ya que impide el paso del buque de acomodación a la plataforma y viceversa. El sistema de posicionamiento dinámico (Dynamic Positioning System) está controlado de manera que trata de limitar el esfuerzo, permitiendo que el buque de acomodación acompañe el movimiento del punto de conexión de la pasarela en la plataforma. Por tanto la misión del buque, además de proporcionar confort como hotel flotante, es la de permitir la transferencia de personal hacia



Figura 7. Ensayo en canal del modelo del buque



Fuente: Lauritzen Offshore A/S [www.j-lauritzen.com]

la plataforma. Los criterios de evaluación serán por tanto de confort y funcionamiento de la pasarela.

Entorno marino

En este caso, el buque está diseñado para operar en "Campos Basin", que es un importante área petrolífera situada a varias millas de la costa de Río de Janeiro (Brasil). La evaluación del comportamiento en la mar se llevó a cabo en las condiciones ambientales medias con el espectro de olas de Campos Basin:

- Viento → 15 m/sec.
- Altura de ola significativa, H_s → 3.5 m.
- Periodo de ola, pico de mar de fondo, T_p → 12.8 sec.
- Periodo de ola, pico de viento, T_p → 9.0 sec.
- Corriente → 1.1 m/sec.

Respuesta del buque

La empresa armadora, Lauritzen, pidió a MARIN (Maritime Research Institute Netherlands) evaluar el comportamiento del buque en la mar, tanto por medio de simulaciones numéricas por ordenador como con ensayos reales a través de modelos en el canal de experiencias de MARIN. La situación bajo consideración fue una en la que el buque hotel tenía que trabajar al lado del típico FPSO fondeado en una torreta anclada al fondo (turret).

1.- Simulaciones numéricas. Se realizaron varias simulaciones numéricas utilizando el RUNSIM (un software de control de posicionamiento

dinámico usado también en ensayos de canal), acoplado al LIFSIM (simulación en el dominio del tiempo para sistemas multicuerpo). En estas simulaciones se tuvieron en cuenta las interacciones hidrodinámicas entre el viento, las olas y la corriente. Mostraron que el concepto era factible y fueron usadas para seleccionar las condiciones ambientales apropiadas y los coeficientes de posicionamiento dinámico para los ensayos reales con modelos.

2.- Ensayos con modelos. Posteriormente se llevaron a cabo ensayos con modelos en el Canal de Ensayos Offshore de MARIN, combinando viento, olas, corriente y mar de fondo. Se dispuso un modelo a escala 1:33 de todo el sistema: el buque de acomodación situado junto a un FPSO fondeado a torreta a 200 m de profundidad. Se consideraron varias direcciones del estado de la mar y condiciones ambientales, así como velocidades del viento muy altas, varias velocidades de corrientes y chubascos. En todas las pruebas se presentó un mar de fondo significativo en el periodo natural de balanceo del FPSO.

Índices de operatividad

Los índices de operatividad obtenidos fueron los siguientes:

• Tiempo de funcionamiento de la pasarela. Los resultados mostraron que el tiempo durante el cual la pasarela estaría operativa es alto, basado en el espectro de olas de Campos Basin.

Este tiempo durante el cual la pasarela estaría operativa era cercano al 95% del tiempo, mientras que la capacidad para conectarse entre el buque y el FPSO era cercano al 82% del tiempo.

• Confort del pasaje. También se analizaron los índices de mareo MIR (Motion Illness Ratio) y se comprobaron con modelos y estándares europeos actualmente usados para buques ferries. Se mostró que la probabilidad de que el personal a bordo no se sintiera peor que un índice MIR 25, que es un estándar aceptable para la industria, era del 99.6%. ■

Bibliografía

- [1] BIRK, L., & CLAUSS, G. Automated Hull Optimisation of Offshore Structures Based on Rational Seakeeping Criteria. Proceedings of the Eleventh (2001) International Offshore and Polar Engineering Conference. Stavanger, Norway: Tite International Society of Offshore and Polar Engineers, June 17-22, 2001.
- [2] CHAKRABARTI, Subrata K. Handbook of offshore engineering. Amsterdam: Elsevier, 2005.
- [3] COUSER, PAT RICK. Seakeeping analysis for preliminary design. Fremantle, Australia: Formation Design Systems, 2009.
- [4] EL-HAWARY, Ferial. The ocean engineering handbook. Boca Raton: CRC Press, 2001.
- [5] FRIEDMAN, Patri; GRAMLICH, Wayne. Seasteading: A Practical Guide to Homesteading the High Seas. Palo Alto, California-USA: The Seasteading Institute, June 2009.
- [6] GERWICK, Ben C. Jr. Construction of marine and offshore structures. San Francisco, California: CRC Press - Taylor & Francis Group, LLC, 2007.
- [7] HANCOX, Michael. Barge Mooring. Londres: Oilfield Publications Limited, 1998. (The Oilfield Seamanship Series: Volume 6).
- [8] MALESCI, C. Use of Seakeeping Simulation Capabilities in the Preliminary Phase of the Design of Multihull Vessels. U.S.: Massachusetts Institute of Technology, June 2006.
- [9] MATHER, Angus. Offshore engineering an introduction. Londres: Witherby & Company Limited, 1995.
- [10] PARDO BUSTILLO, Miguel (Editor in Chief); Economía Marítima. Madrid: Instituto Marítimo Español (IME) y Fondo Editorial de Ingeniería Naval, 2009.
- [11] SARIÖZ, K., & NARLI, E. Effect of criteria on seakeeping performance assessment. Ocean Engineering, 1161-1173, 2005.
- [12] STOPFORD, Marin; Maritime Economics. Oxon, Inglaterra: Routledge, 2009.