

XXXVI SESIONES TÉCNICAS DE INGENIERÍA NAVAL

“I+D; Innovación y Nuevas Tecnologías en las Industrias Marítimas”

Cartagena, Noviembre de 1999

“DIEZ AÑOS DE I+D EN EL CANAL DE LA ETSIN”

Luis Pérez Rojas^{*}, Dr. Ingeniero Naval

Resumen:

Después de la utilización del Canal de Ensayos Hidrodinámicos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales (E.T.S.I.N.) por la Asociación de Investigación de la Construcción Naval (ASINAVE), en los últimos diez años, un significativo número de profesores y personal adscrito a la ETSIN ha desarrollado una fructífera labor de I+D en el campo de la Hidrodinámica, tanto en el campo experimental como numérico. Esta labor ha contado con la inestimable participación de los alumnos, complementando su formación como Ingeniero Naval.

Este trabajo presenta la labor desarrollada durante este período, con mención de los trabajos realizados y las aportaciones presentadas en Conferencias y Reuniones tanto a nivel nacional como internacional.

Palabras clave: Investigación, canales de ensayo, modelos de buques, formación.

Abstract:

After the utilization of the Towing Tank of the Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales (ETSIN) by the Shipbuilding Research Association (ASINAVE), in the last ten years, a significative number of professors and people related to the ETSIN have developed a fruitfull work of R+D in the hydrodynamic field, not only in the experimenal area but in the numerical aspects also. In this work, the coloboration of the student must be appreciated and it represents a good way of improving their formation.

This paper present the work done during this period, the research and the contributions to Conferences and Meetings are specially emphasized, not only in the national sphere but in the foreigner forums.

Key words: Research, Towing Tanks, ship models, formation.

^{*} El autor debe entenderse en este caso como “relator”, dado que los autores de este trabajo son todas aquellas personas que a lo largo de todos estos años han hecho posible la labor que se relata en el trabajo

Indice:

0.- Introducción

1.- Los Canales de Ensayos Hidrodinámicos

2.- El Canal de la ETSIN

3.- La labor docente

3.1.- Prácticas de Teoría del Buque

3.2.- Materias de Doctorado

3.3.- Tesis Doctorales

4.- La Labor investigadora

4.1.- Líneas de Investigación

4.1.1.- El movimiento de balance. Coeficiente de amortiguamiento

4.1.2.- Tanques estabilizadores pasivos

4.1.2.1.- Investigación

4.1.2.2.- Desarrollo de trabajos para Empresas

4.1.3.- Ensayos de Embarcaciones a vela

4.1.4.- Optimización de formas

4.1.5.- Cálculos de Dinámica de Fluidos

4.1.5.1.- El método desarrollado en la ETSIN

4.1.5.2.- Trabajos realizados

4.1.6.- Dinámica del Buque

4.2.- Asistencias a Congresos

4.2.1.- Sesiones Técnicas y Jornadas Ibéricas de Ingeniería Naval

4.2.2.- La asistencia a foros internacionales

4.3.- Relaciones con otros Centros e Instituciones

5.- Participación de los alumnos

6.- Consideraciones finales

Agradecimientos

Bibliografía

Anexo: Empresas que han contratado con el canal de la ETSINn trabajos de investigación

0.- INTRODUCCIÓN

Un Canal de Ensayos Hidrodinámicos puede considerarse uno de los fulcros en la formación del Ingeniero Naval. La formación específica del Ingeniero Naval en su rama de "casco" se puede centrar en lo que C. Godino [1] califica como Arquitectura Naval que puede dividirse en la Construcción Naval, abarcando tanto el desarrollo estructural del buque como la tecnología de su construcción, y la Teoría del Buque, considerando el buque como un flotador que no sólo debe flotar sino moverse en una determinada dirección con un consumo mínimo de energía y en un medio totalmente hostil como es la mar.

Esta disciplina, la Teoría del Buque, analiza inicialmente la estabilidad tanto transversal como longitudinal del buque considerado como un simple flotador. Pero el buque tiene que avanzar venciendo una **resistencia** para lo que necesita una **propulsión** que normalmente es una hélice movida por un motor, de ahí que sea fundamental el estudio de su resistencia al avance y de su propulsión. Como la navegación no es siempre en línea recta sino que debe moverse en un plano, sobre todo en las maniobras de atraque y desatraque, debe estudiarse su **maniobrabilidad**. Finalmente, el buque se mueve con seis grados de libertad y en una mar totalmente irregular, su estudio constituye el denominado **comportamiento en la mar**.

La estabilidad, la resistencia y la propulsión, la maniobrabilidad y el comportamiento en la mar pueden estudiarse numéricamente resolviendo las ecuaciones de la dinámica de fluidos. La no linealidad de estas ecuaciones, las complicadas condiciones de contorno en una superficie libre desconocida en el planteamiento del problema y la modelización de la turbulencia hacen, entre otras razones, que esta resolución mencionada no se haya logrado de forma totalmente satisfactoria.

Esta dificultad no ha frenado los esfuerzos de muchos hidrodinámicos y matemáticos, y hoy en día los denominados CFD se han convertido en una herramienta útil en el diseño de los buques y que actualmente camina de la mano de los "Canales de Ensayo" tradicionales en donde desde los tiempos de Froude se trata de resolver los problemas de la Teoría del Buque mediante la utilización de modelos físicos de buques a escala.

La Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales construyó en su día un "Canal de Ensayos", el hermano pequeño del Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo inaugurado en los años treinta, con el fin de facilitar la formación del Ingeniero Naval en el campo experimental.



Figura 1.- Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales

Por este canal pasaron numerosas promociones de ingenieros navales y la Asociación de Investigación de la Construcción Naval (ASINAVE) lo utilizó para llevar a cabo una obra significativa en el campo de la investigación. La crisis de la construcción naval marcó el final de esta fructífera Asociación que durante muchos años aportó esfuerzo y ciencia al campo de la construcción naval, lo que llevó a un cierto olvido a estas instalaciones, reduciéndose su uso a las prácticas de la asignatura de "Teoría del Buque".

A finales de los ochenta, un grupo de ingenieros navales, vinculados de diversa forma con la Escuela, decidieron revitalizar las instalaciones y se iniciaron una serie de trabajos de investigación al amparo del artículo 11 de la Ley de Reforma Universitaria.

Desde entonces, más de cien trabajos de investigación se han realizado con el respaldo de esta normativa, solicitados tanto por empresas privadas como públicas de ámbito nacional e internacional. Líneas de investigación, realización de tesis doctorales, cooperación con otros Centros y Grupos de Investigación en España y en el extranjero, Comunicaciones y Ponencias presentados a reuniones nacionales e internacionales, incorporación a la International Towing Tank Conference, participación en las Comités Técnicos de esta Institución, son algunas de las actuaciones que se han desarrollado en los últimos diez años en el "Canal" de la ETSIN y que se pretende presentar en este trabajo.

Como ya se ha indicado, ha sido elevado el número de personas que a lo largo de estos años ha colaborado y participado activamente en estas labores de investigación. Sin embargo, un papel determinante ha sido realizado por los alumnos cuya ilusión y dedicación ha hecho posible largas sesiones de ensayos en donde la noche era una continuidad y no una interrupción para el descanso. Estas experiencias han contribuido a su formación y les han permitido ver en la ingeniería naval un mundo profesional atractivo e interesante.

1.- LOS CANALES DE ENSAYO HIDRODINÁMICOS

Conviene recordar algo sobre los canales de ensayo, pues es alrededor de un canal donde se han desarrollado las labores que se presentan en este trabajo.

Es conocido por todos la complicación de los problemas referentes a la hidrodinámica de los buques, lo que ha hecho recurrir a modelos físicos y ensayos con modelos.

Así, Leonardo da Vinci[2], llevó a cabo una serie de ensayos en tres modelos diferentes de buques teniendo distintas distribuciones de desplazamiento en proa y popa.

Durante muchos años, diversos investigadores como Samuel Fortrey, Colonel Beaufoy o Benjamín Franklin[3,4] hicieron ensayos con modelos utilizando el "arrastre por gravedad". Fue en 1871 cuando William Froude utilizó el canal construido cerca de Torquay de 85 metros de longitud, una anchura de 11 metros en la superficie libre del canal y una profundidad de 3 m. en el centro del canal, y que disponía de un "carro" propulsado mecánicamente para remolcar los modelos, considerándose el precursor de los canales existentes hoy día.

Los "canales" tradicionales, aquellos que acuden a nuestras mentes cuando imaginamos un modelo remolcado, son rectangulares, muy largos y sobre los que corre mediante raíles un "carro" que es el que arrastra o remolca al modelo. Pueden tener muchos tamaños, desde los que utilizan modelos de 1 m. de eslora para ensayos cualitativos de tipo educativo hasta los que utilizan modelos de 12 metros en las grandes instalaciones de algunos Centros de Investigación.

Los ensayos en el canal de aguas tranquilas, el que acabamos de calificar de tradicional, permiten determinar esencialmente la resistencia de la carena al avance, el comportamiento del propulsor y la interacción carena-propulsor.

Algunos de ellos poseen dispositivos generadores de olas en uno de sus extremos, lo que permite determinar las características anteriormente reseñadas ante la acción de las olas, así como realizar ensayos de “comportamiento en la mar”. Es necesario señalar que en estos casos, este estudio se ciñe a mares de popa o proa.

Otras posibilidades pueden ser los “falsos fondos” para los ensayos en aguas poco profundas o la refrigeración para los ensayos de resistencia en hielo.



Figura 2.- Modelo remolcado

Realmente el buque no solo navega en línea recta sino que requiere una cierta maniobrabilidad, el movimiento en un plano. Normalmente, los ensayos para analizar estas características se pueden hacer con el modelo libre, utilizando grandes extensiones de agua como lagos o aguas abrigadas cercanas al Centro de Investigación, o con el modelo cautivo con el denominado PMM (Planar Motion Mechanism) o con el más actual CPMC(Computarized Planar Motion Carriage), necesitándose canales de grandes dimensiones tanto en eslora como en manga. No obstante lo anterior, Montero [5] en su tesis doctoral desarrollada en el canal de la ETSIN presenta un método de ensayos en un canal tradicional de “aguas tranquilas” y de análisis de los mismos que permite obtener todas las derivadas hidrodinámicas o coeficientes, en general, de los modelos matemáticos actuales de maniobrabilidad.

El “comportamiento en la mar” para trenes de olas que no sean de popa o proa exigen igualmente instalaciones de grandes dimensiones en manga y con generadores de olas de accionamiento eléctrico o hidráulico colocados en uno de los extremos aunque a veces puede también colocarse, además, en uno de los laterales.

Ahora bien, en el tipo de los canales mencionados la observación del flujo alrededor del modelo, aunque posible, queda reducido a un corto intervalo de tiempo. Esta dificultad puede

soslayarse con los canales de circulación de agua, en donde el modelo está en reposo y es el agua la que se mueve en un circuito cerrado.

Si recordamos el proceso de “cavitación” consistente en el paso de un líquido a la fase de vapor cuando su presión se reduce a una determinada, tal proceso no se reproduce en los ensayos en las instalaciones mencionadas anteriormente. La presión en un punto del fluido del modelo no se corresponde con la realidad, dado que en ambos casos, sobre la superficie del canal y en la mar, existe la presión atmosférica no guardándose la escala requerida. Para estudiar aquellas situaciones en las que puede aparecer el fenómeno de la cavitación es necesario disponer de canales despresurizados o de túneles de cavitación. Es en este último tipo de instalaciones en donde se estudia la cavitación de los propulsores y consiste en un túnel de circulación al que es posible someter a una presión de vacío.

Finalmente, los túneles de viento, básicos en el campo de la aerodinámica, son un complemento de los estudios de hidrodinámica, principalmente en la consideración de la capa límite turbulenta y en la formación de la estela.

2.- EL CANAL DE LA ETSIN

El “canal” de la ETSIN fue inaugurado en 1967 [6] con unas dimensiones de 56 metros de largo, 3,8 m. de ancho y 2,2 m. de profundidad, posteriormente se aumentó su longitud hasta los 100 m. Fue proyectado por Luis de Mazarredo con el fin de que los estudiantes de ingeniería se pusieran en contacto con los métodos de experimentación [7]. En la figura 3, se presenta un corte transversal del mismo

En la cabecera se prolonga en un canalillo de trimado cuyas paredes laterales están constituídas por cristales de 12 mm. de espesor. Este canalillo está situado sobre un foso desde el que se puede ver el modelo con más comodidad.

En el otro extremo, existe un generador de olas de tipo pantalla que permite la realización de ensayos a aguas agitadas. Movido por un motor eléctrico de 2 Kw. Permite alcanzar olas regulares de hasta 0,2 m. y períodos de olas comprendidos entre 0,5 y 2 segundos.

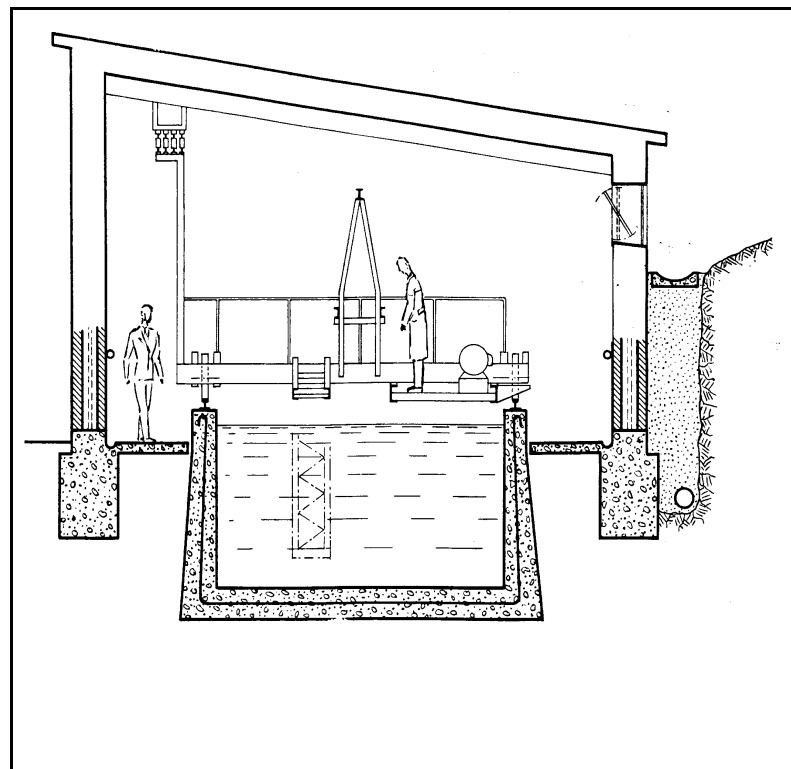


Figura 3.- Corte transversal del Canal de la ETSIN

Para poner en movimiento el modelo se dispone de un carro de estructura de acero, que rueda sobre dos líneas de carriles ancladas en los pretilos laterales del “canal”. La alineación y nivelación de estos carriles se ha efectuado con gran precisión para evitar alteraciones de la velocidad del carro durante los ensayos.

El carro es movido por cuatro motores (uno por cada rueda) de corriente continua de 2.8 Kw a 220 V conectados en serie para conseguir la igualdad de sus pares motores. La transmisión se realiza a través de sendos engranajes reductores para que siendo así los motores más ligeros puedan reaccionar antes a la regulación. El carro puede alcanzar una velocidad de hasta 3.5 m/s.

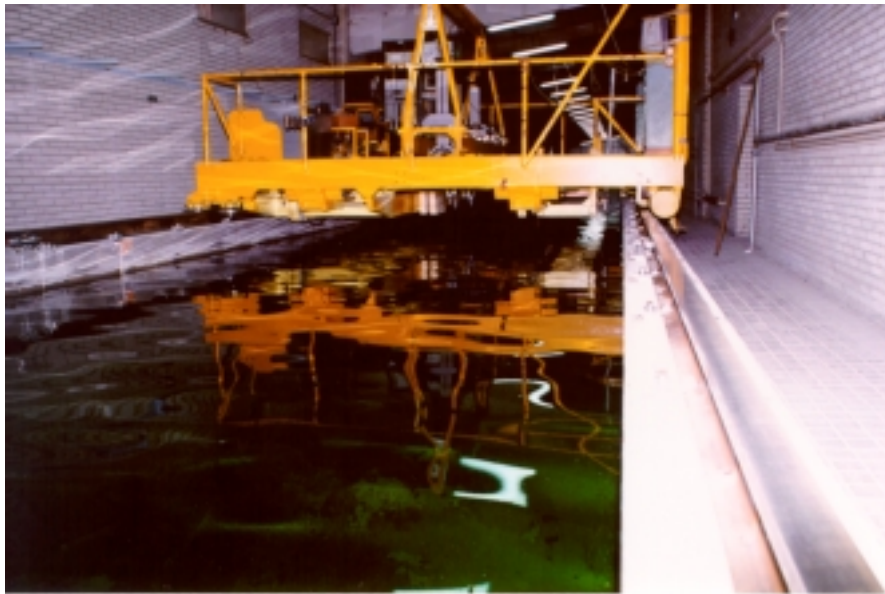


Figura 4.- Canal de la ETSIN

La antigua regulación a través de un grupo de válvulas tiratrones y la utilización de un grupo Ward-Leonard ha sido sustituida por un sistema de regulación basado en la electrónica de potencia, en donde ha participado activamente el personal del Canal.

3.- LA LABOR DOCENTE

La función primaria de la Universidad es transmitir conocimientos. La Ley de Reforma Universitaria de 25 de Agosto de 1983 señala en su artículo primero que el servicio que corresponde a la Universidad lo realiza mediante la docencia, el estudio y la investigación.

Reza el Diccionario de la Lengua Española de la Real Academia que docencia es la práctica y el ejercicio de la enseñanza, entendida como la comunicación sistemática de ideas, conocimientos o doctrinas.

La labor docente del Canal de Ensayos se ha centrado durante muchos años en la realización de las "prácticas" de la asignatura de Teoría del Buque. Prácticas que para mayor aprovechamiento de los alumnos, se realizan por grupos de 5 ó 6 personas.

3.1.- Prácticas de Teoría del Buque

La primera práctica está dedicada a la estabilidad del buque y trata de reproducir la realización de la denominada "**Experiencia de Estabilidad**" para determinar la altura del centro de gravedad de un buque. Mediante el traslado transversal de pesos se provoca una escora. La medida del ángulo de inclinación ante el momento perturbador nos proporciona la situación del centro de gravedad. Como hemos indicado, con esta práctica se modeliza la "Experiencia de Estabilidad" tal y como se realiza en la realidad. El valor obtenido no será el del buque real pero su realización será necesaria cuando en algunos casos queramos reproducir en el modelo las condiciones dinámicas del buque real.

Las siguientes tres prácticas constituyen la trilogía, buscando un símil literario, de la razón de ser de un canal de ensayos hidrodinámicos. Inicialmente se evalúa la bondad de las formas del buque mediante el **ensayo de remolque**. En este ensayo el modelo es remolcado a diversas velocidades midiendo la resistencia que experimenta al avance.

Esta resistencia debe ser vencida por un cierto elemento, desde un remo hasta el más sofisticado propulsor. Considerando el medio más tradicional, la hélice, ésta se ensaya en el canal haciéndola avanzar con unas determinadas revoluciones. Este movimiento generará un cierto empuje, constituyendo el **ensayo del propulsor aislado** y proporcionando el análisis del comportamiento de la hélice.

Pero la hélice y el casco del buque van juntos en la realidad y juntos deben ser ensayados en el **ensayo de autopropulsión**, determinando la acción que la hélice hace sobre el casco y viceversa.

Pero como ya se ha indicado, el buque no sólo flota y avanza en línea recta sino que está sometido a movimientos con seis grados de libertad en un mar de carácter aleatorio. El análisis del **movimiento de balance** (movimiento angular alrededor de un eje longitudinal) constituye la siguiente práctica analizando este movimiento ante olas que le llegan al modelo por el costado. La práctica dedicada a los **tanques estabilizadores pasivos** como medio para reducir los molestos balances, cierra este ciclo experimental de la Teoría del Buque[8].

Estas prácticas encierran una serie de características que se pueden resumir en las siguientes:

- Equipo único.- Existe un único equipo para la realización de las prácticas, el canal de ensayos y el carro de remolque. Esta característica imposibilita que los diferentes grupos de trabajo puedan trabajar paralelamente en el laboratorio.

- Supervisadas.- Lo costoso del equipo no permite dejar al alumno el uso de los equipos sin una supervisión directa. También se debe considerar el aspecto de la seguridad, un carro de 5 T a una velocidad de 3,5 m/s no puede dejarse en manos de personas inexpertas.

- Poca participación del alumno.- El carácter apuntado en el apartado anterior hace que la participación directa del alumno sea escasa y puede convertirse en una mera clase práctica de observación, de ver cómo el profesor lo hace. Aunque esta situación siempre encierra algo positivo está claro que no es la óptima.

- Poca dedicación del alumno.- También como consecuencia de lo señalado en los apartados anteriores, las horas que el alumno está dedicado a este tipo de clases prácticas es reducido, es escaso el tiempo que el alumno pasa sobre el carro de remolque a lo largo del curso.

· Desfase entre la teoría y al práctica.- Es materialmente imposible hacer caminar de forma armónica las clases teóricas con las clases prácticas. Estas últimas se desarrollan a lo largo del curso debido al elevado número de alumnos (90) y para que fueran acordes con los contenidos teóricos deberían concentrarse en el final del curso, época poco propicia para añadir al alumno nuevas cargas.

· Prácticas reales.- El lado positivo de este tipo de prácticas es su cercanía total al mundo real. Los ensayos que presencian y en los que participan los alumnos son los mismos que se pueden realizar cuando un astillero solicita una optimización de formas de un cierto buque.

En [9] se indican una serie de medidas adoptadas para paliar algunos de los inconvenientes señalados y convertir las citadas en unas de las prácticas más valoradas por los alumnos.

3.2.- Materias de Doctorado

La labor docente también ha alcanzado a las asignaturas de doctorado y durante estos años se han ofertado dos asignaturas muy relacionadas con las actividades del canal: Métodos Experimentales en Hidrodinámica y Métodos Matemáticos en Hidrodinámica. La primera de ellas trata de introducir al alumno del Doctorado en la experimentación con la ayuda de modelos y posibilitar la realización de trabajos susceptibles de presentar a Congresos y Reuniones. Sirvan como ejemplo los trabajos[10] realizados sobre el efecto de escala en el coeficiente de amortiguamiento, presentado al Seminario "Otradnoye'93", celebrado en Kaliningrado (Rusia) que abrió una línea de investigación y culminó en la tesis doctoral de Jesús Valle[11]

También se han realizado trabajos sobre cálculos de incertidumbre en los resultados del Ensayo de Remolque, contribuyendo al Informe del 22nd. ITTC Conference[12].

La asignatura de Métodos Matemáticos entronca con las primeras asignaturas ofertadas al inicio de los estudios de Doctorado en los años setenta y recoge las últimas tendencias de los cálculos de mecánica de fluidos para resolver los fenómenos del flujo alrededor del buque.

Otras asignaturas sobre el comportamiento del buque en la mar, el cálculo de propulsores y herramientas matemáticas enfocadas a su utilización en hidrodinámica configuran dentro del programa de Doctorado denominado de "Arquitectura Naval" una especie de subprograma dedicado a la hidrodinámica.

3.3.- Tesis Doctorales

Dentro de la labor docente vamos a incluir la realización de tesis doctorales, desarrolladas en el ámbito de la hidrodinámica, por ser la culminación de la formación de una persona a la que se le reconoce oficialmente una capacidad investigadora.

La tesis de Ricardo Abad [13], está dedicada al estudio de los movimientos del buque y a los sistemas estabilizadores de dichos movimientos. Su aportación más importante fue el desarrollo de una herramienta teórica (Programa RESFRE), basado en técnicas de ingeniería de control, que permite predecir los movimientos de un buque con y sin sistemas estabilizadores. El Programa RESFRE, ha sido la base para el desarrollo de la línea de investigación dedicada a los tanques estabilizadores pasivos y se ha aplicado a numerosos trabajos de investigaciones realizados al amparo de la citada LRU.

En el capítulo dedicado a los canales de ensayo se han expuesto las necesidades experimentales de la maniobrabilidad que exige canales de gran manga o bien, grandes extensiones de agua como embalses. También se han mencionado los trabajos de J. M^a Montero, recogidos en su tesis doctoral[5] demostrando que en los canales tradicionales se puede determinar, de manera exhaustiva y precisa, los coeficientes que forman parte de los modelos matemáticos de maniobrabilidad más actuales, como alternativa a los métodos experimentales tradicionales. Esto amplía el horizonte de investigación de un canal de experiencias hidrodinámicas convencional.

La medida directa de las componentes de la resistencia ocupó en los años setenta una de las líneas de investigación más seguida en muchos de los canales de ensayos en el mundo[14,15,16]. En 1982, Pérez Rojas presentó su tesis doctoral en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales [17], basada en los trabajos experimentales llevados a cabo en la Universidad de Iowa[18] y relativa a la medida directa de la componente de la resistencia viscosa. La tesis de Rosario Bravo[19] describió la implantación del sistema de la medida directa de la resistencia por formación de olas en el canal de la ETSIN, basándose en el método del corte longitudinal de Landweber[20,21] y contribuyendo al análisis de las formas del buque de regatas que España presentó a la Copa de América del año 1992 [22]

Las tesis mencionadas de Ricardo Abad, José M^a Montero y Rosario Bravo merecieron en su día los Premios Extraordinarios de Doctorado de la Universidad Politécnica de Madrid.

La tesis doctoral de Jesús Valle [11] recientemente defendida y comentada anteriormente, versa sobre una de las líneas de investigación del canal y se realizó al amparo del Programa Nacional de Formación del Personal Investigador.

Otras tesis doctorales, si bien no tan relacionadas con las actividades experimentales y numéricas del canal, se han presentado durante estos últimos años, tales como la de Ricardo Zamora[23], aplicando la teoría de catástrofes al movimiento de balance del buque; la de Jorge Flores[24] sobre la incidencia de ciertos parámetros sobre el comportamiento hidrodinámico de las toberas y la de Ignacio Diez de Ulzurrun[25] sobre los sistemas expertos aplicados a la dinámica del buque, en particular al estudio de vibraciones.

4.- LA LABOR INVESTIGADORA

En el apartado anterior se ha señalado que la función de la Universidad se realiza a través de la docencia, el estudio y la investigación. Ortega [26] en su conocido ensayo sobre la Universidad señala que la formación superior ofrecida en la Universidad consiste en la enseñanza de las profesiones intelectuales y en la investigación científica y la preparación de futuros investigadores.

Volviendo a las mismas fuentes anteriormente mencionadas, el Diccionario de la Lengua Española de la Real Academia entiende por investigación la acción y el efecto de investigar, que consiste en hacer diligencias para descubrir una cosa. Recogiendo su segunda acepción, tendremos el de realizar actividades intelectuales y experimentales de modo sistemático con el propósito de aumentar los conocimientos sobre una determinada materia.

Estas definiciones ponen de manifiesto que la investigación debe **descubrir** una cosa que puede entenderse como lo de aumentar los conocimientos sin que llegue a lo que entendemos por un descubrimiento. También señalan que la investigación encierra tanto una faceta **intelectual**

como **experimental**, intelectual como perteneciente al entendimiento y experimental como perteneciente a la experimentación, entendida ésta como el método científico de investigación, basado en la provocación y estudio de los fenómenos.

En el canal de ensayos hidrodinámicos de la ETSIN, durante estos últimos años, la faceta investigadora ha adquirido una gran relevancia, ya que es la que ha posibilitado a través de los "contratos de investigación" el resurgir de las instalaciones y realmente completa la actividad docente.

4.1- Líneas de Investigación

Para facilitar la realización de estas investigaciones se definieron una serie de líneas de investigación en donde se enmarcan la mayoría de los trabajos realizados y que pueden resumirse en las siguientes:

4.1.1.- El movimiento de balance. Coeficiente de amortiguamiento.-

El movimiento de balance es una de las respuestas más importantes del movimiento del buque en olas. De una forma dinámica, el movimiento de balance se puede obtener a partir de los distintos momentos que actúan sobre el buque: los momentos inerciales debido tanto a la masa real como a la virtual del buque, el momento de amortiguamiento, el momento elástico o adrizante, los momentos excitadores (olas, viento, corrimiento de carga, etc.) y otros momentos debido a otros modos de movimiento del buque. De todos ellos el más difícil de determinar es el momento amortiguador y que según diversos autores (Himeno [27]) es el más importante y por ello debe ser calculado adecuadamente.

La importancia de conocer el coeficiente de amortiguamiento en el movimiento de balance, puesto también de manifiesto en la simulación del comportamiento de los tanques estabilizadores pasivos, propició el inicio de esta línea de investigación en el ámbito de los cursos de doctorado; en particular, en la asignatura de "Métodos Matemáticos en Hidrodinámica", tal y como se ha comentado anteriormente.

En el Seminario de "Otradnoye'93" se recogían los trabajos realizados durante el curso 1992-93 y tenían como objetivo el analizar el efecto de escala sobre el citado coeficiente a través de una familia de geosims de modelos de formas geométricas semejantes a formas de buques.

La influencia de los efectos viscosos en el balance mediante ensayos en dos modelos semejantes, uno de ellos con un significativo codillo y otro con formas redondeadas, fue presentado en la Conferencia Internacional sobre Estabilidad de Buques, STAB'6 [28], esta influencia quedaba de manifiesto mediante la visualización de la formación de vórtices en el modelo provisto de codillo.

Nuevas aportaciones sobre ensayos de extinción en un buque pesquero real dedicado a la recogida de mejillones y su correspondiente modelo a escala 1:10 fueron presentados en las II Jornadas Ibéricas de Ingeniería Naval [29].

La tesis doctoral de Jesús Valle[11], mencionada en el apartado anterior, recoge los trabajos realizados por el doctorando dentro de esta línea de investigación siendo sus más significativas aportaciones el análisis de las distintas simulaciones del coeficiente de amortiguamiento y la

metodología del ensayo de extinción con un sistema informatizado de adquisición de datos. Estas aportaciones se presentarán en la próxima Conferencia de Estabilidad a celebrar el próximo Febrero en Tasmania[30].

4.1.2.- Tanques Estabilizadores Pasivos.

La utilización de tanques estabilizadores pasivos en buques pesqueros, en especial atuneros, es práctica común desde hace bastantes años. Las ventajas de su empleo, derivadas de la reducción del movimiento de balance producido, alrededor de un 60 por 100, unidas a la sencillez, tanto de instalación como de funcionamiento, explican el que hoy en día sigan utilizándose estos dispositivos.

Un tanque estabilizador pasivo consiste básicamente en un espacio interior del buque comprendido entre los costados, dos cubiertas y dos mamparos transversales, con una determinada configuración interior y que contiene una determinada cantidad de fluido, generalmente agua de mar. Su objeto es la reducción o amortiguamiento del movimiento de balance del buque. Para que esto se produzca de una manera óptima; es decir, para conseguir la máxima reducción del movimiento de balance, es necesario diseñarlo correctamente. Un mal diseño del tanque estabilizador, no solamente empeora el rendimiento del mismo, sino que, en algunos casos, en vez de reducir el movimiento de balance, puede llegar a amplificarlo.

Diseñar un tanque estabilizador pasivo consiste, por un lado, en establecer la configuración geométrica interior más adecuada, de acuerdo con las limitaciones de proyecto impuestas: ubicación del tanque en el buque, dimensiones máximas, necesidad de paso o no a través del mismo, etc. Y, por otro lado, definir, en función del estado de la mar y las características de la navegación del buque, las cantidades de agua que debe contener el tanque.

Para definir un tanque estabilizador pasivo es necesario predecir el comportamiento en balance del buque con y sin tanque estabilizador. Predecir equivale a modelizar, bien utilizando modelos físicos o modelos matemáticos. El movimiento de balance del buque sin tanque estabilizador admite una modelización matemática relativamente sencilla y que ofrece una aceptable exactitud. Sin embargo, para modelizar el movimiento de balance del buque con el tanque estabilizador, es necesario conocer las acciones que ejerce el tanque estabilizador sobre el buque y hasta la fecha el único procedimiento aceptablemente preciso es el empleo de modelos físicos, bien sea modelos a escala del buque con el tanque en su interior, bien sea con modelos del tanque, ensayándolo aisladamente e integrando los resultados de los ensayos en un modelo matemático.

En relación con esta área, los aspectos más significativos de las actividades que se vienen desarrollando en el Canal de Ensayos en los últimos años, tanto en investigación como en desarrollo de trabajos para empresas, se resumen a continuación:

4.1.2.1.- Investigación.

Fundamentalmente, la investigación está centrada en la contrastación y mejora de las técnicas empleadas en el diseño de estos dispositivos. También se han realizado estudios orientados a introducir modificaciones en los tipos de tanques existentes con objeto de mejorar su rendimiento. Sin embargo, estos estudios han sido para casos concretos.

En cuanto a la investigación orientada a la contrastación y mejora de las técnicas empleadas en el diseño, el método utilizado es el de ensayar aisladamente modelos a escala del tanque e integrar los

resultados de los ensayos en un modelo matemático para predecir el comportamiento en balance del buque. De esta manera, se puede dividir esta investigación en dos líneas básicas: La referente a todo lo relacionado con los ensayos del tanque aislado, y la referente al modelo matemático utilizado para predecir y simular el comportamiento en balance del buque.

El objeto de los ensayos del tanque aislado es obtener las curvas de respuesta en frecuencia del momento ejercido por la masa de agua contenida en el tanque sobre el buque, en función del movimiento de balance de éste. Para ello, se utiliza un dispositivo que hace oscilar sinusoidalmente al modelo a escala del tanque y que permite variar tanto la frecuencia como la amplitud del movimiento, y un sistema de toma de datos con el que se registran simultáneamente las señales de momento del tanque sobre el eje de giro de balance del buque y del movimiento de balance. De estos registros se obtienen, para cada nivel de agua y cada amplitud de balance, las mencionadas curvas de respuesta en frecuencia.

De los estudios realizados encaminados a conseguir la máxima precisión de los datos obtenidos de estos ensayos se ha puesto de manifiesto que la aproximación conseguida al movimiento sinusoidal puro es totalmente aceptable dado que la amplitud mayor del armónico distinto del primero, con relación a éste, es del orden de 1000 veces más pequeña. También se ha puesto de manifiesto la necesidad de un eficaz sistema de filtrado de la señal para obtener un registro con adecuada calidad del momento ejercido por el tanque sobre el eje de giro.

El modelo teórico utilizado, donde se integran los resultados de los ensayos del tanque aislado con los datos relativos a la ecuación de balance del buque, para predecir el comportamiento en balance del buque con y sin tanque estabilizador es el programa RESFRE, desarrollado en la tesis doctoral mencionada de Ricardo Abad [13].



Figura 5.- Ensayador de tanques

Para evaluar el grado de validez de la extrapolación de los resultados, basada en la ley de Froude se han realizado ensayos con modelos a diferentes escalas obteniendo unos resultados que confirman adecuadamente esta hipótesis.

El estudio en mares irregulares ha hecho necesaria la ampliación del programa RESFRE para estudiar el comportamiento en balance de un buque, con y sin tanque estabilizador, en mares irregulares.

La ecuación utilizada para representar el movimiento de balance del buque es lineal con coeficientes constantes. La línea de investigación anterior sobre el coeficiente de amortiguamiento y la tesis reseñada de Ricardo Zamora [23] tratan de aportar algo sobre estas consideraciones de linealidad.

Las pruebas en buque real, realizadas hasta el momento en el buque Hespéries, dos atuneros y un buque del programa Halios, han demostrado la efectividad de estos sistemas y la adecuación de la simulación matemática utilizada.

4.1.2.2.- Desarrollo de trabajos para empresas.

Los trabajos de estudio y diseño de tanques estabilizadores realizados para empresas en los últimos años hacen un total de veintidós. El desarrollo de estos trabajos ha permitido entrar en contacto con las empresas “usuarias” de estos dispositivos, intercambiar opiniones y, sobre todo, escuchar puntos de vista muy distintos a los del ámbito universitario. Todo esto ha sido de gran provecho a la hora de buscar el punto de equilibrio entre los aspectos puramente teóricos y prácticos en el desarrollo de las investigaciones mencionadas anteriormente.

Para centrar los trabajos realizados digamos que el 62% ha correspondido a buques atuneros y el resto a buques de investigación, cableros, mercantes y otro tipo de pesqueros. El 71% han sido encargados por los astilleros y el resto por los armadores y Oficinas Técnicas. Seis trabajos, el 27%, han incluido los estudios de mares irregulares.



Figura 6.- Construcción del modelo de una hélice

4.1.3.- Ensayos de Embarcaciones a Vela

Durante los tiempos de ASINAVE, el Canal de Ensayos entró en el mundo de los ensayos de embarcaciones a vela con los trabajos sobre el “Licor 43”[31] y la tesis doctoral de Antonio García Ferrández [32]

El Desafío Español de Copa América possibilitó la nueva puesta en marcha de esta línea de investigación permitiendo realizar un número muy elevado de ensayos no tradicionales en un “canal” poniendo a punto nuevos sistemas de medida.



Figura 7.- Modelo del Copa América – 92

Durante el Desafío del año 1992, se ensayaron cuatro prototipos de carena, cinco timones, dos orzas y dos bulbos con distintas configuraciones entre los apéndices citados. Dedicación especial merecieron: los acuerdos de orza y bulbo, la actuación del trim-tab de la orza, la colocación de un perfil a proa de la orza, la resistencia por formación de olas y la resistencia añadida debida al estado de la mar.

El Desafío Español del año 1995 también contó con el Canal de la ETSIN para optimizar hidrodinámicamente las formas del buque que representó al Sindicato español en aquella carrera, el Rioja de España. El objetivo del estudio realizado era la obtención de las características de resistencia y sustentación de siete modelos distintos de carena. Estos modelos se ensayaron con el mismo juego de apéndices para facilitar la comparación de los resultados.

También en el Desafío del 99, el Canal de la ETSIN ha participado a través del Programa de Investigación gestionado y coordinado por el Instituto de Técnica Aeroespacial. Las labores desarrolladas en esta ocasión han sido el ensayo de tres prototipos de carenas y la aplicación de los

CFD desarrollados en el canal para este tipo de buques lo que ha exigido una adecuación del mismo. Esta actuación también ha permitido desarrollar un dinamómetro de seis componentes con la ayuda del Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo.

4.1.4.- Optimización de formas

Como ya se ha expuesto, la labor fundamental de un canal de ensayos es ensayar formas de buques para optimizarlas. En este contexto, el 56% de los trabajos realizados pueden enmarcarse en el análisis y ensayos de formas, desde buques tradicionales como pesqueros, multipropósito, ferrys, Ro-Ros y quimiqueros hasta lanchas, golondrinas de pasaje, buques para mantenimiento de boyas, lanchas de recolección de crudos, hidrográficos y de investigación. Sin olvidar los catamaranes de alta velocidad y los buques tipo SWATH.

En cuanto a la optimización de formas, merecen señalarse los trabajos realizados sobre los bulbos de proa y los alargamientos en buques existentes. En el trabajo[33] presentado en las Sesiones Técnicas de Vigo del presente año se incluían las investigaciones llevadas a cabo en tres distintos atuneros de semejante porte pero de formas diferentes llegándose a la conclusión que si bien la solución depende de cada tipo de buque y situación de funcionamiento, el alargamiento del casco con la inclusión de nuevos tipos de bulbos puede producir ahorros muy importantes de energía. Un avance de estos trabajos se presentó al Simposium de Técnica y Tecnología Pesquera de Ancona[34]

El análisis de distintos bulbos en su relación con el comportamiento en la mar del buque también ha merecido la atención del canal en los trabajos llevados a cabo con el astillero de Unión Naval de Valencia, S.A. durante los Proyectos de investigación para los desarrollos de los cruceros y quimiqueros de diseño avanzado.[35]

4.1.5.- Cálculos de Dinámica de Fluidos

El resolver un problema de mecánica de fluidos mediante aproximaciones matemáticas con la ayuda del ordenador constituye la base de los denominados CFD, siglas de la expresión inglesa “Computational Fluid Dynamics”, cuya traducción podría ser la de Dinámica de Fluidos Computarizada, recordando que la Real Academia de la Lengua acepta el verbo computarizar.

Los primeros análisis matemáticos de un flujo fluido comenzaron a desarrollarse a principios del siglo XVIII, cuando Laplace, Bernouilli y Euler establecieron las ecuaciones básicas de la Mecánica de Fluidos, de hecho, su utilización para aplicaciones en ingeniería fue escasa debido a la complejidad de su estructura y falta de recursos numéricos en aquel momento.

En el siglo XIX fueron Navier y Stokes los que establecieron las ecuaciones fundamentales que describen un flujo real en fluidos viscosos. De igual manera seguía ocurriendo que, exceptuando unos pocos casos sencillos para los que podían encontrarse soluciones analíticas, la mayor parte de las veces las ecuaciones no pueden resolverse en los casos de interés práctico.

Prandtl desarrolló, a comienzos del siglo XX, la teoría de la capa límite como una simplificación de la solución de Reynolds para las ecuaciones de Navier-Stokes. Las ecuaciones de la capa límite constituyeron el primer medio de análisis de un flujo no sólo en casos de interés académico, sino en situaciones de interés técnico, con las limitaciones impuestas por los medios existentes en su día.

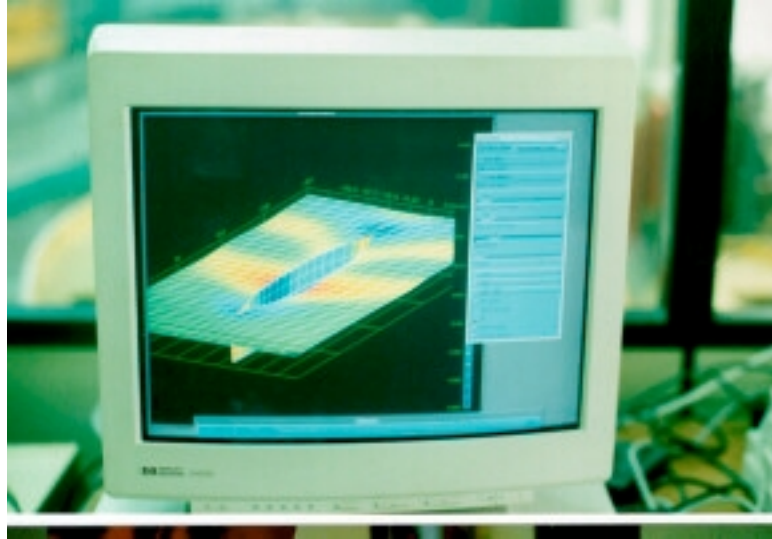


Figura 8.- Cálculos CFD por ordenador

La consideración del flujo alrededor de un buque como potencial, permitió a Michell [36] hace casi un siglo el presentar una solución analítica de la resistencia por formación de olas en un buque fino e iniciar el interés de los científicos en hidrodinámica en los métodos numéricos.

Hacia 1970, con el desarrollo de ordenadores de gran potencia, las técnicas de resolución numérica pudieron ponerse en práctica.

Desde entonces, el desarrollo de algoritmos para la solución no estacionaria de las ecuaciones de Navier-Stokes y la solución para un valor medio (RANSE: Reynolds Averaged Navier Stokes Equations) han avanzado considerablemente. Métodos numéricos como diferencias finitas, elementos finitos y volúmenes finitos se han utilizado con buenos resultados.

Todo ello ha dado lugar a la aparición de esta nueva disciplina en el campo de la Mecánica de Fluidos, la comentada “Mecánica de Fluidos Computarizada” (CFD) que se encuentra en fase de desarrollo permanente.

Con todo ello se establece un campo de investigación “paralelo” al utilizado en los Canales de Ensayo pero mediante modelos matemáticos.

4.1.5.1.- El método desarrollado en la ETSIN.

La ETSIN, no ha quedado ajena a esta inquietud del mundo científico de la Hidrodinámica. Sus primeras actuaciones se inician en la participación de algunos de sus miembros en las Sesiones Técnicas de Ingeniería Naval [37,38] con trabajos sobre flujo potencial tratado con el método de paneles según técnicas basadas en los desarrollos del Profesor Louis Lansweber[39]. Recientemente[40] se ha presentado una discusión sobre la comparación de este método de Landweber y el más conocido de Hess y Smith[41], en donde se pone de manifiesto las cualidades del profesor Landweber de saber dar el tratamiento más adecuado a un determinado problema sin que por ello pierda su rigor científico.

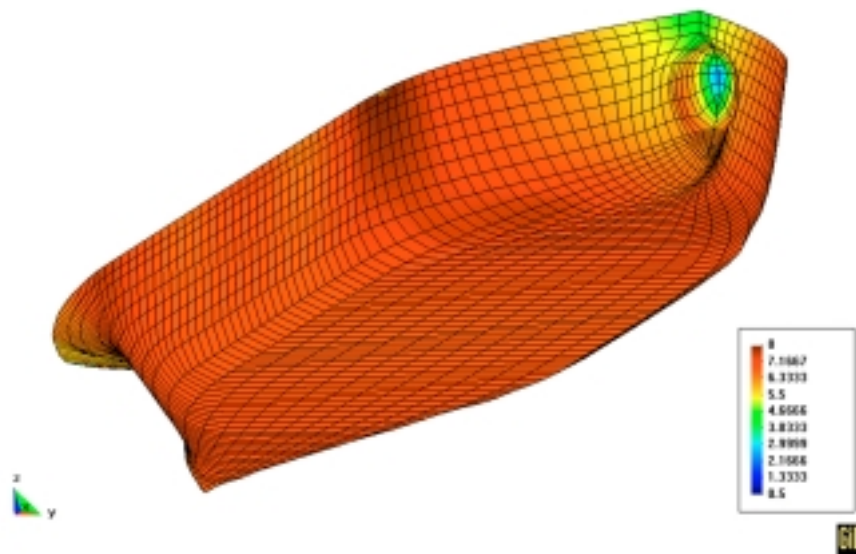


Figura 9.- CFD. Distribución de presiones sobre el casco

Las líneas de actuación en este campo se marcaron definitivamente en 1992[42]. La primera etapa ha consistido en desarrollar el cálculo del flujo potencial. Igualmente [43] se sentaron las bases del tratamiento numérico de las ecuaciones incompresibles de Navier-Stokes con superficie libre utilizando el método de los elementos finitos.

El código potencial desarrollado en la ETSIN se basa en el método de paneles con superficie libre que fue introducido inicialmente por Dawson [44].

El método de los paneles se puede aplicar a cualquier problema de dinámica de fluidos gobernado por la ecuación de Laplace y constituye el flujo más sencillo pero con sentido físico, el flujo potencial de un fluido incompresible y sin viscosidad.

Es un hecho conocido, que se puede formular este problema mediante una ecuación integral lineal extendida a sus contornos, eliminando la necesidad de un mallado tridimensional del dominio estudiado y permitiendo que esta formulación proporcione soluciones del flujo potencial alrededor

de configuraciones arbitrarias. Su conformidad con el flujo real, combinado con su generalidad geométrica, ha hecho que los métodos numéricos del cálculo del flujo potencial sean una herramienta importante en muchos campos de la hidrodinámica del buque como se ha comentado anteriormente.

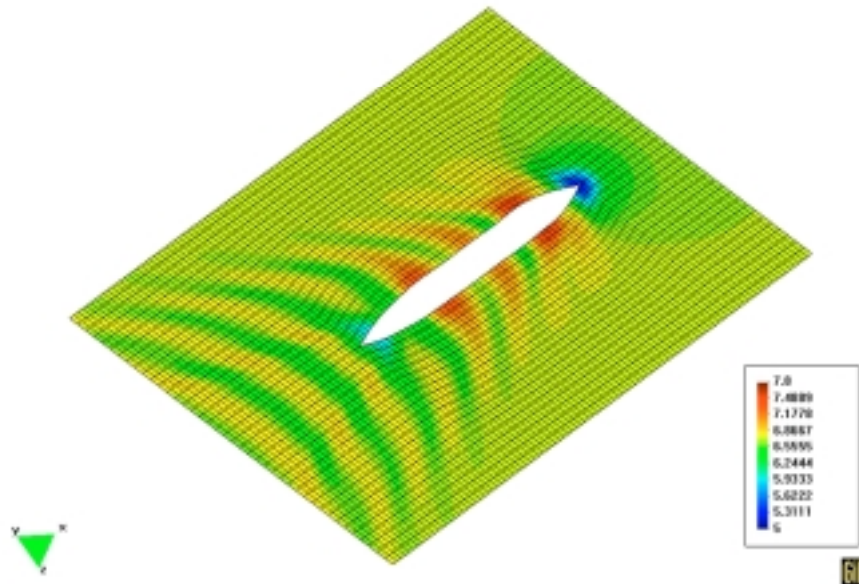


Figura 10.- CFD. Sistema de olas dejado por el barco

En un principio, los investigadores calificaron a estos métodos como métodos de singularidades de superficie en contraposición a las antiguas aproximaciones de las técnicas de singularidades internas. Sin embargo, la discretización de la superficie del cuerpo considerado en pequeños cuadriláteros condujeron a la denominación de método de paneles y esta acepción ha sido aceptada en la comunidad de la mecánica de fluidos. Algunas veces, el método se le denomina como método de los elementos de contorno debido a que una aproximación similar se puede usar en otros problemas de la física gobernados por ecuaciones diferenciales lineales en derivadas parciales.

Mientras que el problema estacionario de la sustentación en tres dimensiones ha recibido una gran atención en el campo de la aerodinámica, es la consideración de la superficie libre la que alcanza una mayor preponderancia en el mundo de la arquitectura naval. El problema de la interacción buque-superficie libre ha sido atacado de forma positiva mediante el método de paneles a pesar de la considerable complicación causada por la presencia de la interfase aire-agua.

Como menciona Hess [41], en la denominada superficie libre, la presión en el agua debe ser constante y constituye una condición de contorno, normalmente en el plano que representa la situación de la superficie libre sin perturbar. Existe también la condición de radiación que gobierna la dirección de las olas en el infinito.

Para el caso de un buque de superficie navegando a velocidad constante en un mar sin oleaje se utilizan las denominadas fuentes de Rankine y se paneliza tanto la obra viva del buque como la

mar en las proximidades del buque. La condición de la superficie libre se tiene que aplicar de modo que las olas generadas no se propaguen aguas arriba del buque (condición de radiación).

El código de la ETSIN calcula el flujo potencial con superficie libre alrededor de un buque mediante el método de las fuentes de Rankine con una variante más general del método propuesto por Dawson[44]. La generalización consiste en poder panelizar arbitrariamente la superficie libre, sin necesidad de que sean líneas de corriente del problema sin superficie libre (Bruzzone[45]). Otra generalización realizada es que se pueden hacer cálculos en buques con popa de espejo, cuyo tratamiento es sustancialmente diferente al de un buque con popa convencional (Raven [46]).

En una primera aproximación, el problema no considera la superficie libre. Para que ésta se mantenga plana, se coloca un reflejo de la obra viva por encima de la misma, de tal modo que la superficie libre se convierta en plano de simetría y así no se deforme. El flujo así calculado se utiliza como base una vez que se considera la superficie libre. Se linealiza la condición dinámica, que es básicamente la ecuación de Bernoulli, que no es lineal en la velocidad, tomando como base de dicha linealización el primer flujo calculado. La condición de radiación se impone de modo numérico, a través del uso de operadores up-wind, de modo similar a Dawson.

Actualmente se está trabajando en un método que resuelva el problema con las condiciones de contorno no lineales. Para ello se están ensayando diferentes aproximaciones y diferentes formas de imponer la condición de radiación (Bertram [47], Janson[48])

Dentro de este contexto de cálculos numéricos, una nueva línea de trabajo con la que se están obteniendo buenos resultados es la del estudio de la propagación de las olas en fondos poco profundos, dado que está empezando a ser condición de proyecto el que las olas de ciertos barcos rápidos no superen unas determinadas magnitudes en su paso por ríos, o, a la entrada de los puertos (Hughes[49]). Es el fenómeno del “wave-washing”. Como no es posible mallar toda la superficie libre en torno al buque, por requerimientos de cálculo, hay que extrapolar los resultados más allá del mallado disponible. Para ello se usan formulaciones generales del tren de olas que se ajustan para que correspondan al tren de olas calculado por métodos potenciales.

Los programas tienen la mayor parte de su código escrito en lenguaje C. Para cálculos importantes, se ha compilado el programa para LINUX, y se ejecutan en un PC con procesador pentium de última generación. En cuanto al preproceso y al postproceso, aunque inicialmente se desarrollaron códigos propios de mallado y visualización gráfica de resultados, se ha considerado oportuno el recurrir a un código comercial, usando pequeños interfaces para comunicar este programa con el módulo de cálculo. El programa elegido ha sido el GID, desarrollado por el CIMNE de la Universidad Politécnica de Cataluña.

4.1.5.2.- Trabajos realizados.

En este marco, escasos han sido los trabajos realizados al amparo de la LRU, siendo su desarrollo realizado a expensas de los recursos provenientes de otros contratos de investigación. Sin embargo se han analizado diversos cascos por CFD, como los prototipos del buque español para el

Desafío de Copa América, un pesquero a construir en Chile, un pesquero del Proyecto Halios y un estudio paramétrico de un ferry de alta velocidad.

Como ejemplo de utilización de esta herramienta en la optimización de buques merece señalarse el trabajo presentado al Congreso Internacional MARIND'96 sobre la aplicación práctica de los CFD en la optimización del bulbo en un buque RO-RO[50].

Para asegurar una alta calidad en las soluciones proporcionadas por los CFD se requiere una cuantificación de la incertidumbre de los resultados. Esta incertidumbre se debe tanto a errores en el modelo (incertidumbre en la representación matemática de la realidad física) como a errores numéricos (incertidumbre en las soluciones numéricas de las ecuaciones matemáticas). En [51] se resume el objetivo de un análisis de validación en asegurar una alta calidad de las soluciones a través de la estimación de la incertidumbre (“uncertainty”).

Los procedimientos para cuantificar estos errores pueden agruparse convenientemente en: documentación, verificación y validación (Dolphin [52]). La documentación recoge una detallada presentación de las ecuaciones matemáticas y los métodos numéricos utilizados. La minimización de los errores numéricos a través de estudios de convergencia y orden de exactitud constituyen la base de la verificación, mientras que la validación es la determinación de la verdadera magnitud del error cometido a través de la comparación de los resultados con datos experimentales suficientemente contrastados (“benchmark data”).

Sobre estos aspectos. estudios de calidad sobre el programa desarrollado en la ETSIN fueron presentados en las II Jornadas Ibéricas [53] demostrándose su “calidad”, efectuando su validación frente a los datos experimentales de un buque de la Serie 60.

La colaboración entre tres Centros de investigación, el canal de la ETSIN, el canal de El Pardo y el CIMNE de la Universidad Politécnica de Cataluña y la Empresa Nacional Bazán ha dado lugar al Proyecto Concertado denominado “BAJEL” que con fondos FEDER tiene como objetivo la validación y el desarrollo final de un sistema informático integral para ayudar al diseño hidrodinámico de buques.[54]

4.1.6.- Dinámica del Buque

El comportamiento en la mar es, incomprensiblemente, uno de los aspectos menos estudiados a la hora de afrontar el proyecto del buque. El fin último de estos estudios es el correcto diseño de las formas para que el buque pueda cumplir perfectamente la misión que le ha sido encomendada.

Un gran número de problemas que afectan a la correcta explotación del buque pueden ser previstos y corregidos “a priori” mediante un estudio de comportamiento en la mar, desde los que pueden provocar una reducción voluntaria o involuntaria de velocidad o cambio de rumbo indeseados (“slamming”, embarque de agua en cubierta, emergencia del propulsor, etc.) hasta los que repercuten gravemente en el trabajo de la tripulación (aceleraciones excesivas) pasando por

otros mucho más concretos como las posibles dificultades de un helicóptero para aterrizar en la plataforma de un atunero en determinadas condiciones del mar.

Actualmente se dispone de los medios necesarios para realizar el estudio del comportamiento del buque en la mar. Aplicando el principio de superposición se ha elaborado una metodología basada en las teorías de los procesos aleatorios, las técnicas de análisis espectral, la oceanografía, la dinámica de estructuras y otras materias afines. Ahora el Ingeniero Naval puede y debe tener presente en el diseño, el comportamiento del buque en la mar que, al final, es el parámetro más influyente para formar el juicio sobre un buque, al menos el de los hombres que trabajan y viven en él y de él.

En este campo, en el canal de la ETSIN se vienen desarrollando programas de simulación numérica no sólo en el ámbito del comportamiento en la mar, sino también en el de la maniobrabilidad de buques y de efectos dinámicos en tanques.

En comportamiento en la mar se ha desarrollado un código de simulación basado en la teoría de rebanadas, el CMAR2D. Dicho código utiliza un modelo de balance de Himeno [27] para corregir el hecho de que los programas de rebanadas al ser de tipo potencial no predicen con exactitud el movimiento de balance que tiene una fuerte componente viscosa. El CMAR2D permite el cálculo de aceleraciones en cualquier punto del buque así como el estudio de frecuencia y presión de “slamming”, frecuencia de emersión del propulsor o embarque de agua en cubierta y resistencia añadida en olas. Actualmente se está mejorando el programa con la inclusión de un módulo para incluir efectos dinámicos de estabilizadores: tanques y aletas.

Pese a que los códigos de rebanadas siguen siendo la herramienta más usada en el ámbito del comportamiento en la mar, los programas en tres dimensiones deben jugar un papel preponderante en el futuro. En el Canal de la ETSIN se está trabajando en los dos últimos años en el desarrollo de un código de paneles que está en una fase bastante avanzada.

Asimismo se dispone, dentro del campo de la maniobrabilidad, programas de simulación para las maniobras de giro, zig-zag y parada, que permiten el estudio en la fase de proyecto, de las características de control del buque.

Por otro lado, y financiado por la Universidad Politécnica de Madrid, está en vigor el proyecto de investigación “Cálculo de Movimientos y Esfuerzos de Líquidos Confinados en Tanques de Buques”. En él se aplica la técnica de elementos finitos a dichos cálculos y pretende ser el embrión de una investigación más ambiciosa centrada en el estudio numérico de los fenómenos que ocurren en cubiertas inundadas en buques en movimiento por causa del oleaje.

4.2.- Asistencia a Congresos

Uno de los objetivos de la investigación es su divulgación, darla a conocer, dado que como indica Primo Yúfera[55] *“el conocimiento científico universal acumulado es patrimonio de la humanidad y asequible para toda la comunidad científica”*. En esta línea, el equipo investigador del Canal de la ETSIN ha procurado asomarse a todos los simposios, congresos y foros nacionales e internacionales que sus recursos y capacidad le han permitido.

En 1990, entra a formar parte de la ITTC, Conferencia Internacional de Canales de Ensayo, que reúne a la totalidad de las instalaciones que de este tipo existen en el mundo y que a través de sus diversos comités y grupos de trabajo marca la pauta no sólo en el campo experimental sino en todos los campos referidos a la hidrodinámica [56]. Desde 1993, está presente de forma activa en el Comité General de Resistencia a través de uno de sus ocho miembros.

4.2.1.- Sesiones Técnicas y Jornadas Ibéricas de Ingeniería Naval.

El único foro de habla hispana de la Ingeniería Naval ha contado con una casi cotidiana presencia en los últimos años del Canal de Ensayos de la ETSIN. En las XXVIII, dedicadas a la informática, se presentó un trabajo [57] sobre “control de procesos” en una cadena de medida, haciendo una aplicación a dos casos concretos: los tanques estabilizadores pasivos y la medida directa de la resistencia por formación de olas.

En las XXIX Sesiones Técnicas, dedicada a las embarcaciones deportivas y celebradas en el marco del Salón Náutico, un grupo alumnos presentó un trabajo realizado en el canal de ensayos sobre la optimización de embarcaciones tipo traineras. El nivel del trabajo y el entusiasmo de los autores cautivó a todos los presentes[58]. Bilbao y su SINAVAL recogió las XXX Sesiones Técnicas dedicadas a la Pesca, en las que se presentó un trabajo que recogía aquellos aspectos de un canal de ensayos que se apartan de sus actuaciones convencionales, pero relacionadas con el mundo pesquero. Se consideraban el comportamiento en la mar de pesqueros, la utilización de los tanques estabilizadores pasivos y el comportamiento dinámico de artefactos flotantes para acuicultura.[59]

El mar Mediterráneo y el buque “DON JUAN” fueron el marco de las XXXIV Sesiones dedicadas a los Buques de Crucero y de pasaje. La utilización de los CFD como una herramienta de diseño en este tipos de buques, tanto en la comparación de dos métodos de cálculo [49] como en el proyecto BAJEL [54], trabajos ya comentados, fueron las contribuciones del Canal de la ETSIN en estas Sesiones.

Nuevamente la pesca, fue el centro de atención en Vigo de las XXXV Sesiones en donde se presentó el trabajo mencionado anteriormente de las optimizaciones de las formas de proa de buques atuneros mediante alargamientos y nuevos bulbos [33].

Madrid, en 1995 fue el foro para las I Jornadas Ibéricas de Ingeniería Naval con el lema de “La tecnología como factor de competitividad en la Industria Naval”. Un ejemplo de colaboración entre los dos países en el campo del comportamiento en la mar fue el trabajo presentado, en donde los cálculos numéricos realizados por el equipo investigador de la Universidad de Lisboa fueron comparados con los datos experimentales obtenidos en el canal de Ensayos de la ETSIN [60]

La devolución de visita tuvo lugar en Lisboa en 1997 con las II Jornadas Ibéricas de Ingeniería Naval, presentando los trabajos anteriormente comentados sobre la validación de CFD [53] y los efectos de escala en el coeficiente de amortiguamiento en el movimiento de balance de buques[29].

4.2.2.- La asistencia a foros internacionales

También la asistencia a congresos y reuniones de carácter internacional, además de la ya señalada de la International Towing Tank Conference, ha sido significativa en los últimos años.

Las Conferencias STAB sobre estabilidad de buques vienen celebrándose desde el año 1975, cuando la primera Conferencia tuvo lugar en Glasgow. En 1982, ya contó con la presencia española [61,62] y aunque no de forma muy activa se ha asistido a la mayoría de ellas. En 1997, se entró a formar parte de su International Programme Committee y en la 6ª Reunión celebrada en Varna (Bulgaria) se presentaron dos trabajos, basados en las tesis doctorales de los Sres. Zamora [63] y Valle[28]. Desde 1997 se es miembro de su International Standing Committee, el trabajo [30] ha sido aceptado para su presentación en la reunión del próximo Febrero y se ha propuesto a la ETSIN, para el año 2003, como el lugar de celebración de la próxima Conferencia.

También relacionado con la estabilidad, se presentó en el International Workshop on the Problems of Physical and Mathematical Stability Modelling, celebrado en Kaliningrado en Mayo de 1993 y auspiciado por el Kaliningrad Technical Institute for Fisheries, un trabajo sobre el movimiento de balance[10] ya comentado anteriormente.

En 1994, se formó parte del International Committee del CRF-94, presentando dos trabajos a la Second International Conference in Commemoration of the 300th Anniversary of Creating Russian Fleet by Peter the Great and 290 years of Admiralty Shipyards. El primero tenía un contenido histórico tratando de encontrar una relación entre la Construcción Naval Española y Pedro el Grande[64] y otro sobre la medida directa de la resistencia por formación de olas[22], incluyendo los resultados obtenidos en una embarcación a vela de alta competición y la influencia de la viscosidad en esta componente de la resistencia al avance.

Existen contactos con la Universidad Austral de Chile, habiéndose establecido un Doctorado Conjunto. Estas relaciones facilitaron la presentación de un trabajo sobre el comportamiento en la mar de buques pesqueros [65] en el IV Seminario Internacional de Buques Pesqueros, en 1995.

Se ha formado parte del International Scientific and Organizing Committee of the First International Conference on Marine Industry, celebrada en Junio de 1996 en Varna (Bulgaria), presentando un trabajo sobre optimización de formas ya comentado[50]

En Abril de 1999, se presentó en Barcelona un trabajo sobre algunos aspectos físicos en la resistencia del buque[66] en el foro del 1st. International Congress on Maritime Technological Innovations and Research.

4.3.- Relaciones con otros Centros e Instituciones

Son diversas las relaciones que se tienen con Centros de Investigación tanto nacionales como extranjeros. En el primer plano, debe citarse la colaboración existente con el Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo; diversos trabajos compartidos, utilización de las instalaciones de uno u otro para hacer distintos modelos según las cargas de trabajo, desarrollo de equipos (dinamómetro de seis componentes) y finalmente la colaboración en el Proyecto BAJEL anteriormente expuesto.

Dentro del contexto de la Unión Europea, y basado en el Programa de “Large-Scale Facilities”, dos trabajos, uno terminado y otro en realización, se han llevado a cabo en las instalaciones de el Canal de El Pardo, dentro de los programas de investigación del canal de la ETSIN. El primero permitió extender el estudio del comportamiento en la mar realizado en un buque con tres proas diferentes a mares que no fueran de proa o popa. El trabajo en curso se enmarca en el estudio del fenómeno del “squat”.

El Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX), a través de su Laboratorio de Puertos y Costas colabora con el Canal de la ETSIN desde el año 1988. En la ETSIN se construyen los modelos que el Laboratorio utiliza para sus ensayos de oleaje en puertos y sus acciones sobre amarras. Los modelos de un ferry para el Estrecho de Gibraltar, un portacontenedor, un petrolero de distribución, un gasero y un buque transporte de coches han sido los buques modelizados de forma dinámica hasta la fecha. Trabajos sobre el fenómeno del “squat” y sobre el programa de maniobrabilidad utilizado en su simulador de maniobras de entrada en puerto son otros de los campos de colaboración entre los dos Centros.



Figura 11.- Modelo para el CEDEX

La Colaboración con el Instituto Superior Técnico de la Universidad Técnica de Lisboa, a través de su Sección Autónoma de Ingeniería Naval, se plasmó con una Acción Integrada en 1991 sobre el estudio teórico-experimental del comportamiento del buque en la mar y que dio lugar a diversos trabajos presentados en diversos foros y el intercambio de estudiantes y profesores entre los dos Centros. Para el próximo año, se ha solicitado otra acción integrada sobre la aplicación de la mecánica de fluidos computarizada al estudio de la hidrodinámica.

Las relaciones existentes con la Universidad de Iowa, Trieste y Nantes han permitido estancias e intercambios de alumnos entre estos Centros, así como intercambio de información entre sus investigadores.

5.- PARTICIPACIÓN DE LOS ALUMNOS

Como ya se ha indicado, en la realización de estos trabajos, una parte significativa ha sido realizada por alumnos de los últimos cursos. Hasta la fecha, 116 becarios han participado en estas labores de investigación con becas de diferente extensión y cuantía pero que han permitido al alumno estar en contacto con la investigación, perderle el miedo y que eso de que la investigación es para unos pocos que además deben ser muy inteligentes y según algunos “estar un poco pirados”, no es totalmente cierto.

Estas becas son muy variables pero existe un tipo que se denomina “Iniciación a la investigación” que abarca oficialmente el período de un mes con una dedicación de 15/20 horas semanales y normalmente se extiende a lo largo de unos 40/50 días que es el periodo característico de una serie de ensayos hidrodinámicos. La carga horaria de dedicación global es equivalente dado que hay distintos días de baja actividad. Se pretende que no sólo se ayude y colabore en los ensayos sino que durante este período se conviva con la atmósfera de un Centro de investigación. Dado que el período indicado es pequeño, numerosos alumnos que siguen interesados en continuar esta actividad gozan de otras becas de forma que pueden ver otros aspectos de la investigación, participando en otros trabajos. De esta forma, los 116 alumnos indicados, han gozado de un total que supera las trescientas becas. En la figura 13, dos alumnos construyendo un modelo.



Figura 12. Alumnos construyendo un modelo

Se puede preguntar si esta experiencia está dedicada a unos pocos. Para responder a esta cuestión se puede señalar que si se considera una media de 50 alumnos los que terminan la carrera, más del 20% ha tenido contacto directo con la investigación en el campo de la hidrodinámica. Porcentaje que debe incrementarse con otras posibilidades en otros laboratorios y grupos de investigación de la Escuela.

También sería interesante conocer cuánta de este semilla sembrada ha fructificado en ingenieros dedicados a la investigación. Pues bien, el 80% de los alumnos anteriormente mencionados han terminado sus estudios y es muy difícil conocer cuántos de ellos se dedican en sus

empresas a labores de I+D. Sin embargo, hay constancia de que al menos el 14% de los alumnos que han pasado por la experiencia de las becas de iniciación a la investigación hidrodinámica se están dedicando a labores propias y específicas de investigación.

Es necesario señalar que estas iniciativas están guiadas y propulsadas por un equipo investigador establecido y aunque se impulsaron la creación de grupos de alumnos para realizar una investigación en cierta medida independiente no ha obtenido la correspondiente respuesta. Sirva como ejemplo, sin embargo, la labor desarrollada, ya comentada, por un grupo de alumnos sobre la hidrodinámica de las traineras [58], o recientemente en el Proyecto ALFIN.

Sería ilusorio pensar que este breve contacto con la investigación ya ha formado a un futuro investigador, pero lo que sí es cierto es que le ha enseñado una Universidad viva, cercana al mundo real de la industria y la sociedad y que los conocimientos que le enseñan en algunas asignaturas no están tan lejos de la realidad.

6.- CONSIDERACIONES FINALES

De todo lo expuesto en los apartados anteriores se pueden sacar una serie de consideraciones a modo de conclusiones:

- El Canal de Ensayos es uno de los fulcros en la formación de un Ingeniero Naval, siendo el centro de la parte experimental de la Teoría del Buque.
- Los trabajos de investigación realizados al amparo del artículo 11 de la Ley de Reforma Universitaria han permitido revitalizar las instalaciones del canal de la Escuela y permitir a los alumnos completar su formación.
- Dentro de las líneas de investigación establecidas en el Canal de Ensayos, más de cien trabajos de investigación se han realizado en estos últimos años. Las Empresas contratantes han sido tanto a nivel nacional como extranjeras y públicas y privadas.
- La labor del Canal de ha asomado a numerosos Congresos y Conferencias, tomando parte activa en diversos foros internacionales del mundo de la hidrodinámica.
- La experiencia acumulada en el Canal de Ensayos Hidrodinámicos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales en los últimos años, demuestra que al menos el 20% de los alumnos tiene contacto directo con la investigación y que el 14% de estos alumnos, dedican su actividad profesional a esta investigación.

AGRADECIMIENTOS

A los 20 Profesores e investigadores, a las 6 personas pertenecientes al personal de Administración y Servicios y a los 116 alumnos que han hecho posible estos trabajos. A las Empresas, recogidas en el anexo, que han considerado que la investigación no es un gasto sino una inversión.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Godino Gil, C., "Teoría del Buque y sus Aplicaciones (Estática del Buque)". Ed Gustavo Gili, S.A., Barcelona, 1956.
- [2] Tursini, L., "Leonardo da Vinci and the Problem of the Navigation and Naval Design", Transactions del I.N.A., Vol. 95 pag. 97-102. Londres 1953.
- [3] Aláez Zazurca, J.A., "Los Ensayos con Modelos y el Desarrollo de la Hidrodinámica", Publicación nº 147, Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo. Noviembre, 1998.
- [4] Lewis, E.V., "Principles of Naval Architecture", Vol. II, SNAME, Nueva York 1988.
- [5] Montero Montalvo, J.M., "Modelización y simulación del comportamiento del buque en aguas tranquilas con aplicación a estudios de maniobras en puertos". Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales (U.P.M.) , publicada por el Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. 1992
- [6] Sierra, H., "Inauguración del Canal de Experimentación Naval de la ETSIN, de Madrid. Descripción del nuevo canal". Ingeniería Naval, nº 384. Junio 1967.
- [7] Mazaredo, L., "Proyecto de Canal de Experiencias para la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Navales", Conferencia pronunciada el 3 de mayo de 1961 en la ETSIN y recogida en Ingeniería Naval, nº 311. Mayo 1961.
- [8] Pérez Rojas, L. y Abad, R., "Teoría del Buque (Prácticas)". E.T.S.I.Navales, Sección de copias. Octubre 1991.
- [9] Pérez Rojas, L., "Los Ensayos Hidrodinámicos en la Ingeniería Naval". II Jornadas Nacionales de Innovación en las Enseñanzas de las Ingenierías. Universidad Politécnica de Madrid. Diciembre de 1996.
- [10] Pérez-Rojas, L. y Zamora, R., "Some Contributions to the Scale Effect on the Ship Roll Damping Coefficient", International Workshop On the Problems of Physical and Mathematical Stability Modelling", Mayo 1993, Proceedings editados por el Kaliningrad Technical Institute for Fisheries, Kaliningrado (Rusia).
- [11] Valle, J. , " Estudio Teórico Experimental de las no linealidades del amortiguamiento en el movimiento de balance de buques". Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid. 1999.
- [12] ITTC(Resistance Committee), "Final report and Recommendations to the 22nd". International Towing Tank Conference, Proceedings Vol. 1, pág. 173-247. Seúl, Corea y Shanghai, China. Septiembre 1999.
- [13] Abad Arroyo, R., "Estudio de los Movimientos del Buque y su Amortiguación por Estabilizadores Activos", Tesis Doctoral, E.T.S.I.Navales, Universidad Politécnica de Madrid, Diciembre 1988.

- [14] Tulin, M.P., "The Separation of Viscous Drag and Wave Drag by Means of Wake Survey". DTMB, Report 772. Julio 1951.
- [15] Wu, J., "The Separation of Viscous From Wave-Making Drag of Ship Forms". Journal of Ship Research, Junio 1962.
- [16] Moreno, M., Pérez-Rojas, L. y Landweber, L., "Effect of Wake on Wave Resistance of a Ship Model". Iowa Institute of Hydraulic Research. Report nº 180. Agosto 1975.
- [17] Pérez Rojas, L., "Influencia de la rugosidad en la resistencia viscosa obtenida por mediciones de la estela". Tesis Doctoral. E.T.S.I.Navales, Universidad Politécnica de Madrid. Enero 1982.
- [18] Pérez-Rojas, L., "Effect of Surface Roughness on the Viscous Resistance of a Ship Model Determined by a Wake Survey". M.Sc. Thesis. University of Iowa. Diciembre 1975.
- [19] Bravo Ramos, R., "Instalación y puesta en operación de un sistema de medida de la resistencia por formación de olas de buque a partir del perfil del oleaje del modelo". Tesis Doctoral. E.T.S.I.navales, Universidad Politécnica de Madrid, Febrero 1992.
- [20] Tsai, C.E. y Landweber, L., "Further Development of a Procedure for Detremination of Wave Resistabce from Longitudinal-Cut Surface-Profile Measurements". Journal of Ship Research, Vol. 19. Junio 1975.
- [21] Moreno, M., "Experimental Study of the Influence of the Wale on the Wavemaking Resistance of a Ship Model". M. Sc. Thesis. The University of Iowa. Diciembre de 1975.
- [22] Pérez Rojas, L. y Bravo Ramos, R., "The Direct Determining of the Wavemaking Resistance". CRF-94, Transactions of Second International Conference in Commemoration of the 300th Anniversary of Creating Russian Fleet by Peter the Great and 290 years of Admiralty Shipyards. San Petersburgo. Rusia. Junio 1994.
- [23] Zamora Rodríguez, R., "Bifurcaciones de la Ecuación de Balance no Lineal del Buque". Tesis Doctoral. E.T.S.I.Navales, Universidad Politécnica de Madrid. Febrero 1993.
- [24] Flores Gómez, J., "Análisis hidrodinámico de toberas y parámetros que inciden en sus aplicaciones". Tesis Doctoral. E.T.S.I.Navales. Universidad Politécnica de Madrid. Mayo 1993.
- [25] Diez de Ulzurrun, I., "Aportaciones al diseño dinámico de buques", Tesis Doctoral. E.T.S.I.Navales, Universidad Politécnica de Madrid. Septiembre 1993.
- [26] Ortega y Gasset, J., "Misión de la Universidad y otros ensayos sobre educación y pedagogía", Revista de Occidente en Alianza Editoroal. Madrid, 1992.
- [27] Himeno, Y., "Prediction of Ship Roll Damping. State of the art". The University of Michigan, report nº 239. Septiembre 1981.
- [28] Valle, J. y Pérez-Rojas, L., "Study of Ship Roll Decrement Test in Calm Water", 6th. International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles. Varna, Bulgaria. Septiembre 1997.

- [29] Pérez Rojas, L., Zamora, R. y Valle, J., "El Efecto de Escala en la Determinación del Movimiento de Balance de un Buque". II Jornadas Ibéricas de Ingeniería Naval, "Seguridad, Calidad y Medio Ambiente en las Industrias Marítimas". Comunicaciones editadas por C. Guedes y A. Mira. Lisboa. Noviembre 1997.
- [30] Valle, J., Pérez Rojas, L. y Carrillo, E., "Influences of Test Parameters on Roll Damping Coefficients". 7th. International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles. Tasmania (Australia), Febrero 2000 (trabajo aceptado por la Conferencia).
- [31] Ingeniería Naval, "Por primera vez participará un balandro español, el "Licor 43", en la regata Withbread". Ingeniería Naval nº 536. Febrero 1980. Pçag. 55-57.
- [32] García Ferrández, A., "Estudio de las Fuerzas Laterales Producidas en Carenas Asimétricas con Grandes Apéndices". Tesis Doctoral. E.T.S.I. Navales, Universidad Politécnica de Madrid. Junio 1988.
- [33] Abad Arroyo, R., Núñez Basáñez, J.F., Pérez Rojas, L y Zamora Rodriguez, R., "Estudio Hidrodinámico de las Formas de Proa de Buques Atuneros". XXXV Sesiones Técnicas de Ingeniería Naval. Vigo. Mayo 1999.
- [34] Núñez, J.F. y Perez Rojas, L., "The Hydrodynamics Optimization of the Tuna Ships in Service". International Symposium on Technics and Technology in Fishing Vessels. Ancona, Mayo, 1997.
- [35] Molina Martí, A. y Nuñez Rivas, L., "El Proyecto de un Buque Crucero de Diseño Avanzado, dentro de una Política de I+D". XXXIV Sesiones Técnicas de Ingeniería Naval. Buque "DON JUAN". Noviembre 1998.
- [36] Michell, J.H. "The Wave Resistance of a Ship", Philosophical Magazine, Vol. 45, nº 272. 1898.
- [37] Pérez Rojas, L y Moreno, M., "Algunas Consideraciones sobre el Cálculo del Flujo Irrotacional alrededor del Buque", XIV Sesiones Técnicas de Ingeniería Naval, Canarias, 1976. Publicado en Ingeniería Naval, Marzo 1977 y como Informe nº 57 del Canal de Ensayos Hidrodinámicos de El Pardo.
- [38] Pérez Rojas, L. y Moreno, M., "El Flujo Potencial en Cuerpos de Revolución equivalentes a Formas de Buques". XV Sesiones Técnicas de Ingeniería Naval, Junio 1977, Palma de Mallorca. Publicado en Ingeniería Naval, Mayo 1978.
- [39] Landweber, L y Macagno, M., "Irrotational Flow About Ship Forms". Report nº 123. Iowa institute Hydraulic Research. Diciembre 1969.
- [40] García Espinosa, J., Souto Iglesias, A. y Pérez Rojas, L., "Sobre los 'CFD'. Una Herramienta de Diseño en Buques de Crucero y Pasaje". XXXIV Sesiones Técnicas de Ingeniería Naval. A bordo del buque "DON JUAN". Noviembre 1998.
- [41] Hess, J.L. y Smith, A.M.O., "Calculation of Nonlifting Potential Flow About Arbitrary Three-Dimensional Bodies". Journal Ship Research, Septiembre 1964.

- [42] Bermejo, R.; Pérez Rojas, L.; Sánchez, J.M.; Souto, A. y Zamora, R., “Sobre una línea de investigación en hidrodinámica numérica”, Revista “Ingeniería Naval” nº 691, Febrero 1993.
- [43] Bermejo, R.; Pérez Rojas, L.; Sánchez, J.M.; Souto, A. y Zamora, R., “Una nota sobre esquemas para la integración de las ecuaciones de Navier-Stokes por elementos finitos en hidrodinámica”, Revista “Ingeniería Naval” nº 693, Abril 1993.
- [44] Dawson, C.W.; “A Practical Computer Method for Solving Ship Wave Problems” Proc. 2nd. Int. Conf. Numerical Ship Hydrodynamics, 1977 Berkeley, pp 30-38.
- [45] Bruzzone, D., “Numerical Evaluation of the Steady Free Surface Waves”. Proceedings of CFD Workshop Tokyo 94. Vol 1. Pag 126-134.
- [46] Raven, H.C., “A Solution Method for the Nonlinear Ship Wave Resistance Problem”. Tesis doctoral, Marin, 1996. ISBN 90-75757-03-4.
- [47] Bertram, V., “Fulfilling Open-Boundary and Radiation Condition in Free-Surface Problems Using Rankine Sources”. Schiffstecnik Bd. 37 - 1990.
- [48] Janson C.E., “Potential Flow Panel Methods for the Calculation of Free-surface Flows with Lift”. PhD Thesis, Chalmers University of Technology, Gothemburg, 1997.
- [49] Hughes, M. Bertram, V., “ A Higher-Order Panel Method for 3-DSurface Flows”. Institut fur Schiffbau der Universitat Hamburg. Bericht Nr. 558. Octubre 1995.
- [50] Pérez Rojas, L., Sánchez, J.M. y Souto, A., “A Practical Application of CFD: Optimization of a Bulbous Bow in a Ro-Ro Ship”, Proceedings First International Conference on Marine Industry. Varna, Bulgaria. Junio 1996.
- [51] ITTC; “Report of the Resistance and Flow Committee”, 21st. International Towing Tank Conference, Proceedings Vol. 1, pags. 439-514, Trondheim, Noruega. Septiembre 1996.
- [52] Dolphin, G.W.; “Evaluation of Computational Fluid Dynamics for a Flat Plate and Axisymmetric Body from Model-to Full-Scale reynolds Numbers”, M.Sc. Thesis, University of Iowa, mayo 1997.
- [53] Pérez Rojas, L., Sánchez, J.M., Zamora, R., Bermejo, R. y Souto, A., “La Calidad en el Software. Validación de ‘CFD’(Computational Fluid Dynamics)”. II Jornadas Ibéricas de Ingeniería Naval, Lisboa, Noviembre 1997. Publicado en Ingeniería Naval, Diciembre 1997.
- [54] García Espinosa, J., Pérez Rojas, L., Valle Cabezas, J. y Chacón Alonso, J.R., “El Proyecto BAJEL. Una herramienta de diseño hidrodinámico de Buques de Pasaje”. XXXIV Sesiones Técnicas de Ingeniería Naval. Buque “DON JUAN”, Noviembre 1998.
- [55] Primo Yúfera, E., “Introducción a la investigación científica y tecnológica”. Alianza Editorial. Madrid, 1994.
- [56] “El Canal de la Escuela en la ITTC”, Ingeniería Naval Agosto-Septiembre 1990. Pág. 385

- [57] Abad, R., García Ferrández, A., Montero, J.M^a., Pérez Rojas, L. y Zamora, R., “Aplicaciones Informáticas en un Canal de Ensayos Hidrodinámicos”. XXVIII Sesiones Técnicas de Ingeniería Naval. Madrid, Noviembre 1988. Publicado en Ingeniería Naval n° 654, Diciembre 1989.
- [58] Apestegui, C., Benito, L.M., Ferreras, F.J., López, P. y Miguelez, F., “Proyecto de optimización de embarcaciones deportivas a remo”. XXIX Sesiones Técnicas de Ingeniería Naval, Noviembre 1989.
- [59] Abad, R., García Ferrández, A., Montero, J.M^a., Pérez Rojas, L. y Zamora, R., “Relación Canal de Ensayos-Industria Pesquera”. XXX Sesiones Técnicas de Ingeniería Naval. Bilbao, Noviembre 1990. Publicado en Ingeniería Naval n° 673, Julio 1991.
- [60] Fonseca, N., Pérez Rojas, L. y Guedes Soares, C., “Estudo Teórico Experimental do Comportamento no Mar de um Atuneiro”. I Jornadas Ibéricas de Ingeniería Naval. Madrid, Noviembre 1995. Publicado en Ingeniería Naval n° 733. Diciembre 1996.
- [61] O’Dogherty, P., Moreno; M. y Pérez Rojas, L., “Fisging Boats Stability Criterion, Obtained from Statistical Analysis of Ship Losses”. Proceedings Second International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, Stability’82. Tokyo, Octubre 1982.
- [62] Pérez Rojas, L., “Segunda Conferencia Internacional sobre Estabilidad de Buques y Artefactos Navales (Stability’82)”. Ingeniería Naval n° 570. Diciembre 1982.
- [63] Zamora, R., Sánchez, J.M. y Pérez Rojas, L., “Bifurcation Set of Rolling Equation in Beam Seas: Two Different Behaviours”. 6th. International Conference on Stability of Ship and Ocean Vehicles. Varna, Bulgaria. Septiembre 1997.
- [64] Pérez Rojas, L. y Apestegui, C., “The Spanish Shipbuilding at the Time of the King Peter the Great”. CRF-94, Transactions of Second International Conference in Commemoration of the 300th Anniversary of Creating Russian Fleet by Peter the Great and 290 years of Admiralty Shipyards. San Petersburgo. Rusia. Junio 1994.
- [65] Pérez Rojas, L., “Estudio Teórico-Experimental del comportamiento de un buque pesquero en la mar”. Proceedings IV Seminario Internacional de Buques Pesqueros. Universidad Austral de Chile, Valdivia (Chile), Octubre 1995.
- [66] Pérez Rojas, L., “Some Aspects of Flow Physics on Ship Resistance”. Proceedings 1st. International Congress on Maritime Technological Innovations and Research. Barcelona Abril 1999. ISBN: 84-7653-715-8

ANEXO

EMPRESAS QUE HAN CONTRATADO CON EL CANAL DE LA ETSIN TRABAJOS DE INVESTIGACIÓN

Astilleros Reunidos del Nervión, S.A.
Hiperbatea, S.A.
Junta del Puerto de Algeciras-La Línea
General de Túnidos, S.A.
Hijos de J. Barreras
Laboratorio de Puertos y Costas (CEDEX)
D. José Moyá Muñoz
BAZÁN- San Fernando
BAZÁN- Cartagena
Astilleros de Huelva, S.A.
Inpesca, S.A.
Astilleros Gondán, S.A.
Astilleros Balenciaga, S.A.
Innabal, S.L.
DIT-HARRIS (Venezuela)
Desafío Español Copa América-92
SENER, S.A.
Astilleros Españolas, S.A.
Naviera Balcaria, S.A.
Europex Development, S.A.
Innaves, S.A.
Compañía Copa América 95. Desafío Español, S.A.
Subibor, S.A.
Astilleros Zamacona, S.A.
Astilleros Canarios, S.A.
BAZÁN- Madrid
U.N.V., S.A.
Enrique Lekuona, S.L.
Cintranaval, S.L.
Factorías Vulcano, S.A.
Albacora, S.A.
I.N.T.A.
Pesquerías de Túnidos, S.A.
Compañía Trasmediterránea, S.A.
Talleres Navales de Valencia, S.A.
SECEGSA
Overseas Tuna Company N.V.
Intertuna N.V.
Calvopesca, S.A.
Astilleros y Maestranzas de la Armada de Chile
Astilleros M. Cíes, S.L.
Polyships, S.A.
Juliana Constructora Gijonesa, S.A.