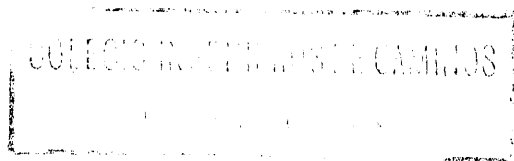


Diseño interactivo del sistema vehículo marino/dominio fluido (*)



Agustín Sánchez-Arcilla Conejo

Doctor Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
Escuela T. S. de Ingenieros de Caminos, C. y P.
Universidad Politécnica de Barcelona.

Este artículo es el primero de un conjunto de tres. El objetivo global es desarrollar un modelo que permita estudiar el movimiento y control de vehículos marinos en zonas costeras. Consecuentemente, este modelo será útil tanto para el diseño de los vehículos marinos como para el de las zonas costeras en que éstos evolucionan.

En este primer artículo será planteado el problema desde los puntos de vista de la ingeniería científica y práctica y serán perfiladas las herramientas de solución actualmente utilizadas.

En el segundo se analizarán con detalle los principios físicos e hipótesis simplificativas en que están basados los modelos matemáticos más frecuentemente empleados.

En el tercero será expuesto el modelo desarrollado por el autor.

1. INTRODUCCION

Los problemas asociados al movimiento y control de vehículos marinos interesan a dos tipos de especialistas: por una parte, al ingeniero que diseña el vehículo o estructura; por otra, al encargado del diseño de las zonas de agua restringidas que el vehículo utilizará (bocanas de puerto, canales de acceso, etcétera). Hasta hace unos pocos años el problema general se subdividía en dos:

- i) El movimiento de vehículos (que normalmente eran buques convencionales) en mar abierto y sometidos a la acción del oleaje. En este caso, la principal dificultad proviene de las características altamente irregulares del oleaje, que obliga a utilizar técnicas probabilísticas para abordar el tema.
- ii) El movimiento de vehículos en zonas restringidas (puertos, fjords, vías interiores de navegación, etcétera), en las que no existen perturbaciones de tipo irregular, como el oleaje. En este caso el problema deriva de la influencia que sobre el movimiento del vehículo ejercen: bajos, paredes laterales, otros vehículos próximos, etcétera.

En la actualidad, el continuo aumento del tamaño de los buques convencionales y la realización de actividades petrolíferas alejadas de la costa han obligado a plantear un problema combinación de (i) y (ii).

El motivo es que ahora se trabaja en mar abierto con estructuras de dimensiones similares a la zona fluida en que evolucionan. Por tanto, el movimiento de la estructura es afectado por:

- La acción del oleaje.
- La geometría de la zona fluida.

El problema (i) puede considerarse en la actualidad satisfactoriamente resuelto, tanto en el tratamiento de movimientos medidos como en la predicción de movimientos a partir de un oleaje dado. El tratamiento de los movimientos medidos se realiza aplicando las mismas técnicas que en el oleaje o cualquier otro tipo de señal aleatoriamente irregular. Un estado del arte puede encontrarse en Price, Bishop (1974). La predicción de los movimientos a partir de un oleaje dado comenzó con el estudio del movimiento de buques en olas sinusoidales (Korvin-Kroukovsky, 1957). Se obtuvo luego el movimiento en un mar irregular superponiendo los resultados obtenidos para olas sinusoidales, del mismo modo que se obtiene un mar irregular superponiendo trenes de olas sinusoidales. Este tipo de estudio se basa en una discretización en rebanadas transversales

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de mayo de 1982.

del buque, estudiándose el movimiento de cada rebanada en la hipótesis de que el fluido (el agua del mar) sea incompresible y no-viscoso. Es decir, el movimiento del fluido se describe con una función potencial de velocidad. A principios de la década de los 70 el problema estaba satisfactoriamente resuelto, como puede verse en Salvensen et al. (1970).

El problema (ii) se resolvía habitualmente con reglas empíricas basadas en la experiencia de casos similares o empleando modelos matemáticos sencillos del movimiento del vehículo. La hipótesis simplificativa más común es separar los movimientos en el plano horizontal de los movimientos con componente vertical. Los primeros (dos traslaciones y un giro) se utilizan para el estudio en planta de la zona marina considerada. Los segundos para el estudio en sección (obtención del calado necesario, etcétera).

Una diferencia importante entre el problema (i) y (ii) es que en el primer caso los movimientos estudiados son oscilatorios alrededor de una posición media de equilibrio. Es fácil comprenderlo si consideramos que son movimientos inducidos por el oleaje y que el oleaje esencialmente es una oscilación respecto a una situación de equilibrio. Esto puede visualizarse considerando un registro de la superficie del mar como un conjunto de oscilaciones respecto a la situación de equilibrio que sería el plano horizontal del agua antes de ser perturbado. Todo ello es cierto solamente hasta primer orden de aproximación en la variable «elevación de la superficie del mar respecto a la posición de equilibrio».

En el problema (ii), por el contrario, los movimientos estudiados (particularmente los horizontales) tienen un carácter continuado en el tiempo. Es consecuencia de que el vehículo avanza continuamente en el tiempo, i.e. describe una trayectoria.

Esta diferencia entre (i) y (ii) es importante para estudios realizados con un modelo matemático. Naturalmente, otra forma de aproximarse al problema es reproducir la situación de la naturaleza mediante un modelo hidráulico a escala. De las ventajas e inconvenientes de estos modelos se tratará en la sección dedicada al estado actual de la solución.

A continuación (sección 2) plantearemos el problema hidrodinámico de un móvil en una zona fluida restringida. En la sección 3 se englobará este problema en el del diseño interactivo o conjunto del sistema móvil/zona fluida. Finalmente, en la sección 4, se esbozará el estado actual de las distintas herramientas de solución para el problema del diseño interactivo.

2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA INGENIERIA CIENTIFICA

El movimiento de un vehículo marino en una zona fluida se plantea suponiendo que el móvil es un sólido rígido. Los movimientos de este cuerpo se obtienen a partir de las leyes de Newton de la dinámica:

$$\vec{F}dt = M d\vec{X} \quad (1)$$

en donde:

$\vec{F}$: fuerza total que actúa sobre el cuerpo.

$\vec{X}$: vector velocidad del cuerpo.

M: masa del cuerpo.

El problema se reduce entonces a evaluar el vector $\vec{F}$, ya que la integración de (1) para obtener el vector movimiento ($\vec{X}$) no suele ser problemática. La componente fundamental y más complicada de obtener, en $\vec{F}$, es la reacción hidrodinámica del fluido sobre el móvil. Para calcularla se parte de las leyes de conservación de masa y momento (cantidad de movimiento) en el fluido. El problema así planteado no es directamente soluble. Es necesario simplificar. Para ello se desarrollan las variables del problema en serie de potencias de un parámetro pequeño respecto a los demás que intervienen en el planteamiento, de modo que las potencias de orden superior a 1 pueden ser despreciadas. De este modo se consigue un modelo lineal.

Para buques convencionales las hipótesis de cuerpo delgado — relaciones manga/calado y manga/eslora pequeñas respecto a la unidad — o cuerpo esbelto — la relación manga/eslora es pequeña respecto a la unidad — son razonables y permiten linealizar el planteamiento. Para otros tipos de vehículos o estructuras, sin embargo, estas hipótesis no son adecuadas; ejemplos son: una plataforma petrolífera de gravedad durante su traslado, una estructura semisumergible, etcétera. En estos casos es necesario buscar algún otro parámetro o elemento que permita realizar la simplificación.

Una complicación adicional surge de la influencia del contorno sobre los movimientos de la estructura. Esta influencia, antes raramente considerada, debe ser tenida en cuenta en muchos de los problemas a los que hoy se enfrenta la ingeniería marítima: buques navegando en aguas en las que la relación profundidad/calado del buque es inferior a 4 (Van Oortmersen, 1976); operaciones navales realizadas en la proximidad de una estructura (por ejemplo, buques de suministro), plataformas apoyadas en el fondo, etcétera.

Por la complejidad del problema, no existe un modelo matemático suficientemente sencillo para que su solución resulte económica y cuyas hipótesis simplificadoras sean universalmente aceptadas. Por otra parte, el utilizar un modelo hidráulico a escala no es recomendable para problemas hidrodinámicos en dominios fluidos restringidos. El motivo es que, en dominios restringidos, los efectos viscosos no pueden ser despreciados (Tuck, 1978). Por ello, la utilidad de los modelos hidráulicos, en los que estos efectos no son correctamente reproducidos, es dudosa.

Una hipótesis frecuentemente utilizada para simplificar los planteamientos es suponer que la superficie libre es un plano rígido de simetría. Ello equivale a decir que las olas generales en la superficie libre por el movimiento del cuerpo son pequeñas respecto a los demás elementos que intervienen en el problema y pueden ser despreciadas.

Esta hipótesis, utilizada, por ejemplo, por Yeung (1978), es apropiada para resolver problemas en los que el móvil tiene exclusivamente un movimiento lentamente variable respecto de los movimientos oscilatorios en el fluido, en los que la principal fuerza de restauración es la gravedad. Es, por tanto, apropiada para el estudio de la maniobrabilidad naval o para la circulación en vías interiores de navegación en que el móvil desarrolla una velocidad muy baja y está sometido, como única perturbación externa, a acciones de variación lenta: corrientes, por ejemplo.

Sin embargo, no es una hipótesis válida para estudiar los movimientos de un vehículo o estructura sometidos a la acción del oleaje.

Resumiendo, se han esbozado algunas de las dificultades asociadas a los problemas hidrodinámicos en dominios fluidos restringidos. En la próxima sección veremos como este problema es el núcleo fundamental de otro, más amplio y eminentemente práctico: el del diseño conjunto del sistema vehículo/dominio fluido.

3. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DESDE EL PUNTO DE VISTA DE LA INGENIERIA PRACTICA

En esta sección se va a plantear el problema del diseño conjunto del sistema vehículo/dominio fluido. Para ello consideramos: aspectos del vehículo, aspectos de la geometría del dominio fluido (o vía de agua) y aspectos de la estrategia a seguir durante la maniobra (trayectoria «misión», ayudas a la navegación, señalización, etcétera).

Empezaremos, en primer lugar, distinguiendo entre los conceptos de maniobrabilidad y controlabilidad.

La maniobrabilidad es la capacidad, inherente a las características del vehículo, de realizar un determinado movimiento. Es un campo habitualmente estudiado por los ingenieros navales (Abkowitz, 1969). El énfasis del estudio suele estar en los elementos de control y aspectos relacionados de la superficie inmersa del vehículo.

La maniobrabilidad en aguas restringidas es un concepto mixto entre maniobrabilidad y controlabilidad, puesto que tiene en cuenta las características del dominio fluido al evaluar la capacidad para realizar una maniobra. Era un campo relativamente poco estudiado hasta hace unos pocos años. Un estado del arte puede encontrarse en Fujino (1976).

La controlabilidad es un concepto que surge como consecuencia del uso creciente de la zona marítima por vehículos de tamaño comparable a sus dimensiones —i.e. profundidad y dimensiones en planta—. En estos casos, la capacidad de realizar una determinada maniobra no sólo depende de las características del vehículo, sino también de las propiedades estáticas —e.g. topografía— y dinámicas —e.g. perturbaciones del medio ambiente— del dominio fluido así como de las características del sistema de control —i.e. características del procedimiento empleado y del controlador humano que realiza la maniobra.

En la I.T.T.C. de 1978 se desliga claramente el concepto de maniobrabilidad del de controlabilidad, asociando este último al problema del diseño conjunto del vehículo y de la vía de navegación. Es el concepto esquematizado en la figura 1. La idea del diseño interactivo vehículo/vía de navegación es un notable avance respecto a los planteamientos tradicionales que realizaban una clara dicotomía entre la ingeniería naval y la ingeniería civil.

Examinaremos a continuación una serie de casos prácticos que admiten ser englobados dentro del concepto de controlabilidad.

En primer lugar está la navegación de grandes buques en zonas marítimas de tamaño comparable a sus dimensiones. Las principales situaciones que ocurren en la práctica aparecen esquematizadas en la figura 2. El problema es más complejo que el de un buque navegando en mar abierto, debido a que los fenómenos hidrodinámicos en aguas restringidas actúan muchas veces de manera contraria a la intuición y, por otra parte, la efectividad del timón disminuye en zonas fluidas restringidas (Tuck, 1978).

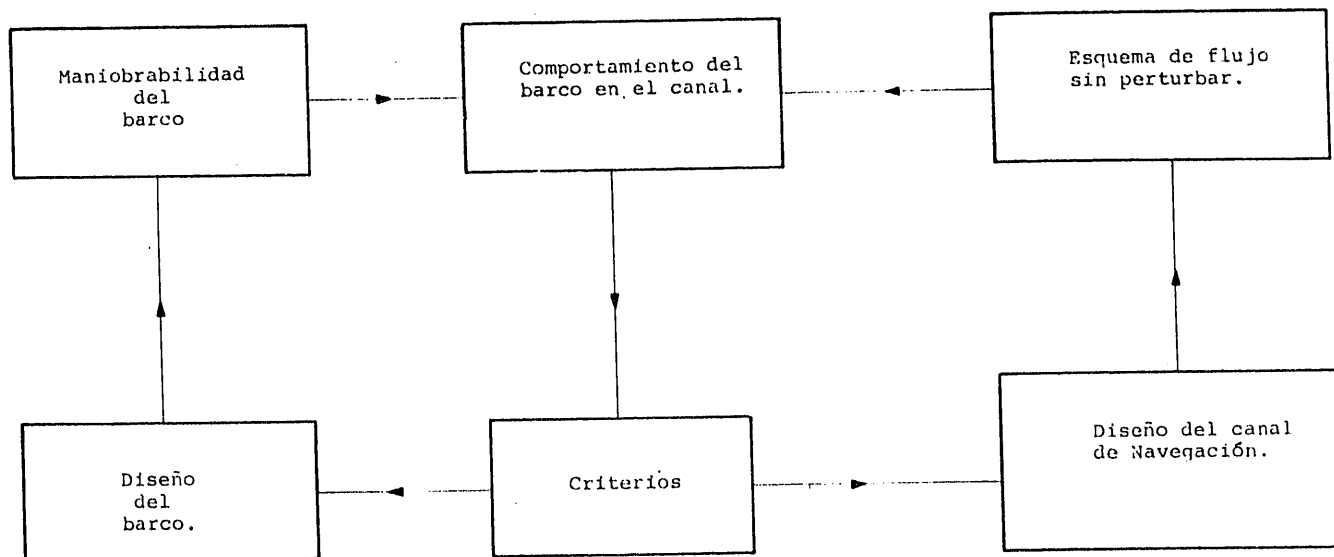
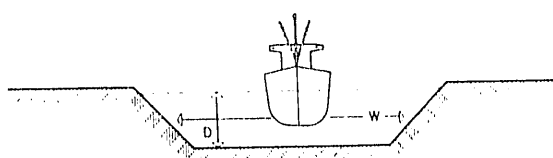
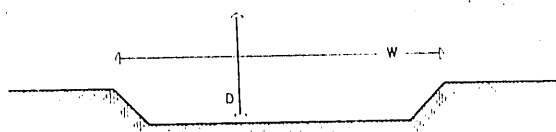


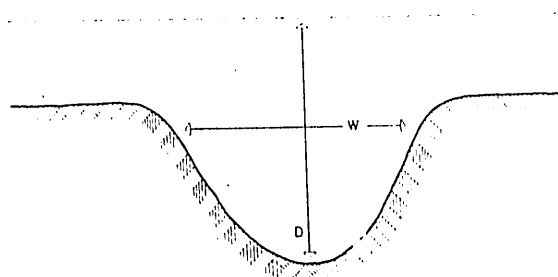
Figura 1: Esquemmatización del concepto de controlabilidad.



Canal de tipo restringido (forma regular).



Canal de tipo abierto (forma regular).



Vía de navegación (forma natural).

FIGURA 2: Esquemmatización de diversos tipos de dominios fluidos restringidos.

Otro subproblema, dentro del concepto controlabilidad, es el remolque de las grandes plataformas petrolíferas de gravedad (Postuma, 1979). También las operaciones del suministro en plataformas petrolíferas (Ohksu, 1976), la navegación simultánea de varios vehículos (Dillingham, 1978), etcétera.

La controlabilidad se refiere a este tipo de problemas. Puede definirse como la capacidad de mover un vehículo marino, en cualquier instante, a la velocidad deseada y según la trayectoria «misión» (Crane, 1978). Lógicamente, esta capacidad viene determinada por todos los factores relacionados con el sistema vehículo/dominio fluido/sistema de control. Para fijar ideas consideramos el problema del diseño de cualquiera de las situaciones que aparecen en la figura 2

El estudio de este sistema admite un triple enfoque:

- a) Fijada la geometría de la vía de navegación, determinar las condiciones límites de paso de una serie de buques.
- b) Fijado un buque tipo, determinar las condiciones límites de paso del buque para una serie de geometrías de la vía de navegación.
- c) Fijados un buque y una vía de acceso, determinar si la maniobra se puede realizar cumpliendo unos criterios de seguridad establecidos (e.g. Curso de Dragado Moderno, The Hague, junio 1977).

Cualquiera que sea el enfoque, el problema del diseño está asociado con el establecimiento de

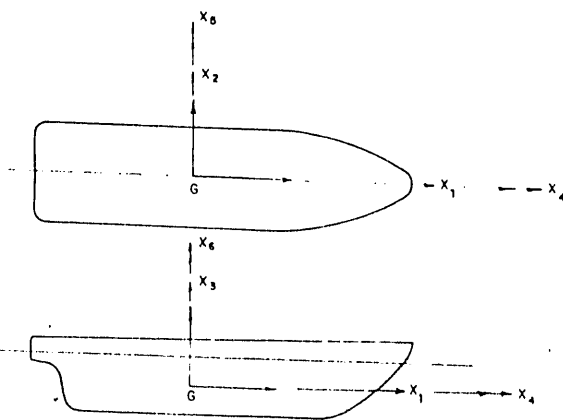


FIGURA 3: Definición de los 6 posibles modos de movimiento de un sólido rígido.

x_1 SURGE	x_4 ROLL
x_2 SWAY	x_5 PITCH
x_3 HEAVE	x_6 YAW

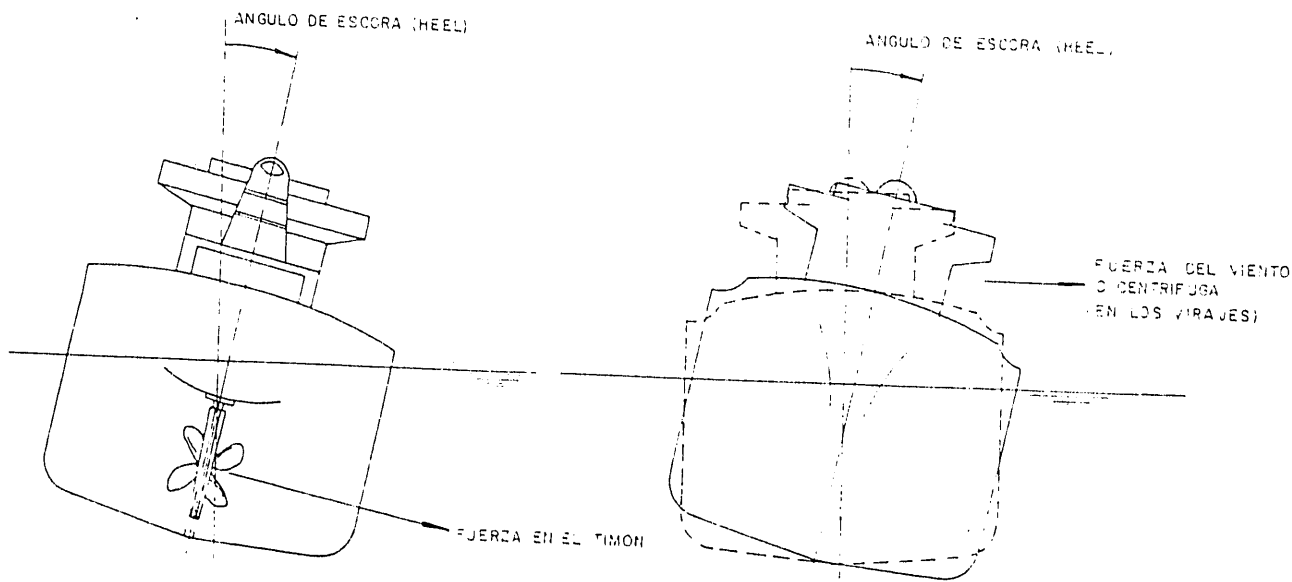
situación real (la maniobra del vehículo). Dicho de otro modo, es necesario obtener los movimientos del buque durante la maniobra. Lo más habitual es calcular separadaemnte los movimientos en el plano horizontal (dos traslaciones y un giro), que suelen demoninarse «trayectoria», y los movimientos con componente vertical (dos giros, «pitch» y «roll», y un desplazamiento, «heave»). La definición de estos movimientos aparece esquematizada en la fig. 3.

El que los dos subproblemas sean tratados desacopladamente es una hipótesis simplifictiva cuya validez es dudosa. Es fácil comprenderlo considerando que cualquier movimiento con componente vertical modifica la geometría de la superficie inmersa y, consecuentemente, todos los demás movimientos.

Desde el punto de vista del diseño es importante diferenciar las componentes estacionarias y transitorias de los movimientos, ya sean «trayectoria» o «con componente vertical». Como ilustración, consideremos los movimientos con componente vertical. Movimientos estacionarios son los que aparecen en las figuras 4, 5, mientras que un ejemplo de movimiento transitorio aparece en la figura 6.

En resumen, el diseño del sistema vehículo/dominio fluido se realiza con una muestra de movimientos obtenida con un modelo hidráulico o nu-

unos criterios para determinar riesgos y condiciones límites aceptables durante el paso del vehículo por la zona de agua considerada. Estos criterios sólo pueden ser aplicados si se dispone de un modelo (hidráulico o numérico) que reproduzca la



ROLL ESTACIONARIO DE UN BUQUE DEBIDO A UNA PERTURBACION ESTACIONARIA

FIG. 4

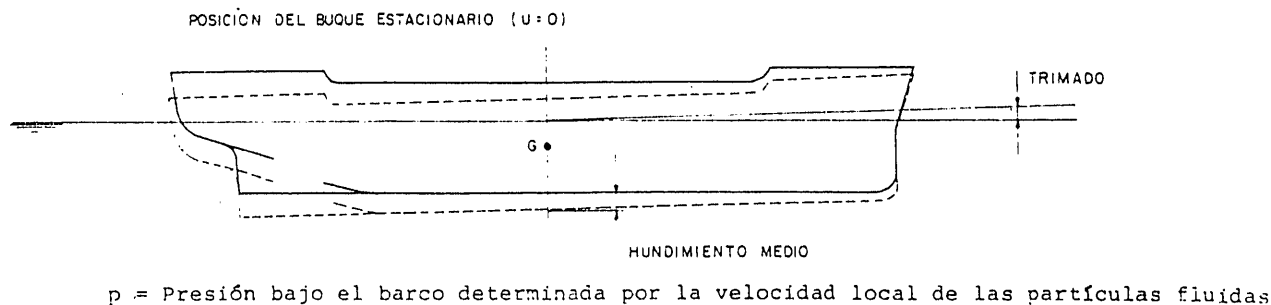


FIGURA 5 Hundimiento y trimado (estacionarios) de un buque navegando en aguas poco profundas

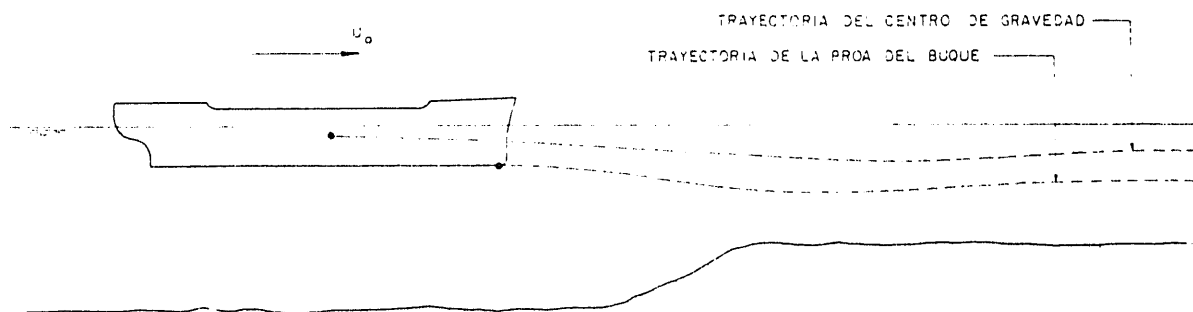


FIGURA: 6 Hundimiento no estacionario de un buque debido a una perturbación en la geometría del dominio fluido.

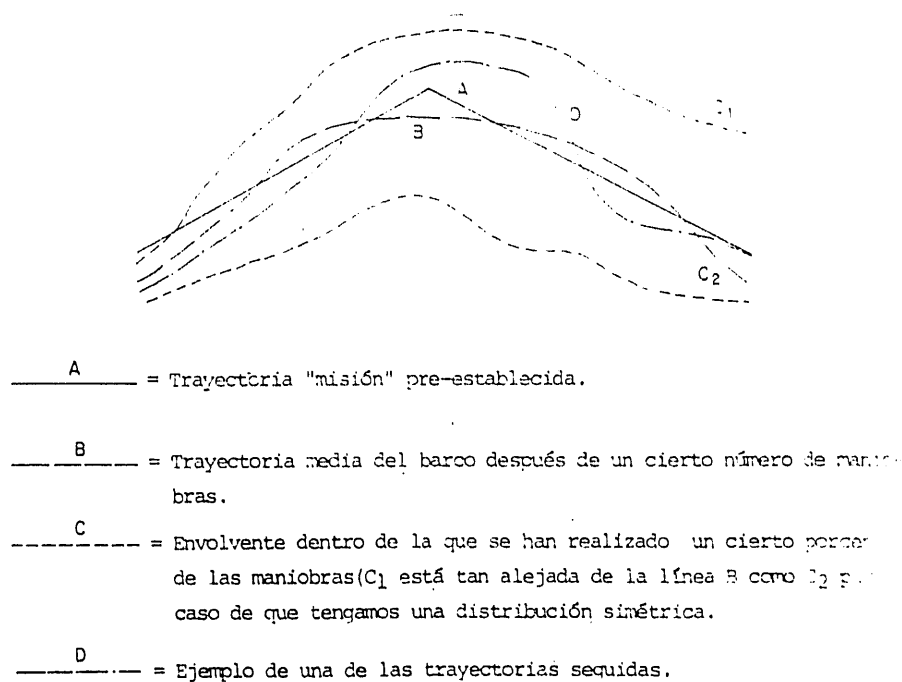
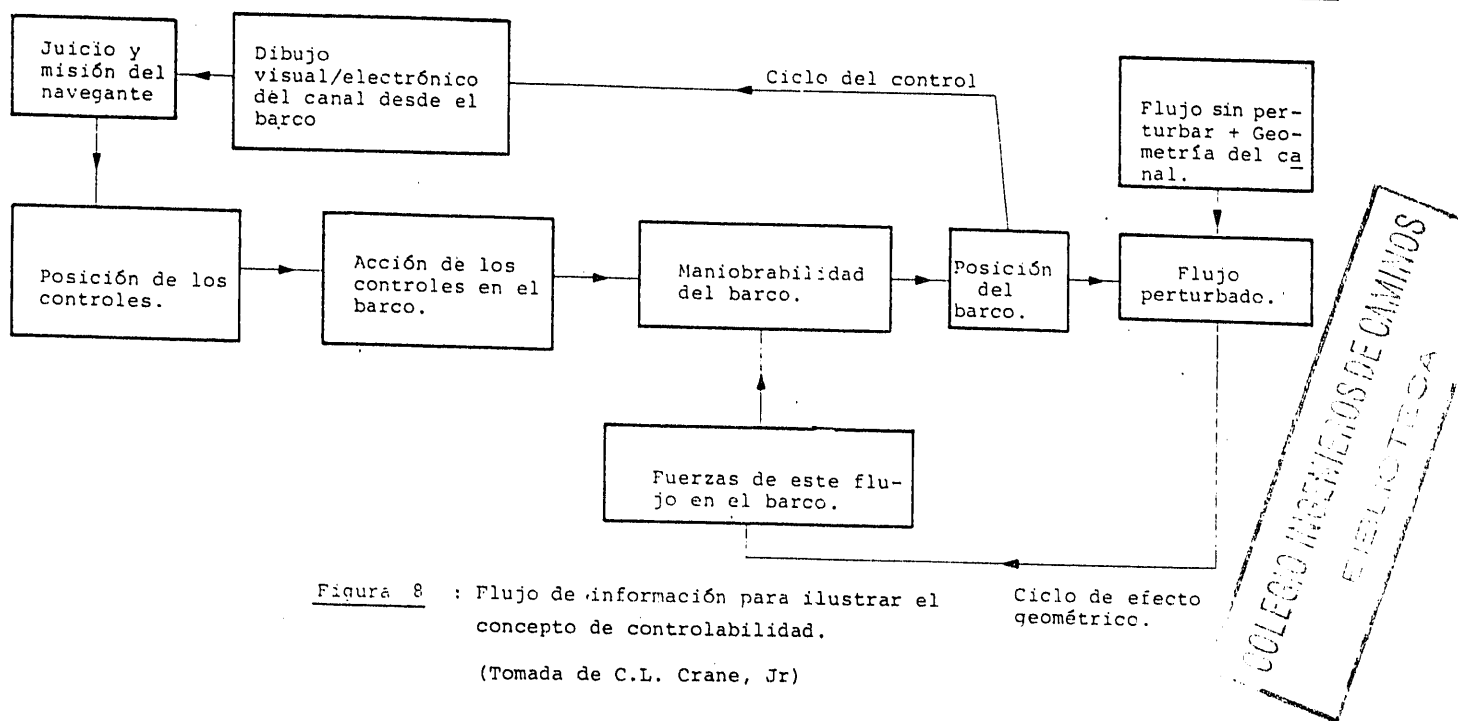


FIGURA 7 Conceptos para la descripción del comportamiento del buque controlado.

DISEÑO INTERACTIVO DEL SISTEMA VEHICULO MARINO/DOMINIO FLUIDO



mérico. Los movimientos recibirán distinto tratamiento según sean horizontales o verticales, estacionarios o transitorios. Una esquematización de los conceptos necesarios para la descripción del comportamiento horizontal de un buque aparece en la figura 7. Estudiaremos ahora, brevemente, los factores que determinan los movimientos del cuerpo en el dominio fluido. Suelen dividirse en dos grupos o bucles: bucle de control y bucle de efecto geométrico. En el bucle de control se incluyen:

- La comparación entre la posición real del buque y la posición deseada.
- La toma de decisiones por el navegante.
- Ordenes a timón y máquinas («controles»).
- Reacción del fluido sobre los controles.

En el bucle de efecto geométrico se incluye la reacción hidromecánica sobre la superficie inmersa del buque. Esta reacción se calcula teniendo en cuenta:

- La geometría del dominio fluido.
- La presencia del cuerpo.

Estos conceptos aparecen esquematizados en la figura 8 para el caso de un buque navegando por un canal de acceso a puerto.

Obsérvese que, en esta figura, la única fuente de aleatoriedad proviene del elemento «toma de decisiones por el navegante». En la naturaleza, sin embargo, existe otra fuente de aleatoriedad: las perturbaciones ambientales (particularmente el oleaje). Este efecto no es incorporado habitualmente al

concepto de controlabilidad, pese a que, como se razonó anteriormente, es necesario hacerlo en multitud de casos prácticos para modelar adecuadamente el problema real.

En la próxima sección se describirán los distintos modos de aproximarse al diseño interactivo del sistema vehículo/dominio fluido.

4. GENERALIDADES SOBRE EL ESTADO ACTUAL DE LA SOLUCION

Hasta hace pocos años el problema de la controlabilidad era estudiado (de forma simplificada, como ya se ha indicado) separadamente por arquitectos navales (Burcher, 1972), e ingenieros civiles (Dand, 1973).

En el primer caso era la maniobrabilidad del buque el objeto fundamental del estudio, basado en ensayos en modelo reducido. En el segundo caso se empleaban modelos hidráulicos simplificados para obtener magnitudes como resguardo bajo la quilla, hundimiento y trimado. A esto se incorporaban, para el diseño en planta, los resultados obtenidos en los estudios de maniobrabilidad. Todo ello, en el mejor de los casos, desde un punto de vista semiempírico.

La situación ha cambiado y, actualmente, hay al menos siete métodos que permiten obtener información respecto al problema de la navegación en dominios fluidos restringidos. Se pueden agrupar en tres categorías: experiencia, experimentación y cálculo.

Métodos basados en la experiencia

— Práctica documentada. Es decir, se realiza una generalización de los parámetros fundamentales y su relación con los factores limitativos del problema, a partir de casos existentes ya resueltos (Pianc, 1977%).

— Seguimiento rutinario de vehículos. Las decisiones se basan en datos acumulados sobre trayectorias, velocidades, acciones de control, etcétera, en determinadas situaciones, bien conocidas.

Métodos basados en la experimentación

— Ensayos especiales con vehículos marinos, realizados en prototipo, para resolver cuestiones específicas: por ejemplo, determinar si un tipo de buque prefijado puede navegar con seguridad por una determinada vía (A.T.A. Wride, 1975).

— Modelos hidráulicos de la vía de agua y el vehículo. Por ejemplo, el descrito por Barbier et al., del puerto de Dunkerke (Barbier, 1978).

— Simulación en tiempo real del comportamiento del piloto humano, incluido en una simulación numérica del vehículo y vía de agua (A. Postuma, 1979).

Métodos basados en el cálculo

— Máxima variación. Son métodos para analizar las interacciones entre controlador humano y ayudas a la navegación. El cálculo permite obtener los movimientos esperados del vehículo respecto a la misión.

— Simulación computacional total, en la que, además del modelo matemático del sistema vehículo/vía de agua, existe una simulación numérica del sistema de información, toma de decisiones y demás elementos del sistema de control.

Se van a examinar ahora, brevemente, las ventajas e inconvenientes relativos de cada uno de los siete métodos descritos. En la figura 9 se presenta la capacidad de cada método para tratar los factores que influyen en el control del móvil. El concepto «implícito» significa que, aunque el factor está presente, sucede de manera tal que sus efectos no pueden ser individualmente estudiados. «Variable» significa que el factor puede ser fácilmente variado para estudiar su influencia. «Identificado» significa que los efectos individuales de un factor pueden distinguirse, pero no pueden ser fácilmente variados para el estudio.

Obsérvese que la columna «Medio Ambiente» se

Figura 9: Comparación general entre los métodos que permiten estudiar la controlabilidad
(Tomada de C.L. Crane, Jr.).

FACTORES DE CONTROL- BILIDAD MÉTODO	FACTORES DE LA VÍA DE NAVEGACION							FACTORES DEL BUQUE		
	VIA DE NAVEGACION			Medio Ambiente	Tráfico	Ayudas Navegación	Explo- tación	Casco Máquina Carga	Controles	Controlador Humano
	Anchura	Topografía	Corriente							
<u>EXPERIENCIA</u>										
Práctica documentada (e.g. PIANC)	Ident.	Implícito	Limitado	Implícito	Implícito	Implícito	Implícito	Ident.	Implícito	Implícito
Seguimiento Rutinario	Ident.	Ident.	Ident.	Implícito	Implícito	Ident.	Implícito	Ident. (Posible)	Implícito	Implícito
<u>EXPERIMENTACION</u>										
Ensayos especiales con buques	Ident.	Implícito	Limitado	Ident.	Ident.	Ident.	Limitado	Ident.	Ident.	Ident.
Modelos Hidraulicos	Variable	Variable	Variable	Variable	Paso Limitado	Limitado	Limitado	Variable	No Aplicable	Limitado
Simuladores de tiempo real	Variable	Limitado	Limitado	Variable	Variable	Variable	Variable	Variable	Directo y Variable	Directo y Variable
<u>CALCULO</u>										
Máxima Variación	No Aplicable	No Aplicable	Limitado	Solo vi- sibilidad	No Aplicable	Variable	No Aplicable	Limitado	Limitado	Efectos Sim- plificados
Simulación Numérica total	Variable	Limitado	Limitado	Variable	Potencial	Variable (Potencial)	Potencial	Variable	Limitado (Efectos)	Simplifica- do (Inves- tigación)

DISEÑO INTERACTIVO DEL SISTEMA VEHICULO MARINO/DOMINIO FLUIDO

Figural0: Capacidad relativa de los tres principales métodos para reflejar los factores significativos del problema (Tomada de C.L. Crane Jr.).

M E T O D O Factores de Controlabilidad	MODELOS HIDRAULICOS		Simulador en tiempo - real	Simulación Numérica Completa
	Controlados a distancia	Pilotados		
<u>CONFIGURACION DE LA VIA DE AGUA</u>				
Contornos del Canal	Alta	Alta	Alta	Alta
Topografía	Alta	Alta	Baja	Baja
Corrientes	Alta	Alta	Media	Media
<u>CARACTERISTICAS DEL BUQUE</u>				
Dimensiones Horizontales	Alta	Alta	Potencial	Potencial
Calado y condición de carga	Alta	Alta	Alta	Alta
Capacidad de mantener rumbo	Alta	Alta	Alta	Alta
Capacidad de viraje	Alta	Alta	Alta	Alta
Capacidad de Acelerac./Decelerac.	Alta	Alta	Alta	Alta
<u>CONDICIONES MEDIO AMBIENTE</u>				
Vientos	Media	Media	Alta	Alta
Condiciones de luz	Nula	Media	Alta	Limitada
Visibilidad restringida	No aplicable	Nula	Alta	Potencial
<u>AYUDAS A LA NAVEGACION (EXT)</u>				
Localización/Resolución/Profundidad	Nula/Nula/Nula	Alta/Alta/ /Baja	Media/Media/Baja	Potencial
<u>AYUDAS NAVEGACION (INT)</u>	Nula	Nula	Alta	Potencial
<u>TRAFICO</u>	Baja	Media	Alta Potencial	Limitada
<u>EXPLOTACION</u>	Baja	Baja	Alta	Potencial
<u>VARIACION DEL CONTROL HUMANO</u>	Nula	Baja	Alta	Nula

Figural1: Aspectos prácticos de los métodos que permiten estudiar la controlabilidad (Tomada de C.L. Crane, Jr.).

Método práctico	Práctica Documentada (PIANC)	Seguimiento rutinario de buques	Ensayos especiales con barcos.	Modelos hidráulicos.	Simulador en tiempo real.	Método de la máxima variación	Simulación Numérica Completa.
Estado de desarrollo	Desarrollada	Progresando	Desarrollada.				Progresando
Capacidad de predicción para grandes cambios	NO			SI			
Transferencia entre situaciones similares.	SI	Posible					
Coste y Tiempo	Muy bajo	Muy bajo	Bajo a Alto	Alto	Medio	Bajo	Bajo a Medio

refiere a factores tales como visibilidad, oscuridad, etcétera. No incluye las acciones hidrodinámicas sobre el buque. Por tanto, estos modelos sólo consideran como perturbación ambiental la acción de las corrientes.

Las ayudas a la navegación y las reglas de explotación son elementos centrales en los estudios de controlabilidad. Dada su íntima relación con el controlador humano, son los simuladores de tiempo-real los más aptos para el estudio de su influencia. El potencial que en este campo se espera de la simulación numérica total no está aún desarrollado (Hooft, 1974).

Respecto a los factores asociados al vehículo —buque, en este caso— son los métodos numéricos totales o simuladores en tiempo real, junto con los modelos hidráulicos, los más aptos para su estudio.

Los «controles», dentro del epígrafe «factores del buque», indican las ayudas a la navegación —naváids— instaladas en el buque. Los simuladores en tiempo real son la herramienta óptima para el estudio de este factor, ya que incluso se ha hecho uso de esta facilidad para mejorar los instrumentos de control del puente.

El control humano está implícito en los métodos basados en la experiencia. Los modelos hidráulicos a este respecto presentan una grave deficiencia. Se debe a que son modelos ajustados según la ley de similitud de Froude, por lo que las acciones ocurren más rápidamente que en el prototipo, siendo el factor deformador la raíz cuadrada de la escala geométrica empleada. Diversas soluciones para resolver este problema han sido propuestas (Crane, 1978), pero sin lograrlo. Reconociendo la existencia de esta dificultad se desarrollaron los simuladores de maniobras, especialmente aptos para estudiar el factor del control humano.

La simulación numérica total intenta representar las características del control humano matemáticamente. Sin embargo, las interacciones con otros factores, las acciones de anticipación y los efectos de memoria son difíciles de entender y representar. Es, posiblemente, la tarea más difícil en todo el campo de la controlabilidad naval y el motivo de que los simuladores en tiempo real presenten grandes ventajas sobre la simulación numérica total.

En la figura 10 se presenta una tabla más detallada, describiendo las capacidades relativas de los

modelos hidráulicos, simuladores en tiempo real y simuladores numéricos totales.

En la figura 11 se refleja la capacidad de cada método para tratar diversos aspectos prácticos. Obsérvese que todos los métodos, salvo el seguimiento rutinario de buques y la simulación numérica total, se consideran esencialmente desarrollados, si bien refinamientos de cálculo están siendo continuamente incorporados.

5. REFERENCIAS

1. ABKOWITZ, M. A. 1969. Stability and motion control of ocean vehicles. M.I.T. Press.
2. BARBIER, QUATRE, LEPETIT AND DAVESNE. 1978. Physical model study of the navigation conditions of harbour approaches and entrances. Symp. on Navigability. Delft.
3. BURCHER, R. K. 1972. Developments in ship manoeuvrability. The naval Architect (R.I.N.A.).
4. CRANE, C. L. Jr. 1978. State of the art on how to include human control into the method of investigation. Symp. on Navigability. Delft.
5. DAND, I. W. 1973. The squat of full ships in shallow water Meeting of the R.I.N.A. in April 1973.
6. DILLINGHAM, T. J. and WEBSTER, W. C. 1978. Some aspects of ship manoeuvrability as applied to the problem of collision avoidance. Symp. on Navigability. Delft.
7. FUJINO, M. 1976. Manoeuvrability in restricted waters: state of the art. Dept. Nav. Arch. Mar. Eng. Rep. No. 184. Univ. of Michigan.
8. HOOFT, J. P. 1973. Manoeuvring large ships in shallow water. Parts I and II. Journ. Navigation, Vol. 26, No 2 and 3, 1973.
9. NORWIN-KROUKOVSKY, B. V. and JACOBS, W. R. 1957. Pitching and heaving motions of a ship in regular waves. Trans. SNAME, Vol. 65.
10. OHKUSU, M. 1976. Ship motions in the vicinity of a structure BOSS 76. Trondheim.
11. PIANC. International Commission for the reception of large ships. 1977. Working Group No. 4, Nov. 1977.
12. POSTUMA, A. 1979. Manoeuvring and positioning of an off-shore structure. IInd WEGEMT Graduate School. Wageningen.
13. PRICE, W. G. and BISHOP, RED. 1974. Probabilistic theory of ship dynamics. Chapman and Hall. Edinburgh.
14. SALVENSEN, TUCK and FALTINSEN, 1970. Ship motions and sealoading. Trans. SNAME. Vol. 78.
15. TUCK, E. O. 1978. Hydrodynamic problems of ships in restricted waters. Ann Rev. Fluid Mech. 1978, 10.
16. VAN OORTMERSEN, G. 1976. The motions of a ship in shallow water Ocean Engng. Vol. 3.
17. WRIDE, A.T.A.; WILLS, A. E.; LECKENBY. 1975. Behaviour of large ships in shallow and confined waters. N.P.L. Rep. Mar. Sc. R 121. 1975.
18. YEUNG, R. W. 1978. Applications of slender-body theory to ships moving in restricted shallow water. Symp. on Navigability. Delft.