INGENIERIA NAVAL

AÑO LVII - NUMEROS 650-651
AGOSTO-SEPTIEMBRE 1989

REVISTA EDITADA POR LA ASOCIACION DE INGENIEROS NAVALES DE ESPAÑA

FUNDADOR:

† **Aureo Fernández Avila,** Ingeniero Naval.

DIRECTOR:

Guillermo Zataraín Gutiérrez de la Concha, Ingeniero Naval.

DIRECCION Y ADMINISTRACION

Domicilio: Castelló, 66.
28001-Madrid.

Teléfonos 275 10 24 / 577 16 78

Télex: 43582 INAV-E.
Fax: 577 16 79

SUSCRIPCION ANUAL

España (incluido IVA)	**3.800**	**pesetas**
Ceuta, Melilla, Canarias y Portugal	**3.600**	»
Hispanoamérica	**5.300**	»
Resto del mundo	**6.200**	»
Precio del ejemplar	**500**	»

NOTAS

No se devuelven los originales. Los autores son directamente responsables de sus trabajos. Se permite la reproducción de nuestros artículos indicando su procedencia.

PUBLICACION MENSUAL

ISSN: 0020 - 1073

Depósito legal: M. 51-1958

MARIARSA, Impresores - Tomás Bretón, 51 - 28045-Madrid

INDICE DE MATERIAS

Págs.

Entrevista

Con el Director General de la Marina Mercante, don Rafael Lobeto Lobo 348

Artículos

Obtención de las características hidrodinámicas de resistencia y propulsión del buque a partir de ensayos con modelos, por **Antonio Baquero** 352

Aplicaciones del diseño asistido por ordenador a las superficies desarrollables (segunda parte), por **Víctor Villoria San Miguel** 369

Isaac Peral y el desarrollo de la navegación submarina, por **Antonio Villanueva Núñez** 378

Historia

La Expedición Malaspina (1789-1794) doscientos años después.—II. Un marino ilustrado, por **Juan Pimentel Igea** 398

Pagina Jurídica

La colegiación obligatoria para el ejercicio profesional: es constitucional, por **José Antonio Ferrer Sama** 401

Noticias

ASTILLEROS

La política japonesa 404
Buques de ocasión 404

TRAFICO MARITIMO

Informe anual del GCBS 405

VARIOS

Publicaciones de la C.E.I. 405
Curso sobre fiabilidad estructural 405

Bibliografía 406

Portada

Motores Echevarría-Wartsila Vasa 22 y 32

Con el Director General de la Marina Mercante

RAFAEL LOBETO LOBO

Los trabajos y reajustes de los diversos sectores profesionales ante la realidad que vive nuestro país, cada día más comprometido e integrado a Europa, pasan inadvertidos con frecuencia a la opinión pública que, sin embargo, recibe cada día mayor contingente de informaciones parciales. Tal vez por eso, el grado de atención, de sorpresa y de interés se aminoran en el público. Se establece una lucha constante entre los diversos temas y sectores por hallar lugar y pronunciamiento en los medios de difusión que muchas veces apenas si pueden canalizar la circulación y publicación de notas y despachos de agencias sin profundizar demasiado, ni suficientemente siquiera, en el seguimiento de esas realidades complejas, interrelacionadas más de lo que parece a primera vista y en marcha hacia el logro y consecución de metas concretas.

Desde hace meses, en nuestra labor de observación de todo cuanto afecta a la vida de la mar, hallamos una más que coincidente afluencia de notas, declaraciones, pasos dados y proyectos del sector de la Marina Mercante. Por ello hemos escogido para nuestra entrevista en este número de INGENIERIA NAVAL al Director General de la Marina Mercante, don Rafael Lobeto Lobo, toda una biografía, que aunque joven, muy joven, está comprometida y jalonada de labores y acciones impulsadas, desde sus distintos puestos de trabajo, hacia la mejora constante del sector en sus aspectos más varios de desarrollo, producción, seguridad y adaptación, y basada en una mayor capacitación que haga posible una plena competitividad en los difíciles tiempos que vivimos. Desde el primer momento de conectar la entrevista pudimos comprobar una actitud de celeridad en la Dirección General de la Marina Mercante inusual en los tiempos veraniegos que dicen adios a julio y se disponen a recibir al mes de agosto. Fuimos recibidos sin dejar pasar fechas. El Director General venía de un encuentro con ANAVE y en su agenda, después de la entrevista, figuraban dos reuniones más. La entrevista, sin embargo, sucedió sin prisas ni agobios. Unas consideraciones generales sobre la realidad y el pasado, centra la conversación. El problema de la Marina Mercante española está en que España ha mostrado cierta insensibilidad hacia lo marítimo, nuestro atraso marítimo, por tanto, viene de lejos... etc., y puntualiza:

—...y claro, todos los problemas acumulados no pueden arreglarse de la noche a la mañana. Por otra parte, lo positivo de la cuestión de haber esperado tanto tiempo en ponerse al día o tratar de ponerse al día y ser el último país en tomar decisiones en materia de política marítima, es que, de alguna forma, podemos ver los resultados en los países que tomaron esas decisiones con anterioridad, resultados que no son todos iguales en cada caso, naturalmente. Para nosotros es un hecho histórico fundamental poder ver esas realidades en otros países y contemplar que nos puede crear problemas con esos países. Somos ahora un país de la Comunidad Europea y, por tanto, es desde este ámbito desde donde se deben dar respuestas a los pro-

blemas de política marítima, porque la tentación de la situación anterior, en la que cada uno de los países tomaban sus decisiones en lugar de conducir a un mercado único, lo que hace es contribuir a la construcción de una situación cada vez más contradictoria.

—¿Como discurre el tema de los planes de viabilidad?

—Las comisiones interministeriales elaboraron los estudios que encargó la Comisión Delegada del Gobierno. Hoy podemos decir que tenemos una información muy completa. Los planes de viabilidad se han constituido prácticamente a finales de 1988. No se puede decir que haya ido a buen ritmo pero a partir de aquí todo está sufriendo una aceleración importante y para finales de este año yo creo que empezaremos a ver resultados. Tal vez hemos pasado la fase peor. Es como cuando se construye un ferrocarril ¿no? Mientras se acaban de colocar las vías los trenes no circulan y las gentes desconfían que el tren llegue a circular algún día. No tenemos aún solución de todos los problemas, en absoluto, pero estamos ya ante un paquete de decisiones importantes que va a permitir desarrollar los planes de viabilidad entre este año y el que viene.

—Recientemente he leído una información en la prensa en la que se afirmaba que la Administración impulsaría la formación de consorcios y grupos de empresas en el sector de la Marina Mercante. ¿Quiere ampliarnos este titular?

—Sí. Un tema importante, diríase fundamental, en la Marina Mercante española, es que el tejido empresarial se reponga de una manera más fuerte. Porque uno de los problemas que ha tenido nuestro sector es la atomización, cosa sobradamente conocida. O sea, que hay una media muy baja de la relación empresa buque. Nosotros pensamos que de cara al mercado de competencia, que está ahí, esa relación debe ser resuelta. Y no es que se trate de simplificar y decir que sólo va a haber grandes empresas. Lo que sí parece obvio es que entre todas las fórmulas de fusión, asociación, organización, servicios comunes, encontraremos la clave idónea. Estoy pensando en que varias empresas se reúnan para tener un servicio de reparaciones común, un servicio de mantenimiento común, un servicio informático común o que las líneas comerciales establezcan una red comercial común también. Eso no sólo no entraña ningún problema en sí, sino que es algo absolutamente aconsejable y va a reducir los costes de escala y a favorecer la racionalización del sector. Es posible también que en algunos casos todo esto conduzca a fusiones de empresas, pero en todo caso eso sería un elemento voluntario. Nosotros lo que decimos, con entera claridad, es que para que el sector se modernice y sobreviva se debe racionalizar y la atomización no parece buen esquema.

"Somos un país de la Comunidad Europea y, por tanto, es desde este ámbito desde donde se deben dar respuestas a los problemas de política marítima."

"Los planes de viabilidad se han constituido a finales de 1988 y a finales de este año empezaremos a ver resultados."

"De cara al mercado de competencia, que está ahí, la relación empresa-buque, que tiene una media muy baja, debe resolverse."

"Entre todas las fórmulas de fusión, asociación, organización, servicios comunes... encontramos la clave idónea."

MARITIMA ANTARES Y LINEAS REGULARES, PRIMEROS PLANES ESTUDIADOS

—Volviendo al tema de los planes de viabilidad, en la actualidad son ya 85 empresas navieras las que lo han presentado. ¿Cómo ve estos planes presentados la Dirección General de la Marina Mercante?

—La Dirección General sólo tiene una información general de estos planes que están en poder del Consejo de Administración de la sociedad estatal creada para decidir sobre los planes de viabilidad. Aún no hemos empezado a estudiar los planes concretos. Digamos, para ser más exactos, que estamos ultimando los primeros que van a ser presentados a la Comisión Delegada, concretamente me refiero al de Marítima Antares y al de Líneas Regulares. No puedo en estos momentos adelantar más datos sobre otros planes hasta que no estén debidamente informados.

—Queda claro el grado de prudencia necesaria en estos momentos, señor Director General. Además cualquier adelantamiento de noticias a este respecto —me refiero al caso que ha citado de Marítima Antares y al de Líneas Regulares— que parecen van por buenas vías de resolución, no supondría

para este periodista ninguna exclusiva, ya que a la hora de ver la luz esta entrevista en INGENIERIA NAVAL, los acontecimientos habidos entonces serán de dominio público. Pasemos, por tanto, a otro tema si le parece. Por ejemplo, las empresas piden tres cosas: reducción de aportaciones a la Seguridad Social; disminución de costes fiscales, y reducción de plantillas en un 13,4 %. ¿Qué podría decirnos al respecto? ¿Cómo ve estas peticiones?

—Bueno. Digamos que los procesos de reestructuración o de reforma, de modernización diríase mejor, de la flota mercante están divididos en varias fases. Una es la de los planes de viabilidad. Dentro de esos planes se va a abordar la mejora de la estructura económica, financiera de la empresa, el estudio del tema de racionalización de tripulaciones con todo lo que comporta la seguridad abordo, la renovación tecnológica de los buques y los procesos de formación de las propias tripulaciones, todo ello conectado con la propia y nueva reorganización de las empresas. Pero aparte de esto se plantea un problema, y es cómo resolver, como se ha hecho en Europa, el tema de las medidas institucionales. Eso no va a poder ser resuelto de momento. Eso es otra parte que está pendiente porque requiere un proceso legislativo muy complejo en el que la Administración está trabajando, desde luego, pero no va a ser resuelto dentro de este marco. Tiene, como digo, un proceso que pertenece a otro marco, el legislativo.

Juntos a estos dos aspectos hay un tercero que es la modernización legislativa del sector, su ordenación que esperamos que se produzca a través del proyecto de Ley de Ordenación que actualmente tenemos en fase de elaboración. Tenemos, pues, tres fases distintas que entraña cierta complejidad debido a que van a ser, deben y tienen que estar coordinados con lo que sea la política comunitaria.

INTERLOCUTORES SOCIALES Y ADMINISTRACION DE ACUERDO

—¿Cómo ve la Marina Mercante española en estos momentos? Una visión global.

—En estos momentos veo que la Marina Mercante española sale de una situación de cierto marasmo o de cierta inconcreción de objetivos y de deseos. Empieza a cundir una cuestión que me parece importante... o dos cuestiones si se quiere: una, que la Marina Mercante se mueve —como diría Galileo—, que es una cosa importante, y, otra, que empieza a haber ilusión. ¿Eso quiere decir que están todos los problemas resueltos? Qué va, de ninguna manera. Aquí hay muchos problemas y cuestiones que hay que resolver pero quiero decir que se empieza a afrontar el tema; primero, con un apoyo de los interlocutores sociales, tanto de la patronal como de los sindicatos, y con un diálogo entre ellos no exento de contradicciones, ¿cómo no? que se ha plasmado en un acuerdo entre interlocutores sociales y la Administración. Segundo, con la mayor coherencia entre lo que es nuestra posición como país miembro de la Comunidad Europea y lo que se llama nuestra posición interna. Y tercero, como un análisis de la situación en el que hay una gran unanimidad. Estamos, está el sector, práctica y unánimemente de acuerdo en cuál es la situación y cuáles las medidas que hay que tomar. Ahora sólo falta que convenzamos al resto del país de que esas medidas son necesarias de tomar porque son de interés general para el país.

La situación, por tanto, es de absoluto tránsito. Nos introducimos de lleno en planes de viabilidad, acabamos de salir de la presidencia del Consejo de Europa, creo que con un prestigio reconocido —no lo digo yo, Director General, sino el resto de los Estados miembros— y tenemos ante nosotros un momento decisivo. Primero, hay que reformar absolutamente la Administración, hay que cambiar la normativa, hay que cambiar también la dotación de medios y materiales, los procedimientos, los sistemas relacionales con el sector... Es un momento en el que después de ir esperando a ver qué pasaba, hay que arreglar todos estos temas, uno detrás de otros, porque todos a la vez tampoco se puede.

Lo que sí digo es que en lo que queda de año vamos a dar respuesta a un buen número de los problemas apuntados. Eso, sin duda.

"Para que el sector se modernice y sobreviva se debe racionalizar, y la atomización no parece buen esquema."

"Reducción de aportaciones a la Seguridad Social, disminución de costes fiscales y reducción de plantillas, tres peticiones que no entran dentro del marco de los planes que se llevan a cabo ahora."

"La modernización legislativa, su ordenación, esperamos que se produzca a través del Proyecto de Ley de Ordenación."

"La Marina Mercante española sale del marasmo y de la inconcreción, se mueve y empieza a cundir la ilusión."

"La construcción del mercado único va a exigir a nuestra Marina Mercante una serie de retos de signo positivo a través del proyecto del Instituto Europeo y de la participación en programas europeos."

"Hemos elevado al Consejo de Universidades una definición de nuevas áreas: Náutica, Derecho Marítimo, máquinas marinas y radioelectrónica."

SEIS MIL MILLONES DE PESETAS PARA AYUDAS EN 1989 Y NUEVE MIL MILLONES PARA 1990

Sigue nuestro entrevistado aportando datos y argumentos y se refiere especialmente a los recursos disponibles para ayudas: seis mil millones de pesetas presupuestados para este año y más de nueve mil para 1990. La serie de retos que la Marina Mercante va a tener que afrontar en los próximos años es otro tema de la conversación.

—Ahí cerca tenemos el año 1992 y la construcción del mercado único. ¿Cómo ve el tema?

—La construcción del mercado único va a exigir, sin duda, en el tema

marítimo una serie de retos, evidentemente. Primeramente ya ha exigido una gran reto de la Comunidad al preguntársele si quiere tener Marina Mercante y la Comunidad ha dicho que sí y que hay que hacer lo necesario para tenerla. España, lo mismo, está dispuesta a tener flota y tener flota competitiva. Esto para nosotros pasa por tener armadores, tener buques y tener tripulaciones. Todo lo que sea fomentar, impulsar, en lo establecido en el tratado sobre libre establecimiento, sobre libertad de prestación de servicios, sobre libre tránsito de trabajadores (tripulantes, técnicos, profesionales) a nosotros nos parece favorecedor del proceso de integración europea y una contribución importante a la consecución del mercado único. Y en ese sentido España va a jugar un papel, entiendo, positivo, porque tenemos en marcha junto con el Proyecto del Instituto Europeo y otra serie de iniciativas, la participación en toda una serie de programas europeos que van desde la Investigación y Desarrollo al fomento de la cooperación en la materia de las subvenciones marítimas, lucha contra la contaminación y otros temas que buscan una aproximación de las políticas nacionales.

OTROS PROYECTOS EN MARCHA

—Sabemos que la Dirección General de la Marina Mercante tiene muchos proyectos en marcha, proyectos que son la clave de esa renovación y de esas mejoras que nos apunta. No es posible analizarlas todas pero sí quisiera saber algo, lo que sea posible en los momentos actuales, sobre algunas cuestiones. Por ejemplo, ¿reforma para obtener el título para el gobierno de embarcaciones de recreo y de más?

—Tenemos un borrador en circulación entre los distintos representantes del sector. Se han empezado a recibir indicaciones y creo que pasado el verano estará listo para publicarlo.

—¿El Real Decreto por el que regula el tráfico de embarcaciones de alta velocidad?

—Se encuentra en situación similar. Se está trabajando y existe por este tema un gran interés por parte de distintos ministerios. Interior, nosotros por supuesto, Economía y Hacienda... Hay que destacar la labor realizada por el gobernador civil de Pontevedra. Afecta, como sabe, al tema del contrabando y a la lucha contra la droga, tema importante; existía la voluntad de haberlo sacado ya pero creo es cuestión de meses, pocos meses.

—¿La Ley de Ordenación de la Marina Mercante?

—También está en fase similar. Estamos acercando posiciones por los distintos Departamentos: Interior, MOPU... y en septiembre u octubre también estará el tema más o menos ultimado, al menos a nivel técnico, luego puede retrasarse por otra serie de decisiones.

—¿Plan Nacional de Salvamento?

—En estos momentos estamos abordando la instalación y puesta en marcha del Centro de Coordinación de Salvamento en esta casa. Vamos retrasados porque surgieron dificultades, pero últimamente se avanza en las posibilidades de cooperación con otros órganos de la Administración: Ministerio de Hacienda, con todo lo que son Aduanas, con la propia Cruz Roja, con Telefónica... de cara a que definiendo las necesidades sobre remolcadores, sobre lanchas de salvamento, lanchas contra la contaminación, de cómo se articula todo eso en un programa general en el que cada cosa ocupe su sitio, cómo pueden ser las torres de control de tráfico...

—¿Cómo marcha el tema de los estudios, lo que pudiéramos denominar Plan Didáctico del Marino Mercante?

—Se está culminando la fase de integración de la Escuela en la Universidad. Hemos elevado al Consejo Superior de Universidaes una definición de nuevas áreas en la que destaca esencialmente la de Náutica. Otra área de Derecho Marítimo y después las correspondientes a las máquinas marinas y a la radioelectrónica que habrá de salir a información pública.

Hasta aquí las preguntas y sus respuestas. Da la impresión de que pasado algún tiempo, no mucho, volveremos por esta casa, por este despacho del señor Lobeto Lobo en busca de noticias a la vista de que es grande el paquete de cuestiones a punto de culminarse y, por tanto, aptas ya para desglose y conocimiento a fondo. Una reunión espera a nuestro entrevistado desde hace ya bastantes minutos.

F. PRADOS DE LA PLAZA

OBTENCION DE LAS CARACTERISTICAS HIDRODINAMICAS DE RESISTENCIA Y PROPULSION DEL BUQUE A PARTIR DE ENSAYOS CON MODELOS

Por Antonio Baquero (*)
Dr. Ing. Naval

RESUMEN

En este trabajo se pretende dar una visión actualizada de los métodos existentes para predecir la potencia propulsiva del buque a partir de ensayos con modelos a escala reducida. Se estudia, en primer lugar, la correlación modelo-buque en la resistencia al avance, dedicando especial atención a los problemas relacionados con el factor de forma y presentándose un análisis estadístico de dicho parámetro. A continuación se trata la correlación dentro del campo de la Propulsión, exponiéndose diversas consideraciones sobre el efecto de escala en los coeficientes propulsivos (rendimiento del propulsor, estela, succión y rendimiento rotativo-relativo). Finalmente se comparan los resultados obtenidos por diferentes métodos de correlación con las pruebas de mar de varios buques reales.

SUMMARY

This paper deals with model-ship correlation techniques in the field of Ship Resistance and Propulsion. After a brief introduction, procedures to extrapolate Ship Resistance are presented, with special emphasis on form factor determination. Form factor values of more than 100 ships are statistically analized. Afterwards, the scale effect on propeller efficiency is revised, as well as in wake fraction, thrust-deduction factor and relative-rotative efficiency. Finally some comparative results of prediction, obtained through "Standard" and "ITTC-78" correlation methods, with full-scale trials are presented.

INDICE

1. INTRODUCCION.

2. LA CORRELACION MODELO-BUQUE EN LA RESISTENCIA AL AVANCE.
   - **2.1. Generalidades.**
   - **2.2. El método de Froude.**
   - **2.3. El método de Hughes.**
   - **2.4. Métodos experimentales de obtención del factor de forma.**
   - **2.5. Análisis estadístico de los valores del factor de forma.**
   - **2.6. La corrección aditiva ΔC_F.**

3. LA CORRELACION MODELO-BUQUE EN LA PROPULSION.
   - **3.1. Generalidades.**
   - **3.2. Efecto de escala en el comportamiento del propulsor en aguas libres.**
   - **3.3. Efecto de escala en el coeficiente de estela.**
   - **3.4. Efecto de escala en los coeficientes de succión y rotativo-relativo.**

4. COMPARACION ENTRE LAS PREDICCIONES A PARTIR DE ENSAYOS CON MODELOS Y LOS RESULTADOS DEL BUQUE REAL.
   - **4.1. Método Standard.**
   - **4.2. Método ITTC-78.**
   - **4.3. Aplicación a casos reales.**

5. CONCLUSION.

6. AGRADECIMIENTO.

7. REFERENCIAS.

1. INTRODUCCION

Uno de los problemas más importantes de la Arquitectura Naval es la determinación, durante la fase de proyecto, de la potencia de la maquinaria propulsora necesaria para que el buque navegue a la velocidad deseada. A veces suele enfocarse también el mismo problema bajo el punto de vista inverso: estimación, antes de la construcción del buque, de la velocidad que éste desarrollará en pruebas con una determinada potencia propulsora instalada. Ambos enfoques traen con-

(*) Canal de Experiencias Hidrodinámicas de "El Pardo".

sigo adicionalmente, y por obvios motivos económicos, sendos objetivos de optimización, que son de mínimos en el primer caso y de máximos en el segundo.

La Hidrodinámica del Buque a través de dos de sus ramas, la Resistencia y la Propulsión, se enfrenta a este problema y encuentra en él, en buena medida, justificación a su existencia.

El tema es antiguo y ha constituido, durante más de un siglo, uno de los caballos de batalla de la Ingeniería Naval. En este largo período de tiempo, han sido notables los avances que ha experimentado la Hidrodinámica para llegar al anhelado objetivo de conocer matemáticamente, y por lo tanto, de forma resoluble sobre la mesa de trabajo y el papel, el comportamiento de un sólido moviéndose en el agua. Sin embargo, puede afirmarse rotundamente que, en nuestros días, y en el estado actual de los conocimientos sobre el tema, es absolutamente imposible poder predecir por medios exclusivamente teóricos y con mediano grado de aproximación la resistencia al avance de la carena de un buque y el comportamiento de una hélice funcionando a popa del mismo. La única solución, desde el punto de vista ingenieril, se encuentra, como en los viejos años de William Froude (ref. 1), en recurrir a la experimentación.

La experimentación en Hidrodinámica del Buque consiste en construir un modelo de la carena y de su hélice a escala reducida, ponerlo a flote en una piscina (que por su forma especial se denomina usualmente "canal") y hacer que se mueva, bien remolcado o bien autopropulsado. Durante estas pruebas (o "ensayos") se toman una serie de mediciones de diversas magnitudes físicas (resistencia al avance, par y empuje de la hélice, revoluciones de la misma, velocidades, etcétera) mediante equipos de medida de alta precisión. De esta forma puede conocerse, con elevada exactitud, el comportamiento hidrodinámico del modelo.

El siguiente paso radica en extrapolar al buque real los valores de las magnitudes físicas medidas en el modelo. Este proceso se denomina "correlación modelo-buque" y de su acertado planteamiento depende, de forma casi absoluta, el éxito en la resolución del problema expuesto al principio de este apartado.

Desgraciadamente, tampoco existe un método de correlación suficientemente correcto para poder predecir de forma exacta el comportamiento del buque a partir de los ensayos con el modelo, fundamentalmente por el número de simplificaciones que es necesario adoptar en dicho proceso para representar de forma asequible los complejos fenómenos físicos que se presentan.

Este artículo pretende pasar revista a los conocimientos y métodos más actuales sobre correlación modelo-buque con ánimo de que queden planteados los interrogantes no resueltos (las más de las veces) y exponer las soluciones que se han encontrado (las menos).

2. LA CORRELACION MODELO-BUQUE EN LA RESISTENCIA AL AVANCE

2.1. Generalidades

En la resistencia al avance influyen fundamentalmente fuerzas de origen viscoso y fuerzas de gravedad (perturbación de la superficie libre). Aplicando el Análisis Dimensional a estas premisas de partida, se llega a que la resistencia adimensionalizada depende del número de Reynolds (que gobierna los fenómenos viscosos) y del número de Froude (que rige los fenómenos de formación de olas). Es decir:

$$C_T = F(Rn, Fn) \qquad [1]$$

siendo:

$$C_T = \frac{R_T}{1/2\ \rho\ S\ V^2} \qquad Rn = \frac{VL}{\nu} \qquad Fn = \frac{V}{\sqrt{gL}}$$

donde:

C_T = Coeficiente de resistencia total.
Rn = Número de Reynolds.
Fn = Número de Froude.
R_T = Resistencia total al avance.
V = Velocidad del buque.
S = Superficie mojada.
L = Eslora del Buque.
g = Aceleración de la gravedad.
ρ = Densidad del agua.
ν = Viscosidad cinemática del agua.

El problema de la correlación modelo-buque estaría resuelto si se pudieran realizar los ensayos a igualdad de números de Reynolds y Froude que el buque. Es decir, empleando el subíndice **s** para el buque y **m** para el modelo, debería cumplirse simultáneamente:

$$(Rn)_s = (Rn)_m \qquad [2]$$
$$(Fn)_s = (Fn)_m$$

ya que entonces:

$$R_{Ts} = R_{Tm}\ (S_s/S_m)\ (V_s/V_m)^2\ \frac{\rho \text{ agua salada}}{\rho \text{ agua dulce}}$$

Desafortunadamente, las igualdades [2] no se cumplen más que para $\lambda \simeq 1$, es decir, para un modelo de tamaño casi igual al del buque. Es preciso realizar una hipótesis adicional (naturalmente simplificativa) que consiste en suponer que no hay interacción entre los fenómenos viscosos y la formación de olas. Entonces se puede reescribir la ecuación [1] de la forma:

$$C_T = F(Rn, Fn) = f(Rn) + g(Fn)$$

Realizando los ensayos a igualdad de números de Froude de modelo y buque (la igualdad de números de Reynolds es imposible de obtener por dificultades prácticas en la experimentación), la correlación consiste en:

$$C_{Ts} = C_{Tm} - f(Rn_m) + f(Rn_s)$$

C_{Tm} se obtiene de los ensayos y f debe ser una función conocida.

Según se haga la asignación de los fenómenos físicos presentes en la resistencia al avance a cada una de las funciones f y g se llega a dos métodos distintos de correlación: el método de Froude y el método de Hughes.

2.2. El método de Froude

Froude (ref. 2) divide la resistencia en dos componentes: una de fricción que es numéricamente igual a la de una placa plana de igual eslora y superficie mojada que el buque, y otra denominada residual, que abarca el resto de la resistencia, y que supone varía con el cubo de la escala. Esta última hipótesis es equivalente a hacerla depender de Fn.

De esta manera:

$$C_T = C_F + C_R \qquad [3]$$

donde:

$C_F = f(Rn)$ = coeficiente de fricción de placa plana;
$C_R = g(Fn)$ = coeficiente de resistencia residual;

y ambos están adimensionalizados con $1/2\ \rho\ SV^2$.

La resistencia de fricción de la placa plana ha sido objeto de multitud de formulaciones, tanto de origen teórico como empírico, no siendo ninguna de ellas totalmente satisfactoria por depender, en gran medida, del grado de rugosidad de la superficie y de la seguridad de que el flujo sea totalmente turbulento, como ocurre en el buque real. En 1957 la International Towing Tank Conference (I.T.T.C.) adoptó la resolución de recomendar el uso de una línea de correlación que no responde exactamente a la fricción de una placa plana, ya que incorpora un pequeño efecto de formas. Hoy en día esta línea, que se denomina ITTC-57, es ya de uso general y su formulación es:

$$C_F = \frac{0{,}075}{(\log_{10} Rn - 2)^2}$$

La hipótesis de Froude [3] incorpora un notable error: una buena parte de la resistencia residual (la fricción en una superficie curva y la resistencia de presión de origen viscoso creada por la existencia de una capa límite) depende realmente de Rn en lugar de hacerlo de Fn. Por lo tanto, parece que aplicando este método se ha de llegar a resultados erróneos. Sin embargo, ha sido usado durante muchas décadas (aún lo es frecuentemente en nuestros días) con predicciones satisfactorias.

La causa de este hecho, un tanto paradójico, estriba en que la resistencia total del buque real incluye otras componentes de menor cuantía que las de viscosidad y formación de olas, como son las debidas a mayor rugosidad del casco, influencia de pequeñas olas durante las pruebas de mar, viento asociado al buque, efecto del timón y guiñadas para mantener el rumbo medio del buque, etcétera. Todas estas componentes no aparecen en el modelo y se engloban en un coeficiente aditivo C_A. Por tanto, según el método de Froude:

$$C_{Ts} = C_{Tm} - C_F(Rn_m) + C_F(Rn_s) + C_A$$

El valor de C_A se obtiene normalmente de forma estadística comparando los resultados de las pruebas de mar con las predicciones realizadas a partir de los ensayos. En consecuencia, se incluye en él, además de los fenómenos antes descritos, el error inherente al método de Froude, por lo que con una adecuada elección de C_A pueden obtenerse valores correctos de la resistencia al avance del buque real. La utilización de C_A como valor compensatorio a la no inclusión en C_F de la resistencia viscosa debida a las formas del buque lleva consigo el que su valor numérico disminuya sensiblemente al aumentar la eslora. Asimismo, los buques de formas muy llenas (es decir, muy diferentes de una placa plana) requieren valores bajos de C_A, pudiéndose llegar, para esloras superiores a 225 metros, a valores negativos. Esto es conceptualmente poco riguroso, pues, en principio, C_A debería ser suma de pequeñas componentes de la resistencia evidentemente positivas.

Cada Canal de Experiencias o Centro de Investigación suele tener su propio Banco de Datos de los valores de C_A que es, normalmente, celosamente ocultado por constituir una parte importante del "know-how" de la Institución. En la figura 1 se presentan algunos valores recogidos en la escasa bibliografía existente. Todos ellos son relativos a la línea ITTC-57 y corresponden a Taniguchi (ref. 3), Guldhammer (ref. 4), National Physics Laboratory (ref. 5) y S.S.P.A. (Canal de Goteburgo) (ref. 6).

2.3. El método de Hughes

Hughes (ref. 7) propuso una descomposición de la resistencia al avance en dos partes: una debida a fenómenos viscosos, que depende de Rn y que es proporcional a la resistencia de fricción de la placa plana equivalente y otra debida a formación de olas que viene gobernada por Fn.

Así pues:

$$C_T = C_V + C_W$$

donde:

$C_V = f(Rn)$ = coeficiente de resistencia viscosa;
$C_W = f(Fn)$ = coeficiente de resistencia por formación de olas;

y además

$$C_V = r\ C_F \qquad [4]$$

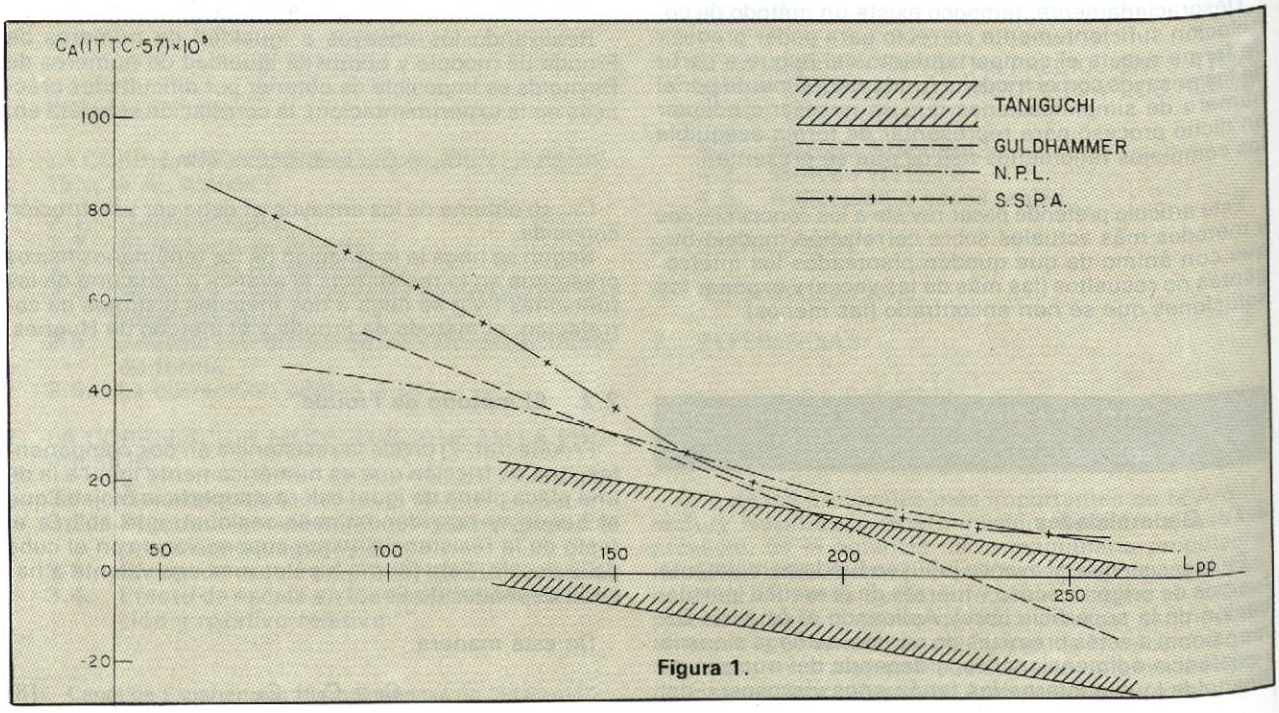


Figura 1.

El coeficiente r se denomina "factor de forma", ya que representa el aumento de resistencia viscosa debido a que el buque no es una placa plana, es decir, a que tiene unas formas. Evidentemente, se cumple $r > 1$ y en la práctica los valores usuales varían, dependiendo de las formas y proporciones del buque, entre 1,05 y 1,70, por lo que es frecuentemente denominar también al factor de forma como $(1 + k)$.

Es interesante observar que de [4] se deduce que el valor numérico de r viene ligado a la línea de fricción C_F que se esté utilizando, de manera que siendo intrínseco para un determinado buque y número de Reynolds el valor C_V, no lo son r ni C_F, sino su producto.

La correlación por el método de Hughes conduce, en consecuencia, a:

$$C_{Ts} = C_{Tm} - r_m C_F (Rn_m) + r_s C_F (Rn_s) + \Delta C_F \qquad [5]$$

El valor ΔC_F (corrección aditiva) incluye fundamentalmente efectos de rugosidad en el buque, así como (de la misma forma que C_A) aumentos de resistencia por mar, viento asociado, guiñadas, etcétera, durante las pruebas de mar.

La división de la resistencia al avance tal y como la propone Hughes es mucho más correcta conceptualmente que la que Froude (aunque sigue despreciando la interacción entre los fenómenos viscosos y de formación de olas) y, por tanto, conociendo de alguna manera el incremento de rugosidad en el buque, debería conducir a resultados más exactos.

Examinando la expresión [5] se observa que C_{Tm} puede obtenerse de los ensayos; r_m también se obtiene de los ensayos mediante técnicas especiales que luego se mencionarán, y C_{Fm} y C_{Fs} son conocidos a través de la línea de correlación empleada (por ejemplo, ITTC-57). Por tanto, para calcular C_{Ts} sólo quedaría conocer r_s pero este valor es imposible de hallar experimentalmente.

Basándose en ciertos razonamientos teóricos y algunos resultados empíricos (refs. 8 y 9) (y sobre todo impelido por la necesidad de que su método de correlación fuera viable), Hughes realizó la hipótesis de que r es independiente de Rn, y por tanto:

$$r_{modelo} = r_{buque} = 1 + k$$

con lo que [5] se convierte en:

$$C_{Ts} = C_{Tm} - (1 + k)(C_{fm} - C_{Fs}) + \Delta C_F \qquad [6]$$

La suposición de que los factores de forma de buque y modelo son iguales es una simplificación bastante arriesgada del problema, pues algunas componentes de la resistencia de formas, como la de presión de origen viscoso y la debida al desprendimiento de la capa límite, no puede asegurarse que sean proporcionales a C_F. De hecho, algunos autores como Tanaka (ref. 10) proponen una variación con C_F del tipo:

$$k = a + \frac{b}{\sqrt{C_F}} + \frac{c}{C_F} \qquad [7]$$

donde el término constante incluye los efectos bidimensionales, el término proporcional a $C_f^{-1/2}$ representa los efectos tridimensionales y el proporcional a C_F^{-1} la influencia de la posible separación del flujo.

De la expresión [7] se deduce que el factor de forma aumenta con el número de Reynolds, siendo además las constantes a, b, c, características de cada carena particular.

Esta tendencia de variación con Rn ha sido recientemente confirmada por diversos estudios teóricos basados en técnicas de integración de la capa límite en la popa (refs. 11 y 12), pero, sin embargo, los resultados experimentales no son todavía concluyentes por encontrarse a veces la tendencia opuesta. En estas condiciones, la hipótesis de Hughes de la constancia del factor de forma puede seguir siendo usada con ciertas garantías, aparte de su comodidad. Además, la pequeña inexactitud que esta hipótesis supone siempre es de mucha menor importancia que la que implica el método de Froude.

2.4. Métodos experimentales de obtención del factor de forma

El factor de forma del modelo se obtiene a partir de ensayos de remolque analizados convenientemente. Hughes propuso inicialmente realizar un ensayo a muy baja velocidad ($Fn < 0{,}10$), con lo que podía suponerse que $C_W \simeq 0$ y, por tanto, $r = C_T/C_F$, pero esta técnica ha sido desechada por la gran probabilidad de existencia de flujo laminar en el modelo a esas velocidades tan bajas, lo que falsearía notablemente el resultado, y por el error de los aparatos, de medida, que deja de ser pequeño cuando se están midiendo pocos gramos de resistencia de remolque.

Modernamente son dos los métodos experimentales más fiables: el de Prohaska y el del mínimo de la curva C_T — Rn, también propuesto por Hughes.

Prohaska (ref. 13) supone que el coeficiente de resistencia por formación de olas, para velocidades moderadas ($0{,}12 < Fn < 0{,}18$), varía con Fn^4, lo cual es bastante factible, ya que diversos estudios teóricos muestran una variación de R_W con V^6 en esa zona. De esta manera, para el modelo:

$$C_T = (1 + k) C_F + y\, Fn^4$$

$$C_T/C_F = (1 + k) + y\, Fn^4/C_F$$

que es la ecuación de una recta cuya ordenada en el origen es el factor de forma $(1 + k)$. Así pues, realizando un ensayo de remolque con varias carreras a $0{,}12 < Fn < 0{,}18$ y trazando la recta más probable que pase por los puntos de coordenadas (C_T/C_F, Fn^4/C_F) es fácil obtener $(1 + k)$.

Este método, generalizado para un exponente n ($3 < n < 8$), ha sido recomendado oficialmente por la I.T.T.C. e incluido dentro de su método de correlación ITTC-78 (ref. 14), que se describe con detalle más adelante.

El método del mínimo en la curva C_T—Rn se basa en que es bastante fácil de detectar el valor, que siempre se presenta, de dicho mínimo (fig. 2). Si Rn_o es el número de Reynolds correspondiente al mínimo de C_T, se demuestra analíticamente de forma sencilla (ref. 15) que:

$$r = 1 + k = \frac{[4 \log(Rn_o) - 8]}{[4 \log(Rn_o) - 7{,}13]} \times \frac{(C_T)\min}{C_F(Rn_o)}$$

Este método ofrece, a menudo, más garantías que el de Prohaska, ya que en este último el trazado de la recta indicado anteriormente puede ser problemático por la dispersión de los puntos o la curvatura que se presenta, lo que puede llevar a valores muy distintos de $(1 + k)$ según sea el criterio de trazado que se utilice. En la fig. 3, se presenta un ejemplo real en el cual se observa que si se valoran más los puntos de velocidad baja se obtiene $(1 + k) = 1{,}404$ y si se da más peso a la velocidad alta, se llega a $(1 + k) = 1{,}372$.

El autor ha analizado los resultados de un elevado número de ensayos llevados a cabo en el Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo, calculando el

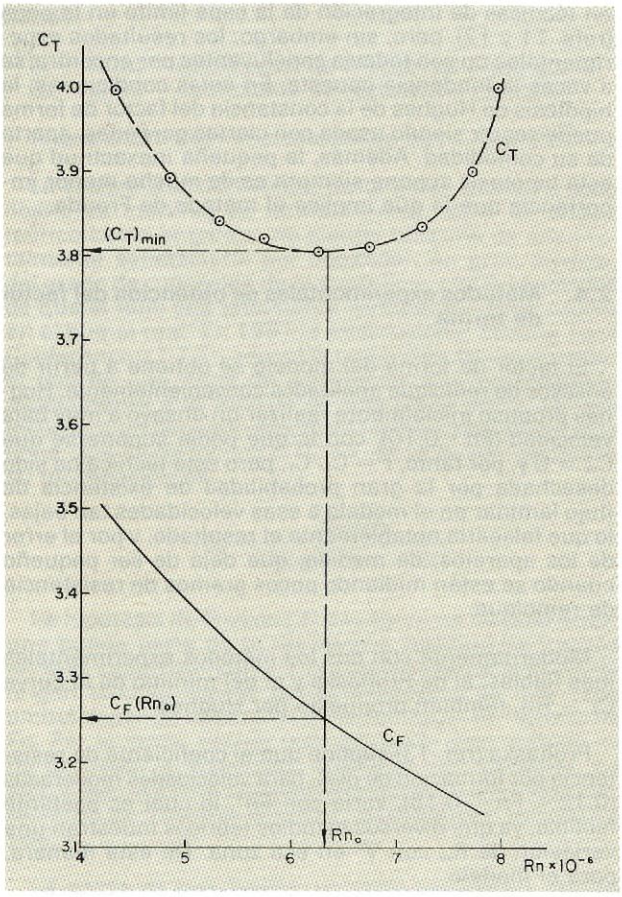


Figura 2.

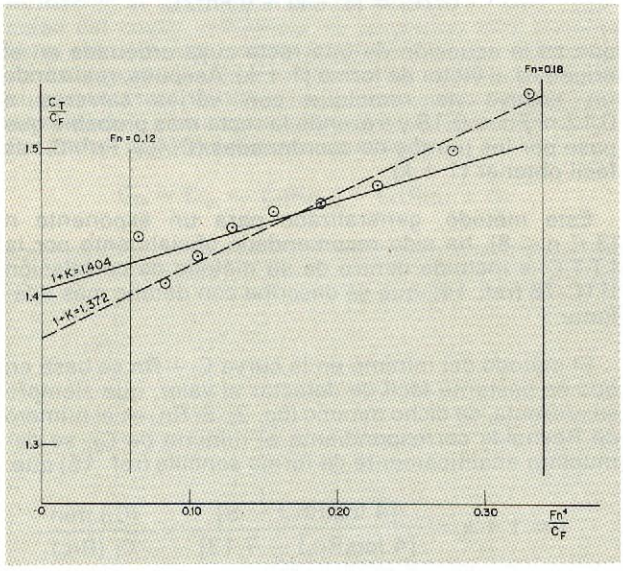


Figura 3.

factor de forma tanto por el método de Prohaska (con n = 4) como por el del mínimo.

Los resultados se presentan comparativamente en la fig. 4. De ella se deduce que ambos métodos conducen a resultados prácticamente idénticos en la mayoría de los casos. También se observa en dicha figura que la discordancia crece al hacerlo el factor de forma, lo cual es lógico, ya que los buques con gran resistencia viscosa presentan fenómenos de inestabilidad de flujo que dan origen a mayores dispersiones en las medidas tomadas durante los ensayos (ver fig. 3).

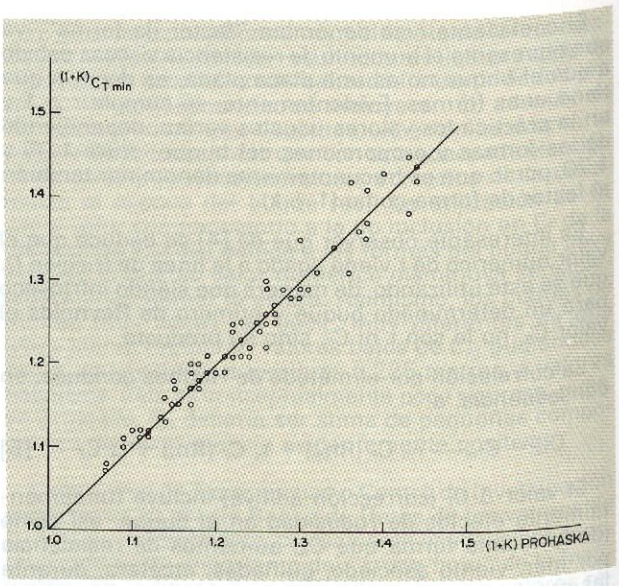


Figura 4.

2.5. Análisis estadístico de los valores del factor de forma

De lo dicho hasta el momento puede colegirse que, una vez elegida una determinada línea de fricción, el valor del factor de forma es intrínseco para cada buque y la única forma de obtener su valor con exactitud es por medios experimentales. Sin embargo, puede ser de gran utilidad conocer alguna relación matemática que le ligue con las dimensiones principales de la carena, dado que en muchas ocasiones es preciso realizar predicciones de potencia durante la fase de anteproyecto del buque, cuando aún no se poseen las formas definitivas y, por lo tanto, no se han realizado ensayos de canal.

A lo largo de los años se han propuesto multitud de fórmulas que relacionan el valor del factor de forma con los parámetros adimensionales de la carena. Todas estas fórmulas tienen en común un sustrato lógico de tendencias físicas [es decir, (1 + k) debe aumentar con C_B, disminuir con L/B, etcétera] y un tratamiento estadístico de la información obtenida de los ensayos.

A continuación se presentan algunas de las más usadas, en las que se han hecho las oportunas transformaciones para referirlas a la línea ITTC-57. Naturalmente, todas estas expresiones se refieren a k, ya que el valor 1 en el factor de forma corresponde a la placa plana.

1) S.S.P.A. (ref. 16)

$$k = -0{,}481 + 12{,}76 \frac{C_B}{L/B\ \sqrt{B/T}} - 45{,}5 \left(\frac{C_B}{L/B\ \sqrt{B/T}}\right)^2$$

2) HOLTROP (ref. 17)

$$k = -0{,}07 + 0{,}487 (B/L)^{1{,}07} (T/L)^{0{,}46} (L/L_R)^{0{,}12} (L^3/\Delta)^{0{,}36} \cdot (1 - Cp)^{-0{,}60}$$

donde Cp es el coeficiente prismático y L_R se define como

$$L_R = L \left(1 - C_P + 0{,}06 \frac{Cp\ X_B}{4\ Cp - 1}\right)$$

X_B es la posición longitudinal del centro de carena en % de la eslora (positivo a proa de la maestra).

Esta fórmula se refiere a formas de popa normales (intermedias entre U y V).

3) WATANABE (ref. 18)

$$k = -0{,}095 + 25{,}6 \frac{C_B}{(L/B)^2 \sqrt{B/T}}$$

4) TAGANO (ref. 19)

$$k = -0{,}151 + 8{,}91 \frac{C_M}{L/B \sqrt{B\, C_B/T}} \frac{B}{L_R}$$

donde C_M es el coeficiente de la maestra y L_R es la longitud del cuerpo de popa, que puede expresarse como:

$$B/L_R = \frac{2}{3} \frac{B}{L} \frac{1}{1 - Cp_A}$$

siendo Cp_A el coeficiente prismático del semicuerpo de popa.

5) GRANVILLE (ref. 16)

$$k = 0{,}036 + 11{,}97\, (C_B\, B/L)^2$$

6) PROHASKA (ref. 16).

$$k = -0{,}65 + 0{,}077\, B/T - 0{,}024\, (B/T)^2 + \\ + 9{,}87\, C_B\, B/L - 24{,}8\, (C_B\, B/L)^2$$

7) SASAJIMA (ref. 20)

$$k = -0{,}074 + 4{,}51 \frac{C_B^2}{L/B \sqrt{B\, C_B/T}} + \\ + 0{,}146 \frac{P}{L/B \sqrt{B\, C_B/T}}$$

donde P es un parámetro que depende de B/L_R (fig. 2, de ref. 19) y B/L_R puede expresarse como:

$$\frac{B}{L_R} = \frac{B/L}{1{,}3\,(1 - C_B) + 3{,}1\, X_B}$$

Con objeto de evaluar la bondad de todas estas fórmulas, el presente autor ha realizado un estudio estadístico comparando los valores calculados mediante las fórmulas anteriores con los obtenidos directamente de los ensayos.

Para ello, se han tomado como base todos los ensayos realizados en el Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo en los últimos 15 años que permitían calcular el factor de forma (alrededor de 350 ensayos correspondientes a unas 140 carenas distintas).

Toda esta información ha sido analizada, desechando aquellos ensayos en los que el factor de forma era dudoso por probable existencia de flujo laminar, interferencias creadas por el bulbo en la superficie libre en lastre, etcétera, llegando a una selección definitiva compuesta de 115 carenas y 260 ensayos. En las figuras 5, 6 y 7 se presenta la distribución de la muestra primitiva de carenas según sus características geométricas (coeficiente de bloque, eslora/manga y manga/calado). Como puede verse predominan los buques de formas llenas ($0{,}75 < C_B < 0{,}85$), lo cual es lógico por ser los que precisan especialmente de un estudio experimental del factor de forma. En cuanto a la relación L/B, la amplitud

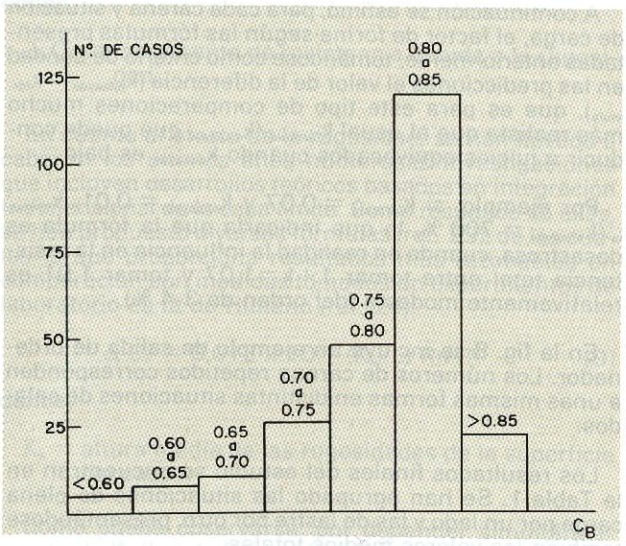


Figura 5.

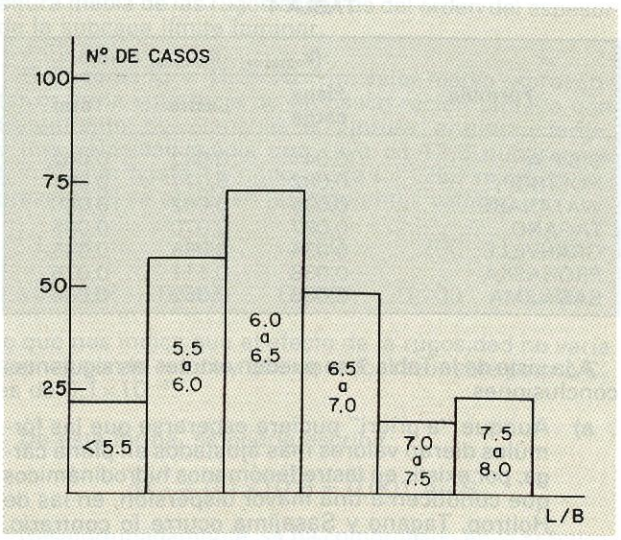


Figura 6.

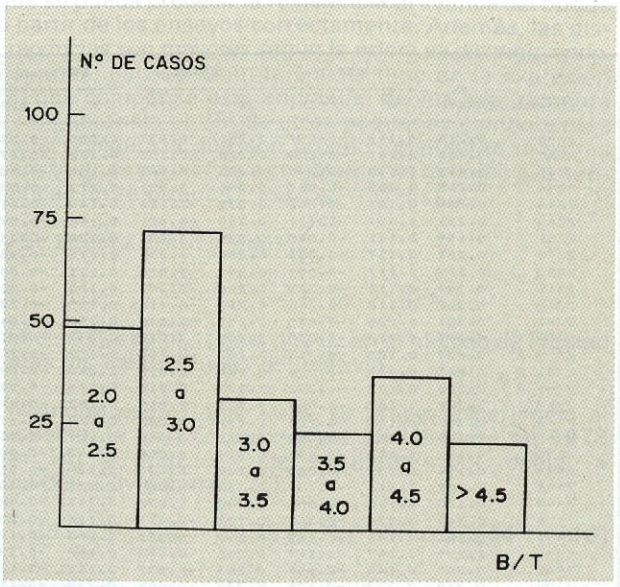


Figura 7.

es bastante grande, y en la relación B/T se observa que se han incluido buques en situación de lastre llegándose hasta valores de B/T = 5,0.

A continuación se estimó, para cada carena y situación de carga, el factor de forma según las fórmulas presentadas anteriormente, tomándose como criterio de bondad en las predicciones el valor de la diferencia ($k_{ensayos} - k_{fórmula}$), que es para este tipo de comparaciones mucho más realista que el usual $k_{fórmula}/k_{ensayos}$ que puede conducir a juicios equivocados cuando $k_{ensayos}$ es bajo.

Por ejemplo, si $k_{fórmula} = 0{,}07$ y $k_{ensayos} = 0{,}01$, $k_{fórmula}/k_{ensayos} = 700$ %, lo que indicaría que la fórmula es desastrosa, cuando en realidad la influencia en la resistencia total entre tomar $1+k=1{,}07$ y tomar 1,01 es relativamente modesta (del orden de 3-4 %).

En la fig. 8 se incluye un ejemplo de salida de ordenador. Los números de carena repetidos corresponden a unas mismas formas en distintas situaciones de calados.

Los resultados finales del estudio se encuentran en la Tabla 1. Se han agrupado las situaciones de plena carga por un lado y las de lastre por otro, presentándose también los valores medios totales.

TABLA 1

Fórmula	($k_{ensayos} - k_{fórmula}$) medio		
	Plena carga	Lastre	Total
S.S.P.A.	0,041	0,082	0,062
HOLTROP	0,082	0,077	0,081
WATANABE	0,035	0,062	0,050
TAGANO	0,097	0,070	0,085
GRANVILLE	0,034	0,055	0,045
PROHASKA	0,038	0,111	0,075
SASAJIMA	0,066	0,062	0,064

A la vista de la Tabla 1 se pueden extraer las siguientes conclusiones:

a) Aunque "a priori" pudiera esperarse que las fórmulas dieran valores más ajustados en plena carga, por existir en lastre fenómenos hidrodinámicos que conducen a una mayor dispersión, en las de Holtrop, Tagano y Sasajima ocurre lo contrario, ya que predicen mejor los valores de lastre que los de plena carga.

b) Tanto en plena carga como en lastre, las fórmulas que presentan mejores resultados son las Watanabe y Granville. Las que proporcionan peor aproximación son la de Tagano en plena carga, Prohaska en lastre y Tagano y Holtrop en conjunto.

c) Curiosamente, las fórmulas que han mostrado mayor fiabilidad (Watanable y Granville) son las de estructura más sencilla (véase el principio de este apartado), lo que indica que no siempre la introducción de multitud de parámetros en la correlación conduce a mejores resultados.

d) La dispersión es notable en todas las fórmulas (ver fig. 8), de donde se deduce que las formas del buque, y en concreto las de popa, tienen una influencia del mismo orden o superior que las dimensiones principales.

Para concluir este estudio, el autor ha realizado una correlación multineal a toda la muestra de buques, incluyendo en la misma los parámetros geométricos representativos del buque en general ($C_B \cdot B/L$ y B/T) y del cuerpo de popa en particular (trimado/L y X_B), llegando a las siguientes expresiones:

1) Plena carga

$$k = -0{,}147 + 3{,}258\, C_B\, B/L - 0{,}030\, B/T + 0{,}031\,(Tpp - Tpr)/L - 0{,}0071\, X_B/L$$

$$(k_{ensayos} - k_{fórmula})\ \text{medio} = 0{,}029$$

2) Lastre

$$k = -0{,}105 + 2{,}744\, C_B\, B/L - 0{,}0003\, B/T + 0{,}027\,(Tpp - Tpr)/L - 0{,}0126\, X_B/L$$

$$(k_{ensayos} - k_{fórmula})\ \text{medio} = 0{,}051$$

3) Todas las situaciones de carga

$$k = -0{,}077 + 2{,}317\, C_B\, B/L + 0{,}0036\, B/T + 0{,}014\,(Tpp - Tpr)/L - 0{,}0079\, X_B/L$$

$$(k_{ensayos} - k_{fórmula})\ \text{medio} = 0{,}039$$

donde tanto (Tpp — Tpr)/L como X_B/L vienen en %.

CARENA	K ENSAYO	SSPA K	SSPA DIF.	HOLTROP K	HOLTROP DIF.	WATANABE K	WATANABE DIF.	TAGANO K	TAGANO DIF.	GRANVILLE K	GRANVILLE DIF.	PROHASKA K	PROHASKA DIF.	SASAJIMA K	SASAJIMA DIF.
2230	0.214	0.117	-0.097	0.251	0.037	0.160	-0.054	0.166	-0.048	0.242	0.028	0.026	-0.188	0.178	-0.036
2240	0.430	0.141	-0.289	0.278	-0.152	0.152	-0.278	0.422	-0.008	0.219	-0.211	0.129	-0.301	0.231	-0.199
2240	0.445	0.146	-0.298	0.280	-0.165	0.155	-0.290	0.423	-0.021	0.220	-0.225	0.139	-0.306	0.235	-0.210
2244	0.265	0.208	-0.057	0.266	0.001	0.212	-0.053	0.268	0.003	0.232	-0.033	0.217	-0.048	0.238	-0.027
2244	0.366	0.105	-0.261	0.239	-0.126	0.149	-0.217	0.255	-0.111	0.218	-0.148	0.046	-0.320	0.175	-0.191
2249	0.221	0.091	-0.131	0.200	-0.021	0.146	-0.075	0.139	-0.082	0.192	-0.030	0.059	-0.163	0.143	-0.078
2251	0.159	0.111	-0.048	0.239	0.080	0.120	-0.039	0.132	-0.028	0.195	0.035	0.098	-0.061	0.175	0.015
2270	0.227	0.137	-0.089	0.262	0.036	0.175	-0.051	0.195	-0.032	0.250	0.024	0.071	-0.156	0.193	-0.034
2283	0.202	0.112	-0.091	0.241	0.038	0.121	-0.082	0.136	-0.067	0.195	-0.007	0.099	-0.103	0.175	-0.027
2315	0.349	0.111	-0.238	0.240	-0.109	0.120	-0.229	0.136	-0.213	0.195	-0.154	0.099	-0.250	0.175	-0.174
2315	0.356	0.110	-0.245	0.240	-0.115	0.120	-0.236	0.154	-0.201	0.194	-0.161	0.098	-0.258	0.176	-0.180
2340	0.301	0.226	-0.075	0.255	-0.046	0.258	-0.043	0.309	0.008	0.246	-0.055	0.235	-0.066	0.242	-0.059
2359 2	0.247	0.217	-0.030	0.265	0.019	0.237	-0.010	0.251	0.005	0.246	-0.001	0.226	-0.021	0.236	-0.010
2359 2	0.437	0.120	-0.317	0.237	-0.200	0.172	-0.265	0.211	-0.226	0.228	-0.209	0.067	-0.370	0.172	-0.265
2361 2	0.247	0.221	-0.026	0.264	0.016	0.240	-0.007	0.262	0.015	0.250	0.003	0.230	-0.017	0.243	-0.004
2361 2	0.220	0.127	-0.093	0.235	0.015	0.176	-0.044	0.219	-0.001	0.234	0.014	0.074	-0.147	0.179	-0.041
2363	0.208	0.147	-0.061	0.223	0.015	0.152	-0.056	0.204	-0.004	0.190	-0.018	0.153	-0.055	0.190	-0.019
2363	0.305	0.100	-0.205	0.211	-0.095	0.127	-0.178	0.165	-0.141	0.185	-0.121	0.089	-0.216	0.160	-0.145
2364	0.189	0.108	-0.082	0.245	0.056	0.127	-0.063	0.126	-0.063	0.207	0.018	0.074	-0.116	0.172	-0.017
2438	0.144	0.109	-0.035	0.210	0.066	0.142	-0.002	0.166	0.022	0.192	0.048	0.097	-0.047	0.163	0.018
2438	0.174	0.085	-0.089	0.204	0.030	0.129	-0.045	0.144	-0.030	0.190	0.016	0.048	-0.126	0.148	-0.026
2444	0.307	0.111	-0.197	0.238	-0.069	0.120	-0.187	0.132	-0.175	0.194	-0.113	0.098	-0.209	0.174	-0.133
2449	0.170	0.105	-0.065	0.260	0.090	0.141	-0.029	0.142	-0.028	0.233	0.063	0.009	-0.161	0.174	0.004
2454	0.344	0.076	-0.268	0.227	-0.117	0.114	-0.230	0.220	-0.124	0.193	-0.151	0.016	-0.327	0.157	-0.186
2465	0.291	0.149	-0.142	0.262	-0.029	0.163	-0.128	0.164	-0.127	0.229	-0.062	0.133	-0.158	0.198	-0.093
2465	0.294	0.147	-0.147	0.262	-0.032	0.162	-0.131	0.200	-0.094	0.228	-0.066	0.131	-0.163	0.200	-0.094
2465	0.300	0.145	-0.154	0.263	-0.037	0.161	-0.138	0.245	-0.055	0.227	-0.073	0.130	-0.170	0.203	-0.097
2479	0.348	0.223	-0.126	0.285	-0.064	0.230	-0.118	0.276	-0.072	0.253	-0.095	0.231	-0.117	0.252	-0.097
2479	0.208	0.141	-0.068	0.257	0.049	0.176	-0.033	0.190	-0.018	0.244	0.036	0.093	-0.116	0.191	-0.017
ERRORES MEDIOS			0.094		0.081		0.074		0.071		0.064		0.120		0.069

Figura 8.

Con estas fórmulas se obtienen desviaciones aún menores que con las de Watanabe y Granville, aunque esto no indique necesariamente que su calidad sea superior, ya que se han hallado ajustando por mínimos cuadrados la muestra de ensayos analizada. En cualquier caso, por ser esta muestra suficientemente amplia, estas fórmulas pueden usarse como alternativa equivalente a cualquiera de las otras, posiblemente con ventaja en muchos casos.

2.6. La corrección aditiva ΔC_F

Volviendo a la expresión [6] que representa el método de correlación de Hughes, puede observarse que conocidos C_{Tm} y $(1 + k)$ sólo resta conocer ΔC_F para obtener la resistencia al avance del buque.

Como se mencionó con anterioridad, la corrección aditiva ΔC_F incluye el aumento de resistencia debido a la rugosidad del casco del buque (el del modelo es hidrodinámicamente liso), que es su componente fundamental, y otras pequeñas componentes como resistencia al viento asociado a la marcha, guiñadas, efecto de pequeñas olas, etcétera, durante las pruebas de mar en condiciones ideales (Beaufort ≤ 2).

Aparte de la rugosidad, la componente adicional más importante es la resistencia del aire sobre la obra muerta y superestructuras. Es preciso señalar que el modelo se construye con muy poco francobordo y, desde luego, sin superestructuras, por lo que ésta es una resistencia que no se mide durante los ensayos.

La estimación de la resistencia del aire (que en este caso es debida al viento asociado a la marcha) puede realizarse con bastante exactitud por algunos de los bien conocidos métodos existentes como los de Isherwood (ref. 21) o Dove (ref. 22). Estos métodos precisan, sin embargo, un conocimiento muy aproximado de la disposición de superestructuras y son más apropiados para el cálculo de la resistencia del viento actuante sobre el buque con cualquier ángulo de incidencia cuando las condiciones no son las ideales de pruebas.

Respecto a la resistencia del viento asociado, puede escribirse:

$$R_{aire} = C_D \frac{1}{2} \rho_{aire} A_T V^2$$

donde:

A_T = Area transversal expuesta al viento por encima de la flotación.

C_D = Coeficiente de resistencia.

Adimensionalizando de la forma habitual:

$$C_{AA} = \frac{R_{aire}}{(1/2)\, \rho_{agua}\, SV^2} = C_D \frac{\rho_{aire}}{\rho_{agua}} \frac{A_T}{S}$$

Del método de Dove, para un valor $A_L/L^2 \simeq 0{,}05$ que bastante normal para buques mercantes (A_L = área longitudinal expuesta al viento) se obtiene $C_D \simeq 0{,}8$. Como $\rho_{aire} = 0{,}13$ utm/m³ y $\rho_{agua} = 104{,}6$ utm/m³ queda:

$$C_{AA} \simeq 0{,}8 \frac{0{,}13}{104{,}6} \frac{A_T}{S} = 0{,}001 \frac{A_T}{S}$$

que es el valor recomendado oficialmente por la I.T.T.C. (ref. 14).

De esta forma se separa la influencia del viento asociado y se puede escribir:

$$\Delta C_F = \Delta C'_F + C_{AA} \qquad [8]$$

donde:

$\Delta C'_F$ = Incremento de resistencia debida a la rugosidad.

En cuanto al efecto de la rugosidad, se han llevado a cabo en los últimos años numerosas investigaciones que incluyen desarrollos teóricos basados en integración tridimensional de la capa límite. Como resultado de ellas, se han propuesto diversas fórmulas (ref. 23), de las cuales la que proporciona resultados más razonables en comparación con medidas tomadas en experimentos de laboratorio es la de Himeno (ref. 24).

$$\Delta C'_F = 0{,}018 \times 10^{-3} (K_s/L)\, Rn^{0.75} \qquad [9]$$

donde:

K_s = altura media de las rugosidades de la superficie del casco.

Como puede observarse, por depender simultáneamente de K_s/L y de Rn, la fórmula de Himeno es típica de una superficie "parcialmente rugosa", en la que la altura media de las rugosidades es del orden del espesor de la subcapa límite laminar.

Si se toma $K_s = 150 \times 10^{-6}$ m, valor medio representativo de la superficie de un casco recién pintado con tratamiento de planchas y pintura antiincrustante, y una velocidad media que vaya de 12,5 nudos para L = 100 m hasta 15 nudos para L = 250 m, de la expresión [9] se obtienen los siguientes valores:

L (m)	100	150	200	250
$\Delta C'_F \times 10^3$	0,096	0,100	0,103	0,095

lo que nos indica que el efecto de la rugosidad no varía apenas con la eslora y que un valor razonable para $\Delta C'_F$ es de $0{,}1 \times 10^{-3}$.

De esta forma, se podría escribir:

$$\Delta C_F = 0{,}1 \times 10^{-3} + 0{,}001\, A_T/S$$

Desafortunadamente, se ha comprobado en la práctica que estos valores de ΔC_F son demasiado pequeños para que se pueda predecir la resistencia al avance del buque a partir de los ensayos correctamente. Además, las discrepancias son mayores según la eslora va disminuyendo. Es, pues, necesario un tercer término en la expresión [8] que compense esta anomalía, debida seguramente a la ignorancia en [8] de otras pequeñas componentes de la resistencia que son proporcionalmente mayores para buques pequeños y posiblemente también a la simplificación realizada $(1+k)_{modelo} = (1+k)_{buque}$.

Se deberá escribir pues

$$\Delta C_F = \Delta C'_F + C_{AA} + \Delta C_R$$

donde ΔC_R engloba (igual que C_A en el método de Froude) todas las inexactitudes del método.

Aunque cada Canal tiene su propia experiencia al respecto, la I.T.T.C. recomendó oficialmente en 1978 (ref. 14) la utilización del siguiente valor, debido a Bowden-Davison (ref. 25):

$$(\Delta C'_F + \Delta C_R) = 0{,}105\, (K_s/L)^{1/3} - 0{,}00064 \qquad [10]$$

Puede observarse que este coeficiente de correlación varía con la eslora y no depende del número de Reynolds, tal y como debería hacerlo al tratarse de superficies parcialmente rugosas, por lo que se encuentra bastante cuestionado actualmente. Sin embargo, por provenir de

una recopilación estadística de resultados de pruebas de mar, su buena operatividad está fuera de toda duda. Para $K_s = 150 \times 10^{-6}$ m, la expresión [10] se ha representado en la fig. 9.

Con todas estas consideraciones, la aplicación del método de Hughes a la extrapolación de resultados de modelo a buque lleva a la siguiente expresión:

$$C_{TS} = C_{TM} - (1+k)(C_{Fm} - C_{Fs}) + 0{,}105\,(K_s/L)^{1/3} - 0{,}00064 + 0{,}001\,A_T/S$$

debiendo utilizarse para C_F la línea ITTC-57 y para K_s el mencionado valor 150×10^{-6} m.

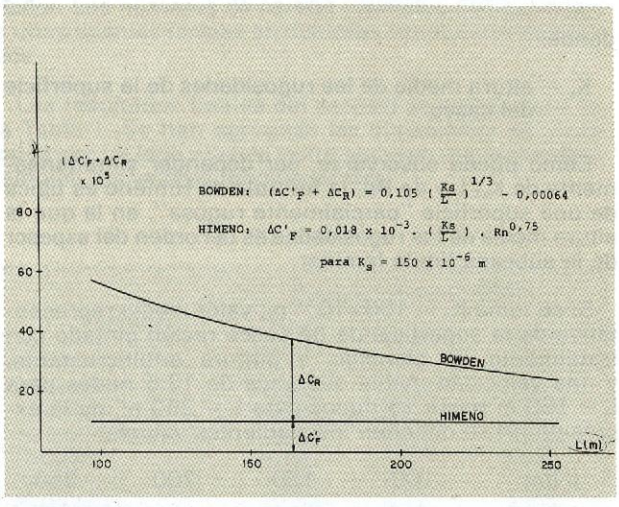


Figura 9.

Evidentemente, la potencia de remolque (EHP) que es necesaria para vencer la resistencia al avance vendría dada por:

$$EHP = \frac{R_{TS}\,V}{75} = \frac{C_{TS}\,(1/2)\,\rho\,SV^2\,V}{75} = 0{,}6972\;C_{TS}\,S\,V^3$$

3. LA CORRELACION MODELO-BUQUE EN LA PROPULSION

3.1. Generalidades

La hélice del buque, aunque geométricamente semejante a la del modelo, tiene necesariamente un comportamiento distinto a la de éste por diversas consideraciones:

a) La resistencia al avance del modelo es comparativamente mayor que la del buque (efecto de escala en la resistencia viscosa), por lo que para empujar al modelo la hélice necesitará ir más cargada (carga = empuje/área del disco $\times V^2$) que la del buque.

b) La desigualdad del número de Reynolds redunda en una mayor fricción en las palas de la hélice modelo, por lo que el rendimiento de ésta será menor que el que tendrá la hélice del buque.

c) El flujo de agua que le llega a la hélice es distinto en ambas condiciones, tanto en el valor medio de la velocidad como en su distribución sobre el disco del propulsor. Asimismo, el efecto de aumento de resistencia de la carena generado por la acción de la hélice no ha de ser necesariamente igual. Estas diferencias son causadas por tener la capa límite del modelo en la popa un espesor comparativamente mayor que la del buque.

El problema planteado en el apartado a) (mayor empuje en el modelo que en el buque) se palía, en parte, remolcando parcialmente al modelo durante el ensayo de autopropulsión. La resistencia al avance es vencida entonces conjuntamente por el empuje de la hélice y por esta fuerza "extra" de remolque, denominada "deducción de fricción". De todas formas, la similitud a escala de los empujes ($T_{buque} = 1{,}026 \times \lambda^3 \times T_{modelo}$) que se consigue de esta manera no asegura la igualdad de carga en ambos propulsores debido a las diferentes velocidades de entrada del agua en el disco. Por lo tanto, la hélice tendrá puntos de funcionamiento diferentes en modelo y buque, y su rendimiento no será igual.

Como es sabido, la potencia propulsiva entregada a la hélice (DHP) viene ligada con la potencia de remolque (EHP) mediante el rendimiento "cuasipropulsivo" (η_D):

$$DHP = EHP/\eta_D$$

El rendimiento "cuasipropulsivo" puede escribirse también como:

$$\eta_D = \frac{1-t}{1-w}\,\eta_o\,\eta_r \qquad [11]$$

donde:

t = Coeficiente de succión.
w = Coeficiente de estela efectiva.
η_o = Rendimiento del propulsor en aguas libres.
η_r = Rendimiento rotativo relativo.

Una primera simplificación del problema de la correlación modelo-buque en la propulsión consiste en suponer que no hay efecto de escala. Esta hipótesis se usa muy a menudo cuando se utiliza el método de correlación de Froude para la resistencia al avance y consiste obviamente en hacer:

$$\eta_{Dbuque} = \eta_{Dmodelo} \qquad [12]$$

En consecuencia, una vez aplicada la correspondiente deducción de fricción, se obtiene fácilmente:

$$(DHP)_{buque} = (DHP)_{modelo} \times 1{,}026 \times \lambda^{3,5}$$

siendo λ la escala a que está construido el modelo.

Este sencillo sistema, que encierra evidentes inexactitudes como se puede deducir de lo expuesto al principio de este apartado, ha sido utilizado con éxito durante muchos años en la mayoría de los canales de experiencias. La razón estriba en que el error generado por la expresión [12] se engloba también en el término C_A del que se habló extensamente en el apartado 2.2. C_A es, pues, una especie de "cajón de sastre" que subsana todos los errores conceptuales del método de correlación.

Sin embargo, un ataque más riguroso del problema, como el que supone el método de Hughes para la correlación de la resistencia, implica un estudio del posible efecto de escala en el rendimiento cuasipropulsivo y, por extensión, en todos sus componentes (expresión 11).

3.2. Efecto de escala en el comportamiento del propulsor en aguas libres

Los perfiles que constituyen las secciones cilíndricas de las palas de la hélice desarrollarían, en un fluido perfecto, un empuje (dT_i) y una fuerza generadora del par (dF_i) que se relacionan con la sustentación (dL) (fig. 10), según:

$$dT_i = dL \cos \beta i$$

$$dF_i = dL \operatorname{sen} \beta i$$

siendo βi el ángulo de paso hidrodinámico.

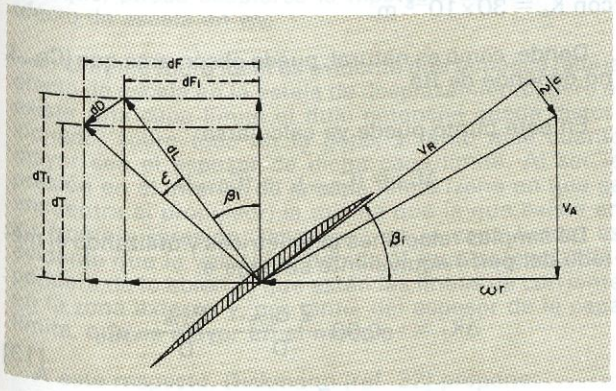


Figura 10.

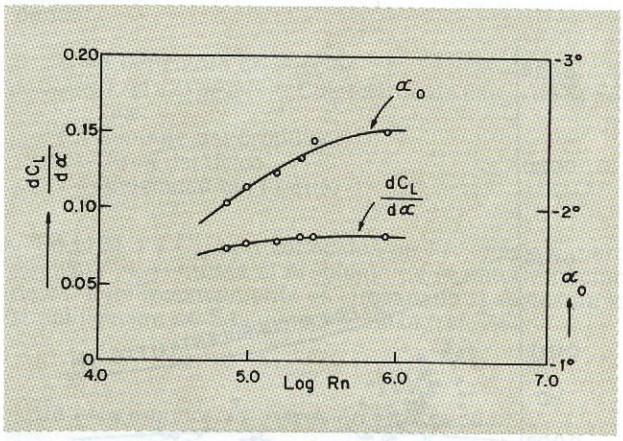


Figura 11.

Sin embargo, la hélice se mueve en un fluido real, por lo que aparece una fuerza de resistencia, dD, que viene originada por fenómenos viscosos de fricción y de presión. El empuje y la fuerza del par valen, en consecuencia, en un fluido real:

$$dT = dL \cos \beta i - dD \operatorname{sen} \beta i$$

$$dF = dL \operatorname{sen} \beta i + dD \operatorname{sen} \beta i$$

La resistencia del perfil, dD, depende obviamente del número de Reynolds y, por lo tanto, está sujeta a un efecto de escala entre modelo y buque, aunque su contribución al valor total de dT y dF no es grande y por eso a veces ha sido ignorada dentro del proceso general de correlación. Sin embargo, si los números de Rn del buque y del modelo son considerablemente diferentes, la variación del rendimiento del propulsor en modo alguno es despreciable.

El efecto de establecimiento de la capa límite alrededor del perfil, su distinta naturaleza (turbulenta en el buque, de gran extensión laminar en el modelo) y las diferentes características de la posible separación de la misma (casi inevitable desprendimiento laminar en el modelo a los números de Reynolds usuales en los ensayos) traen consigo que el reparto de presiones alrededor del perfil no sea semejante en modelo y buque y que, por tanto, exista también un efecto de escala en dL.

Como es sabido:

$$dL = C_L \, (1/2) \, \rho V_R^2 \, c \, dr$$

donde:

C_L = Coeficiente de sustentación.
V_R = Velocidad incidente sobre el perfil.
c = Cuerda del perfil.
dr = Elemento de radio.

pero

$$C_L = \left(\frac{\partial C_L}{\partial \alpha} \right) (\alpha - \alpha_o)$$

donde:

α = Angulo de ataque.
α_o = Angulo neutro debido a la curvatura del perfil.

Corroborando lo arriba expresado se ha encontrado experimentalmente que tanto $\partial C_L / \partial \alpha$ como α_o varían con Rn (fig. 11), sobre todo para Rn inferiores a 10^6. A los valores usuales a los que se realizan los ensayos de propulsor aislado (entre 10^5 y 4×10^5) aún se ha detectado claramente separación laminar que, evidentemente, no se presenta en el buque (ref. 26). No obstante, existe un gran vacío de información sobre los valores de C_L para el buque, debido a la dificultad de realizar ensayos a elevados números de Reynolds. Por este motivo, la mayoría de los métodos de extrapolación de las curvas de propulsor aislado ignoran el efecto de escala en C_L y parten de la hipótesis:

$$C_{LB} = C_{LM}$$

En cuanto a C_D (coeficiente de resistencia, adimensionalizado de la misma forma que C_L), para realizar la extrapolación suele tomarse como base la descomposición:

$$C_D = C_{Dmin} + C'_D \, (\alpha)$$

El primer sumando C_{Dmin} es el valor mínimo de la resistencia del perfil, debida únicamente a fricción y a una pequeña componente de fuerzas de presión. Se presenta para ángulos de ataque próximos a cero y está sujeto a variación con Rn. El segundo sumando, C'_D, es debido a fuerzas de presión de origen viscoso (resistencia de formas por desprendimiento de capa límite), depende del ángulo de ataque y se supone exento de efecto de escala.

En las hélices modelo, el flujo es parcialmente laminar y parcialmente turbulento, tanto en el ensayo de propulsor aislado como en el de autopropulsión, aunque en este último predomina el régimen turbulento debido a la perturbación inducida por la carena. En cualquier caso, con el grado de terminación superficial que tienen los modelos de propulsores, las superficies pueden considerarse hidráulicamente lisas.

Existen diversas formulaciones para el valor C_{Dmin} del modelo, pero la más empleada actualmente es debida a Aucher (ref. 27):

$$(C_{Dmin})_m = 2 \, (1 + 2 \, t/c) \, (0{,}044/Rn_m^{0{,}167} - A/Rn_m^{0{,}667}$$

donde t es el espesor máximo del perfil y A suele tomarse igual a 5.

El término $1 + 2 \, t/c$ representa el factor de forma del perfil según Hoerner; el primer término del paréntesis corresponde a la fricción de placa plana en régimen turbulento y el segundo término es un factor para ajustarse al valor medio de los puntos obtenidos experimentalmente (fig. 12), mediante la aplicación del conocido método del perfil equivalente de Lerbs (ref. 28) a los ensayos de propulsor aislado.

A este respecto, merece la pena destacar que la aplicación del método de Lerbs (basado en la existencia

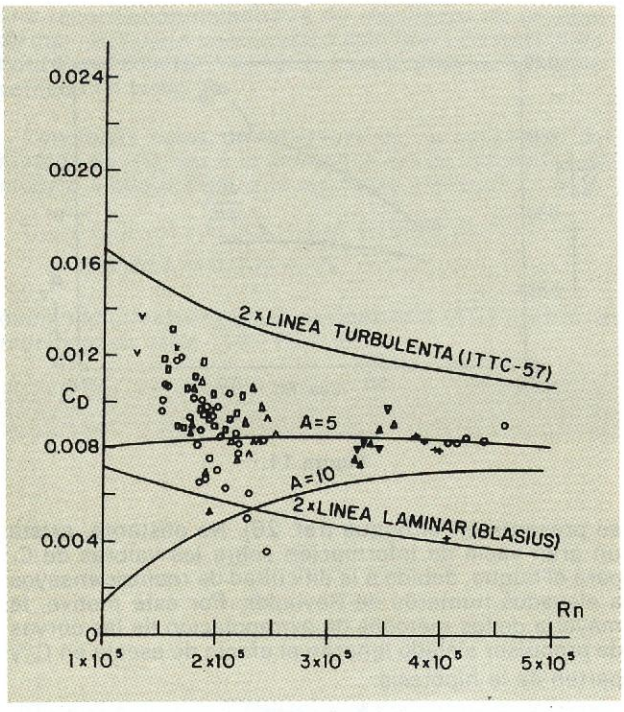


Figura 12.

de una distribución radial de empujes conocida y más o menos "standard", que lleva consigo que el estudio de todas las características de la pala pueda sustituirse por el de un radio "equivalente", normalmente 0,70 R ó 0,75 R, conduce, según algunos autores (ref. 29), a que para hélices de perfiles cortos (baja relación área/disco) parece presentarse un efecto de flujo tridimensional que no es función de Rn y debería ser descontado del valor $(C_{Dmin})_m$, obtenido (fig. 13).

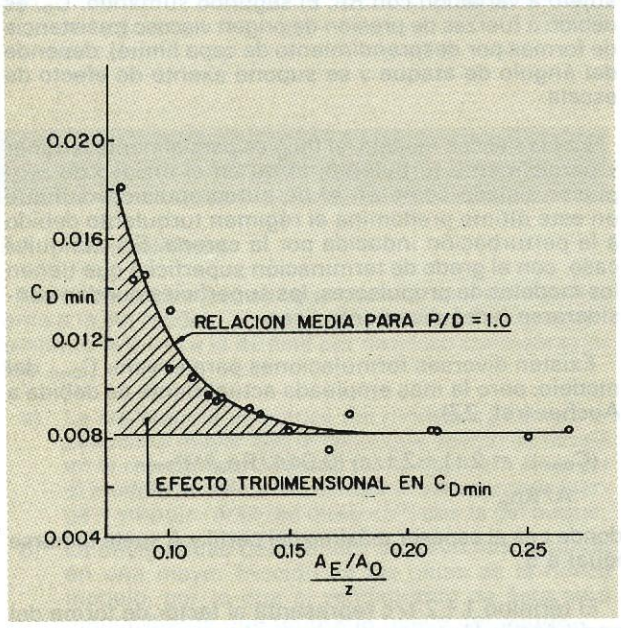


Figura 13.

En cuanto al valor $(C_{Dmin})_{buque}$ no cabe duda de que el régimen será prácticamente turbulento y, para superficies de pala normales, con altura de rugosidades del orden de 30×10^{-6} m, el perfil se comportará como totalmente rugoso, pudiéndose utilizar la fórmula de Schlichting para placas planas, corregida por factor de forma:

$$(C_{Dmin})_s = 2\,(1+2\,t/c)\,[1{,}89+1{,}62\,\log\,(c/K_s)]^{-2{,}5}$$

con $K_s = 30 \times 10^{-6}$ m.

Donde, como es natural, puede observarse que $(C_{Dmin})_s$ no depende de Rn.

En este punto puede ya calcularse:

$$\Delta C_D = (C_{Dmin})_s - (C_{Dmin})_m$$

De simples relaciones geométricas y utilizando el método del perfil equivalente se llega a:

$$\Delta K_T = -0{,}30\,\frac{Z\,c_{0,75}}{D}\,\frac{P_{0,75}}{D}\,\Delta C_D \qquad [13]$$

$$\Delta K_Q = 0{,}25\,\frac{Z\,c_{0,75}}{D}\,\Delta C_D$$

donde:

Z = número de palas;
$c_{0,75}$ = cuerda de la sección a 0,75 R;
D = diámetro de la hélice;
$P_{0,75}$ = paso a 0,75 R;

que son las correcciones que es preciso aplicar a las curvas K_T—J y K_Q—J del modelo para obtener las del buque.

Para concluir este apartado es preciso reseñar que algunos métodos de extrapolación no parten de $C_{LM} = C_{LB}$, sino que tienen en cuenta el efecto de escala en la sustentación, como los de Sierra (ref. 30) que utiliza la hipótesis $K_{Qm} = K_{Qs}$ y engloba todo el efecto de escala en K_T, o el de Aucher (ref. 31) que propone unas correcciones adicionales a las [13] debidas a la sustentación y que toman la expresión:

$$\Delta K_{TL} = b\,\Delta C_D$$

$$\Delta K_{QL} = \frac{b}{2\,\pi}\,\frac{P}{D}\,\Delta C_D$$

donde el parámetro b es función de c/D, J y Z.

3.3. Efecto de escala en el coeficiente de estela

Otro de los factores que intervienen en la configuración del rendimiento propulsivo (expresión 12) es el coeficiente de estela w, que se define como:

$$w = (V - V_A)/V$$

donde:

V = Velocidad del buque.
V_A = Velocidad media del agua en el disco de la hélice.

Es sabido que la existencia de la estela es debida a la acción conjunta de fenómenos de naturaleza potencial, viscosa y de formación de olas. Puede escribirse entonces, como herramienta para el cálculo, que:

$$w = w_D + w_F + w_W$$

siendo:

w_D = Estela potencial o de desplazamiento.
w_F = Estela de fricción o viscosa.
w_W = Estela por formación de olas.

Al realizarse los ensayos a igualdad de Fn entre modelo y buque, puede aceptarse la hipótesis de que no hay efecto de escala en w_W.

Si el fluido fuera ideal es evidente que tampoco habría efecto de escala en la estela de desplazamiento, pero al existir una capa límite el flujo potencial queda distorsionado, sobre todo en la popa, y tanto más cuanto mayor sea el espesor de dicha capa límite. Al ser la presión en el interior de la capa límite (zona en que se encuentra el propulsor) la misma que la que existe en su frontera (presión "impresa" en la capa límite) es evidente que la velocidad debida al flujo potencial dependerá de lo abiertas que estén las líneas de corriente en la zona externa y, por tanto, del espesor de la capa límite, que es mayor en el modelo.

A este respecto, Dickmann (ref. 32) propone:

$$w_{Dr} = (1 - w_F)\, w_{Di}$$

donde:

w_{Dr} = Estela de desplazamiento en fluido real.
w_{Di} = Estela de desplazamiento en fluido ideal.

Naturalmente, w_{Di} es igual en el modelo que en el buque, pero w_F es sensiblemente mayor en el modelo, lo que implica que w_{Dr} sea menor.

Puede escribirse, por tanto:

$$w_{Ds} = w_{Dm}\,(1 - w_{Fs})/(1 - w_{Fm}) \qquad [14]$$

donde, como es habitual, los subíndices **s** indican valores del buque y los subíndices **m** valores del modelo.

Sin embargo, la tendencia que marca la expresión [14], y que responde a consideraciones teóricas, no ha sido corroborada experimentalmente y, por ello, la mayor parte de los autores coinciden en suponer:

$$w_{Ds} = w_{Dm} \qquad [15]$$

Con esta hipótesis, puede escribirse:

$$w_s = w_{Ds} + w_{Fs} + w_{Ws} = (w_m - w_{Fm}) + w_{Fs} = w_m - (w_{Fm} - w_{Fs})$$

Entonces, w_m se obtiene de los ensayos y $(w_{Fm} - w_{Fs})$ puede obtenerse a través de las ecuaciones de la capa límite en placa plana, relacionándolo con el espesor de la misma para los distintos números de Reynolds. Este enfoque del problema ("linear extrapolator"), usado por Van Manen (ref. 33), proporciona valores correctos de w_s para buques finos, pero subestima el efecto de escala para buques llenos.

Otra hipótesis adicional a [15], y que mejora los resultados, consiste en suponer:

$$w_{Fs} = w_{Fs}\, C_{Vs}/C_{Vm} \qquad [16]$$

lo que quiere decir que la estela de fricción depende linealmente del espesor de la capa límite, que a su vez está relacionado con el coeficiente de resistencia viscosa, C_V.

Aplicando [15] y [16], y despreciando por su poca importancia a w_W, queda:

$$w_s = w_{Dm} + (w_m - w_{Dm})\, C_{Vs}/C_{Vm} \qquad [17]$$

Con este procedimiento lo que es preciso conocer es w_{Dm}. Para ello, puede emplearse la formulación de Brard y Aucher (ref. 34), obtenida a partir de consideraciones teóricas:

$$w_{Dm} = (t/2)\,[(1 - w_{Fm}) + \sqrt{(1 - w_{Fm})^2 + c_{TH}}] \qquad [18]$$

donde:

t = Coeficiente de succión.
$c_{TH} = T/(1/2)\,\rho A_0 V^2$ = Coeficiente de carga de la hélice.
T = Empuje del propulsor.
A_0 = Area del disco.
V = Velocidad del buque.

En [18], t y C_{TH} son conocidos de los ensayos, pero vuelve a presentarse el problema de la determinación de w_F. Este inconveniente es subsanado si se acepta la simplificación de Sasajima y Tanaka (ref. 35):

$$w_{Dm} = t$$

De esta manera, la expresión [17] queda:

$$w_s = t + (w_m - t)\, C_{Vs}/C_{Vm} \qquad [19]$$

La bondad de la expresión [19] ha sido examinada por Bowden (ref. 36), analizando pruebas de mar en las que se había medido el empuje de la hélice y que permitían, por tanto, estimar w_s directamente. De dicho análisis se ha llegado a que, por término medio:

$$(w_s)\,\text{real} = (w_s)\,\text{calc} + 0{,}04$$

siempre que se efectúe una corrección por efecto de escala en las curvas de propulsor aislado de la hélice por algún método similar al expuesto en el apartado 3.2 de este trabajo.

En 1978 la I.T.T.C. decidió adoptar oficialmente la expresión de Sasajima y Tanaka (19), incluyendo una ligera corrección en el sentido de suponer:

$$w_{Dm} = t + 0{,}04$$

La adición del término 0,04 es debida al efecto que sobre la estela potencial tiene la presencia del timón en el chorro de la hélice. Este valor ha sido corroborado teórica y experimentalmente por Nakatake (ref. 37) y otros investigadores japoneses.

Con esta última hipótesis se llega finalmente, teniendo en cuenta el efecto del factor de forma sobre la resistencia viscosa, a:

$$w_s = (t + 0{,}04) + (w_m - t - 0{,}04)\,\frac{(1+k)\,C_{Fs} + \Delta C_F}{(1+k)\,C_{Fm}} \qquad [20]$$

Esta expresión tiene la ventaja adicional de eliminar las discrepancias encontradas por Bowden entre los valores calculados y los medidos en pruebas, por lo que puede considerarse como la más correcta en la actualidad.

Naturalmente, si no existe timón en el chorro de la hélice (caso de dos hélices y un timón central), es preciso eliminar de [20] el factor 0,04. Asimismo, para buques finos de dos hélices debe ser utilizada con cuidado, pues podría llegarse, debido a la proporción relativa entre w_m y t, a que $w_s > w_m$ lo cual es, obviamente, imposible físicamente. En estos casos, el efecto de escala en la estela es muy pequeño por encontrarse el propulsor en gran medida fuera de la capa límite y parece más aconsejable tomar simplemente $w_s = w_m$.

Para terminar este apartado es preciso citar algunos métodos estadísticos que proporcionan el efecto de escala en la estela, como el de Yazaki (ref. 38, fig. 14) y el de Sudo y Tanimoto (ref. 39), válido sólo para buques de formas llenas, a través de la fórmula:

$$(1 - w_s)/(1 - w_m) = (C_{BA}^2\, B/T)^{0{,}415}$$

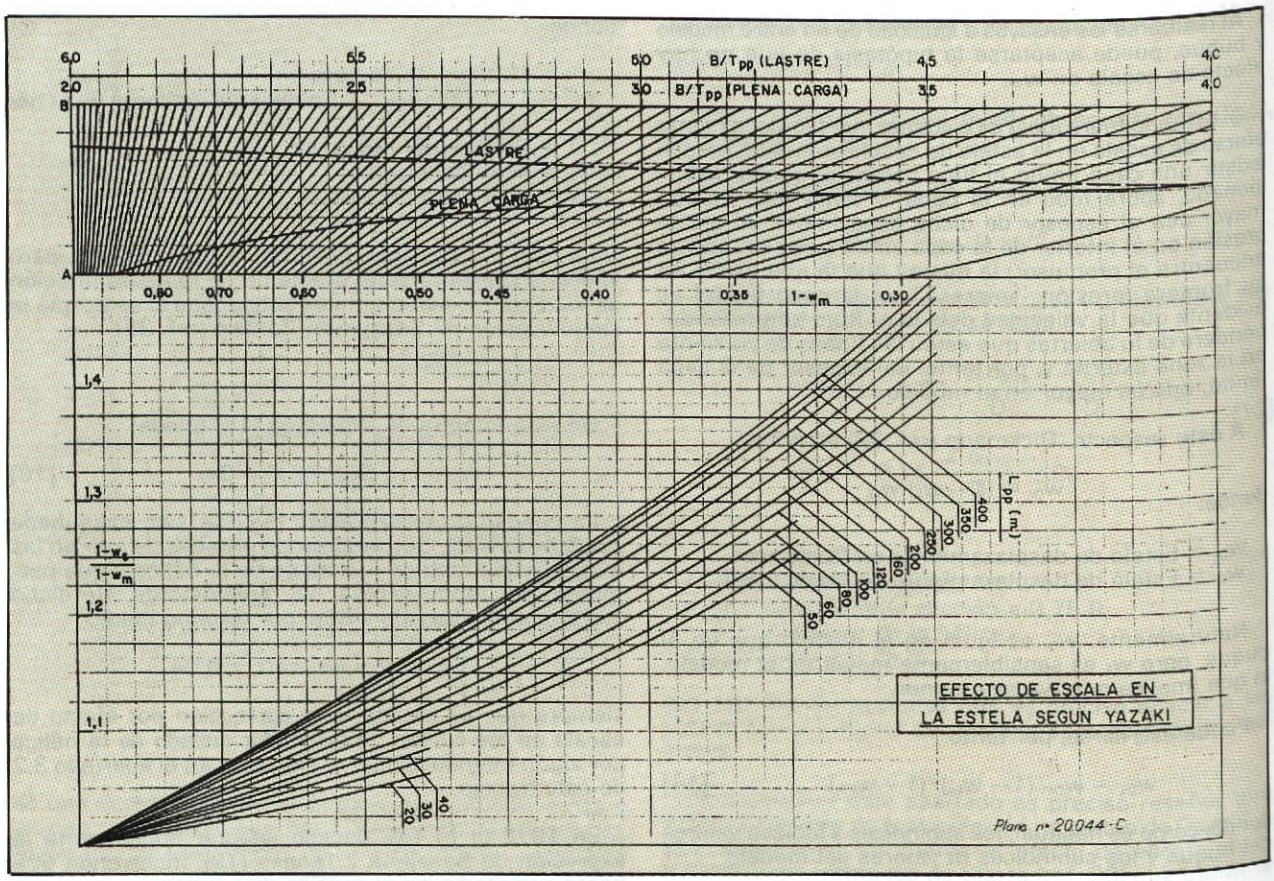


Figura 14.

donde:

C_{BA} = Coeficiente de bloque del cuerpo de popa.
B = Manga.
T = Calado.

3.4. Efecto de escala en los coeficientes de succión y rotativo relativo

El fenómeno de la succión consiste, como es sabido, en un aumento de la resistencia al avance debido a la alteración del flujo en la zona de popa de la carena que produce el propulsor. De esta forma, el empuje de la hélice, T, ha de ser mayor que la resistencia al avance extrapolada de los ensayos de remolque, R.

Se define el coeficiente de succión como:

$$t = (T - R)/T$$

y, al igual que el coeficiente de estela, se divide, a efectos de su tratamiento matemático, en tres partes:

$$t = t_D + t_F + t_W$$

donde:

t_D = Componente potencial, debida a la disminución de presión que origina el propulsor en la popa.
t_F = Componente viscosa, debida al aumento local de la velocidad en la superficie del casco en zonas de la popa.
t_W = Componente de olas, originada por la variación introducida por el propulsor en el sistema de olas generado por el buque.

t_F y t_W son, generalmente, muy pequeños, por lo que pueden despreciarse y el posible efecto de escala se concentraría en t_D. Se ha expuesto en el apartado anterior que, teóricamente, se pueden ligar los coeficientes de estela y de succión mediante la expresión [18]:

$$t_D = \frac{2\, w_{Dr}}{(1 - w_F) + \sqrt{(1 - w_F)^2 + C_{TH}}} \qquad [18]$$

Al utilizar [18] para el estudio del efecto de escala puede aplicarse o bien la hipótesis de Dickmann ya mencionada anteriormente [14]:

$$w_{Ds} = w_{Dm}\,(1 - w_{Fs})/(1 - w_{Fm}) \qquad [14]$$

o bien la simplificativa:

$$w_{Ds} = w_{Dm} \qquad [15]$$

obteniéndose, respectivamente, que t_D aumenta en el buque (Dickmann), o bien que disminuye (expresión 15), pero en ambos casos muy ligeramente (fig. 15). Mediciones llevadas a cabo en cuerpos de revolución en el S.S.P.A. (Goteburgo) indican que la realidad es algo intermedio entre [14] y [15], por lo que muy probablemente el coeficiente de succión del buque será similar al del modelo (ref. 40) y, en cualquier caso, la diferencia entre ambos será del orden del error experimental en los ensayos. Por tanto, parece razonable suponer que:

$$t_s = t_m$$

No obstante, hay casos en los que la hélice modifica sensiblemente el flujo en la popa. Puede ocurrir que en un modelo sin hélice se presente separación de la capa límite en zonas inmediatamente a proa del disco del propulsor y que al estar éste presente se elimine dicha separación apareciendo otra, sin embargo, en zonas altas de la bovedilla, debido al área de remanso allí creada por la hélice. En estos casos, el efecto de escala en t

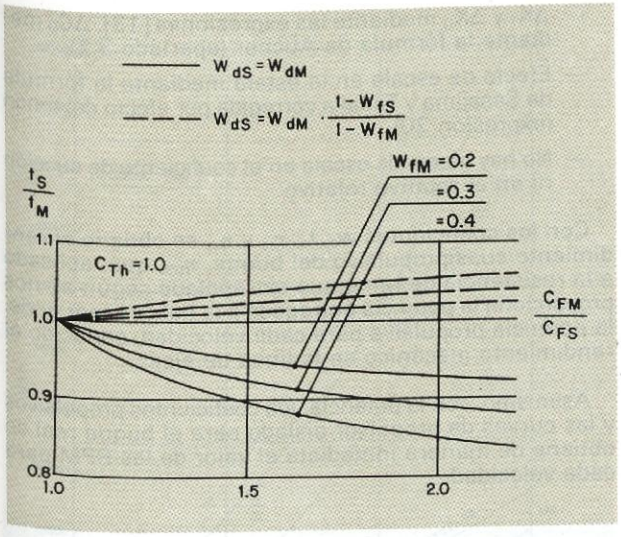


Figura 15.

puede ser considerable, aunque de magnitud desconocida en el momento actual.

El rendimiento rotativo relativo, η_r, es el último elemento integrante del rendimiento propulsivo (expresión 11). Representa físicamente la relación entre el rendimiento de la hélice situada a popa de la carena y el rendimiento en aguas libres. Haciendo uso de la Teoría de Circulación, y con la simbología utilizada en la fig. 10, se obtiene:

$$r = \frac{\eta_B}{\eta_o} = \frac{x_o \, tg(\beta_{io} + \epsilon_o)}{x_B \, tg(\beta_{iB} + \epsilon_B)} = \frac{x_o \, tg(\phi - \alpha_o + C_{Do}/C_{Lo})}{x_o \, tg(\phi - \alpha_B + C_{DB}/C_{LB})}$$

donde los subíndices B y o representan, respectivamente, situaciones detrás de la carena y en aguas libres, siendo:

η = Rendimiento del propulsor.
x = Sección equivalente de la hélice en fracción del radio.
ϕ = Angulo de paso geométrico.
α = Angulo de ataque medio circunferencial.
β_i = Angulo de paso hidrodinámico medio circunferencial.
ϵ = C_D/C_L

Debido a la heterogeneidad circunferencial del reparto de estelas, α_o y α_B son distintos. También lo son C_{Do} y C_{DB}, fundamentalmente por el distinto grado de turbulencia en los ensayos de aguas libres y de autopropulsión y, muy a menudo, por los distintos números de Reynolds del propulsor en ambos ensayos. Asimismo, C_L puede también variar en ambas condiciones.

Por todas estas razones, es sumamente complicado el estudio del efecto de escala en η_r, aunque resultados experimentales obtenidos por diversos autores (ref. 33 y 41) con series de "geosims" parecen indicar que dicho efecto de escala es de muy pequeña magnitud, por lo que desde un punto de vista práctico y, mientras no se profundice más en el tema, puede aceptarse que:

$$\eta_{rm} = \eta_{rs}$$

siempre que, naturalmente, hayan sido corregidas por efecto de escala las curvas características del propulsor aislado.

4. COMPARACION ENTRE LAS PREDICCIONES A PARTIR DE ENSAYOS CON MODELOS Y LOS RESULTADOS DEL BUQUE REAL

Como colofón a este artículo, en el que se han expuesto y discutido diversos procedimientos de correlación modelo-buque, tanto para la resistencia como para la propulsión, es obligado presentar resultados comparativos con distintas alternativas. Como objeto de comparación, se han elegido el método tradicional de extrapolación, que llamaremos Método Standard, y el Método ITTC-78, que incorpora la mayoría de los avances realizados en los últimos años en lo que a investigaciones sobre efecto de escala se refiere. A continuación, se describen brevemente las características principales de ambos métodos.

4.1. Método Standard

Este método ha sido usado en la mayoría de los Canales de Experiencias hasta 1978 con resultados satisfactorios. Incluye, no obstante, diversas inexactitudes teóricas que han sido ya expuestas en las páginas anteriores, y la piedra angular del mismo reside en una acertada elección de la corrección aditiva C_A. Las hipótesis que realiza son:

a) Extrapolación de la Resistencia

— Método de Froude. Es decir, limita los efectos viscosos a la resistencia de una placa plana equivalente.
— Línea de fricción ITTC-57.
— Corrección aditiva C_A según fórmulas y Banco de Datos de cada Canal, de acuerdo con su propia experiencia.

b) Extrapolación de la Propulsión

La potencia propulsiva del buque y las RPM se obtienen directamente del ensayo de autopropulsión de la forma siguiente:

$$(DHP)_s = 1{,}026 \, \lambda 3{,}5 \, (DHP)_m \qquad [21]$$
$$(RPM)_s = K_2 \, (1/\sqrt{\lambda}) \, (RPM)_m$$

donde:

λ = Escala del modelo.
K_2 = Factor de corrección de las revoluciones para tener en cuenta el efecto de escala en la estela. También está basado en la experiencia.

El ensayo de autopropulsión debe realizarse con una deducción de fricción obtenida a partir de la línea ITTC-57 y el valor elegido de C_A.

La expresión [21] lleva implícita la hipótesis de que los rendimientos propulsivos de modelo y buque son iguales.

Además, se hacen una serie de hipótesis secundarias, que no afectan a la predicción de la potencia propulsiva, sino solamente al análisis de coeficientes:

— No hay efecto de escala en las curvas de propulsor aislado ni en el coeficiente de succión.
— El efecto de escala en la estela depende del valor K_2 elegido.

— El rendimiento rotativo relativo está sometido a un efecto de escala arrastrado por la hipótesis de igualdad de rendimientos propulsivos de modelo y buque.

4.2. Método ITTC-78

La International Towing Tank Conference (I.T.T.C.) organismo de carácter mundial del que forman parte la mayoría de las Instituciones (Canales de Experiencias, Universidades, Institutos de Investigación, etcétera) y científicos dedicados al estudio de la Hidrodinámica del Buque, en su reunión de 1978, acordó proponer oficialmente un método global de correlación modelo-buque (abarcando tanto la resistencia como la propulsión), que se denominó Método ITTC-78. Este método estaba concebido inicialmente para aplicarse a buques de una hélice, pero desde dicho año ha sido ampliado para ser utilizado también en buques de dos hélices. Quedan, por el momento, fuera de su ámbito de aplicación los buques de alta velocidad (planeadores, hydrofoils, hovercrafts, etcétera) y aquellos que incorporan propulsores no convencionales (hélices en tobera, aletas de reacción, hélices con apéndices, etcétera).

Dada la forma en que el método fue gestado (muchos años de investigación, comparaciones exhaustivas entre diversas variantes, cooperación de investigadores de distintos países y canales) y el seguimiento que ha sido realizado por la propia I.T.T.C. de su aplicación práctica desde que fue recomendado oficialmente, es, sin lugar a dudas, el método más potente, eficaz y correcto conceptualmente que existe en nuestros días. Lo anterior no asegura que los resultados que se obtengan con su aplicación sean siempre exactos, pero sí son superiores estadísticamente a cualquier otro método conocido.

A continuación se resumen algunos de los procedimientos de cálculo que incorpora el Método ITTC-78, la mayor parte de los cuales han sido descritos en detalle en este artículo dentro de sus correspondientes apartados:

a) Extrapolación de la Resistencia

— Método de Hughes. Cálculo del factor de forma según Prohaska.
— Línea de correlación ITTC-57.
— Corrección aditiva ΔC_F según la fórmula de Bowden-Davison (expresión 10) y resistencia del viento mediante $C_{AA} = 0{,}001\, A_T/S$.

b) Extrapolación de la propulsión

De los ensayos de autopropulsión, remolque y propulsor aislado se obtienen los coeficientes de estela, succión y rotativo relativo. Todos ellos, junto con las curvas características del propulsor aislado, se extrapolan al buque real de acuerdo con:

— ΔK_T y ΔK_Q mediante las expresiones [13]. ΔC_D mediante la fórmula de Aucher (apartado 3.2).
— Efecto de escala en la estela mediante la fórmula de Sasajima y Tanaka corregida por efecto del timón (expresión 20).
— No hay efecto de escala en el coeficiente de succión ni en el rotativo relativo.

Con los coeficientes w_s, t_s, η_{rs} y η_{os} se obtiene el rendimiento cuasipropulsivo del buque, η_{DS}, que, aplicado a la resistencia de remolque extrapolada según a), nos proporciona la potencia entregada a la hélice y, por ende, la potencia propulsiva para cada velocidad, conocido el rendimiento mecánico de la línea de ejes.

Asimismo, con la potencia, los coeficientes propulsivos y las curvas de propulsor aislado para el buque real se obtiene de manera inmediata el valor de las RPM para cada velocidad.

4.3. Aplicación a casos reales

La comparación entre ambos métodos se ha llevado a cabo en una muestra de buques ensayados en el Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo de los que se disponía de resultados de pruebas de mar. Los buques fueron seleccionados de acuerdo con los siguientes criterios:

a) Durante los ensayos de remolque se debería disponer de puntos de velocidad suficientes, en la gama $0{,}12 < Fn < 0{,}18$, para calcular el factor de forma por el método de Prohaska.

b) Se procuró que los modelos de carena respondieran a buques de los que se hubieran construido varias unidades, con objeto de tener resultados de pruebas de mar de varios buques gemelos.

c) El criterio de utilización de los resultados de las pruebas de mar fue bastante estricto, para evitar la incertidumbre añadida por las correcciones a las pruebas. Para ello, se seleccionaron buques cuyas pruebas de mar cumplían los siguientes requisitos:
— Estado de la mar: Beaufort 3 como máximo.
— Calados prácticamente idénticos a los ensayados en el canal.
— Profundidad suficiente para que el efecto de fondo fuera despreciable.

d) Se ha procurado, asimismo, que los buques seleccionados abarcaran una amplia gama de tipos, tamaños, coeficientes de bloque y relación eslora/manga.

En la Tabla 2 se encuentran las características principales de la muestra de buques.

TABLA 2

	O.B.O.	L.P.G.	Bulkcarrier	Portacontenedores
L (m)	235,0	116,0	189,0	113,0
B (m)	32,2	21,3	29,0	20,1
Tm (m)	12,50	4,435	8,0	4,912
Tpp-Tpr (m)	0	1,710	1,0	1,644
C_B	0,846	0,640	0,788	0,584
L/B	7,23	5,45	6,52	5,62
1+k	1,142	1,267	1,212	1,323
Número de buques gemelos con pruebas de mar	3	1	4	4
Situación de carga en las pruebas	Plena carga	Lastre	Lastre pesado	Lastre

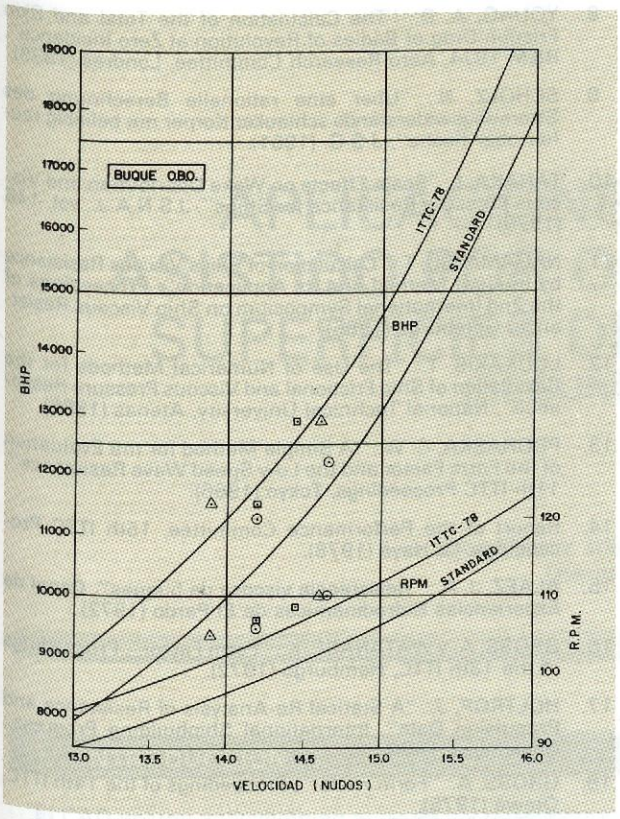


Figura 16.

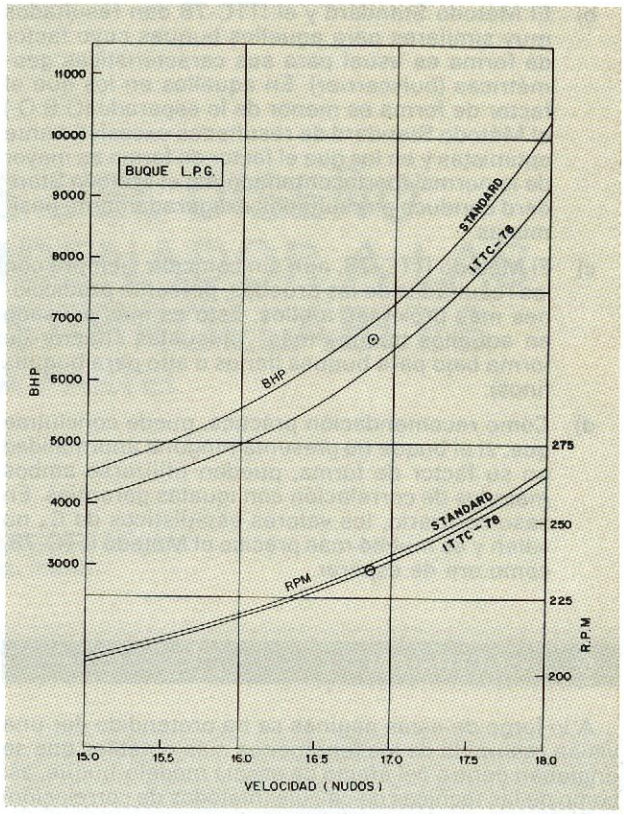


Figura 17.

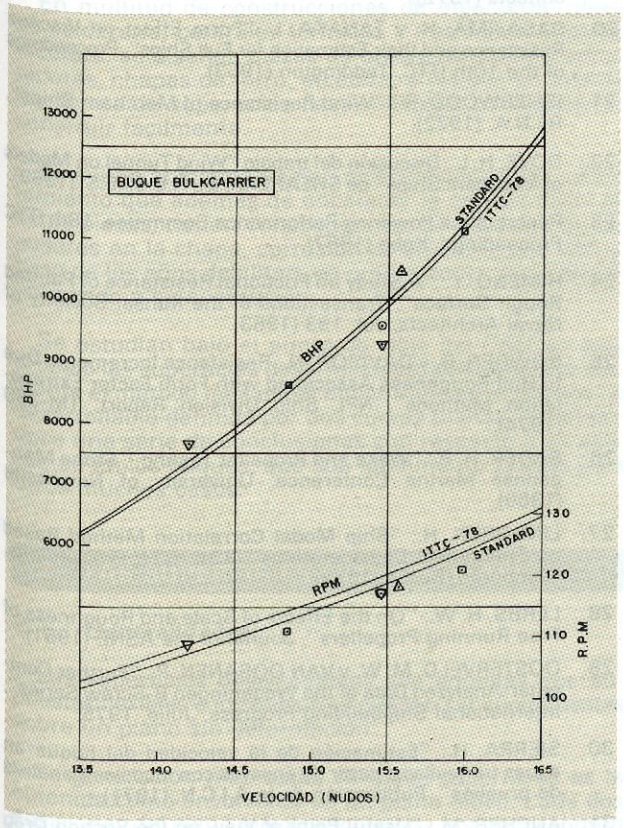


Figura 18.

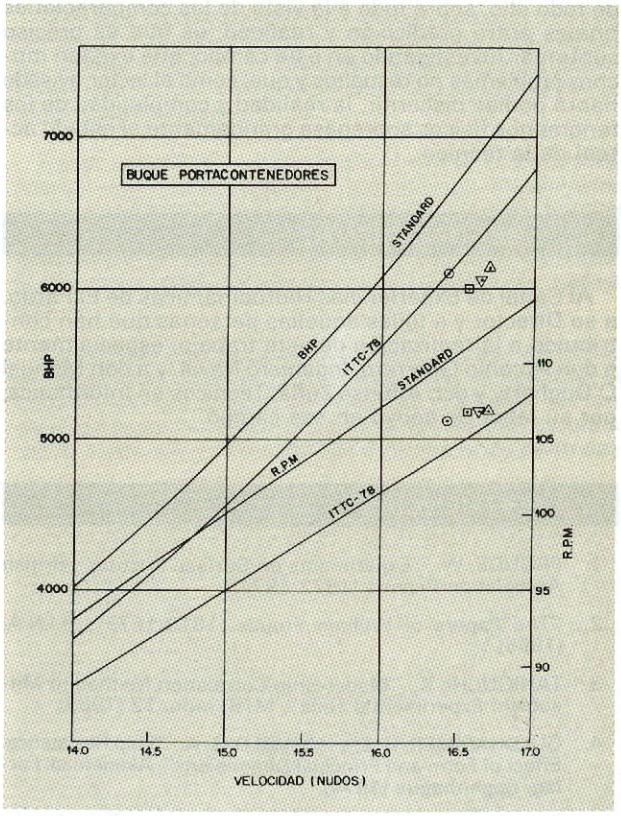


Figura 19.

En las figuras 16 a 19 se presentan los resultados de las predicciones junto con los de las pruebas de mar. A la vista de los mismos, pueden realizarse los siguientes comentarios:

a) A pesar de la rigurosa selección de las pruebas de mar, los resultados de buques gemelos y los de un mismo buque con distintos regímenes de potencia presentan una cierta dispersión.

b) El Método Standard y el ITTC-78 dan resultados muy similares para aquellos buques cuyo factor de forma es usual para sus características geométricas (bulkcarrier). En aquellos en los que el factor de forma es menor de lo esperado (O.B.O.) el Método Standard da resultados excesivamente optimistas y en los que el factor de forma es mayor de lo normal (portacontenedores) el Método Standard conduce a resultados exageradamente pesimistas.

c) El Método ITTC-78, aun sin coincidir siempre con los resultados de las pruebas, presenta predicciones más próximas a ellos. Esto es más acusado en aquellos buques más "inusuales" (factor de forma bajo para buques llenos o alto para buques finos).

d) Como recomendación práctica, puede concluirse que, si el buque no presenta ninguna anormalidad en su factor de forma, pueden utilizarse ambos métodos de correlación con iguales garantías. En caso contrario, los valores estadísticos de C_A no valen y es mucho más preciso el Método ITTC-78, como era de esperar.

5. CONCLUSION

A lo largo de estas páginas se ha pretendido dar una visión resumida de los fenómenos más notables que se engloban dentro del efecto de escala modelo-buque, así como de las técnicas de cálculo (métodos de correlación) más usadas en la actualidad.

La conclusión más importante que puede extraerse de todo ello, sobre todo a la vista de las comparaciones finales entre predicción y realidad, es que es preciso continuar investigando en este campo, que existen muchos problemas no resueltos y que, como el lector avisado habrá podido discernir, la realidad y complejidad de los fenómenos físicos sobrepasa grandemente al estado actual de la técnica.

6. AGRADECIMIENTO

Al Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo, a su Director y a todas aquellas personas que han contribuido a la realización de este trabajo, especialmente a don Antonio Guerrero, Ingeniero Naval, y a don Manuel O'Dogherty y don Alfonso Zufía, Técnicos en Informática, por su labor de apoyo en ese campo.

7. REFERENCIAS

1. FROUDE, W.: "Experiments on Surface Friction", British Association Reports (1872-1874).
2. "The Papers of William Froude, 1810-1879", R.I.N.A. (1955).
3. TANIGUCHI, K.: "Model-Ship Correlation Method in Mitsubishi Experimental Tank", MTB, núm. 12 (1963).
4. GULDHAMMER, H. E. y HARVALD, S. A.: "Ship Resistance. Effect of Form and Principal Dimensions", Akademisk Forlag, Copenhague (1974).
5. DAWSON, J.: "Performance Prediction Factors in Use at Ship Division, NPL", 12th ITTC Proceedings, Roma (1969).
6. "Reply to a Circular of Skin-Friction Committee", 9th ITTC Proceedings, Paris (1960).
7. HUGHES, G.: "Friction and Form Resistance in Turbulent Flow and a Proposed Formulation for Use in Model and Ship Correlation", R.I.N.A. (1954).
8. YOUNG, A. D.: "The Calculation of the Total and Skin Friction Drag of Bodies of Revolution at Zero Incidence", R&M 1874, Aero Research Committee, Londres (1939).
9. SCHOLZ, N.: "Uber eine rationalle Berechnung des Stromungswiderstands schlauker Korper nut beliebig rauher ober flache", J.S.G. (1951).
10. TANAKA, I.: "Scale Effects on Wake Distribution and Viscous Pressure Resistance for Ships", J.S.N.A.J., vol. 146 (1979).
11. NAGAMATSU, T.: "Calculation of Ships Viscous Resistance by Integral Method and its Application", Proceedings of the 2nd International Symposium on Ship Viscous Resistance, Goteburgo (1985).
12. LOUKAKIS, T.: "The Use of Numerical Methods for the Calculation of Ship Frictional and Viscous Pressure Resistance", National Technical University, Atenas (1986).
13. PROHASKA, C. W.: "A Simple Method for the Evaluation of the Form Factor and the Low Speed Wave Resistance", 11th ITTC Proceedings, Tokyo (1966).
14. Report of the Performance Committee, 15th ITTC Proceedings, La Haya (1978).
15. ALAEZ, J. A.: "Resistencia viscosa de buques", Canal de Experiencias Hidrodinámicas de El Pardo (1972).
16. GROSS, A. y WATANABE, K.: "Form Factor", Proceedings of the 13th ITTC, Hamburgo (1972).
17. HOLTROP, J.: "A Statical Re-Analysis of Resistance and Propulsion Data", International Shipbuilding Progress,, Noviembre, 1984.
18. GROSS, A.: "Form Factor", Proceedings of the 14th ITTC, Otawa (1975).
19. TAGANO, H.: "Form Effects on Viscous Resistance of Full Ships", Transactions of the Kansai Society of Naval Architects (1972).
20. SASAJIMA, H. y TANAKA, I.: "Form Effect on Viscous Resistance and their Estimation for Full Ships", Proceedings of the 10th ITTC, Teddington (1963).
21. ISHERWOOD, R.: "Wind Resistance of Merchant Ships", R.I.N.A. (1972).
22. DOVE, H. L.: Discusión del trabajo "Wind Tunnel on Models of Merchant Ships" de SHEARERR, D.; N.E.C.I.E.S. (1969).
23. Report of the Powering Performance Committee, 18th ITTC Proceedings, Kobe (1987).
24. HIMENO, Y.: "A Study on Frictional Resistance of Painted Rough Surface", Transactions of the Kansai Societty of Naval Architects, vol. 193 (1983).
25. BOWDEN, B. y DAVISON, N.: Resistance Increments Due to Hull Roughness Associated with Form Factor Extrapolation Methods", NPL Ship Division Report, TM-380 (1974).
26. RADER, H. P.: "Wake and Propeller Testing", Stone Manganese Marine Conference, University of Newcastle (1969).
27. LINDGREN, H.: "Ship Model Correlation Method Based on Theoretical Considerations", 13th ITTC Proceedings, Hamburgo/Berlin (1972).
28. LERBS, H. W.: "On the Effects of Scale and Roughness of Free Running Propellers", Jounal of the ASNE (1951).
29. OOSTERVELD, M. W. y VAN OOSANEN, P.: "Further Computer-Analyzed Data of the Wageningen B-Screw Series", International Shipbuilding Progress, Julio, 1975.
30. SIERRA, H.: "Estimación de la velocidad del buque en aguas tranquilas a partir de ensayos con modelos y análisis de pruebas", Publicación de la A.I.C.N. (1971).
31. AUCHER, M.: "Useful Point of View on the Section Drag of the Propeller Characteristics", ITTC Performance Committee Meeting, Trondheim (1973).
32. DICKMANN, H. E.: "Wechselwirkung zwischen Propeller und Schiff unter besonderer Berucksichtigung des Welleneinflusses", Jahrbuch STG 40, Berlin (1939).

(Pasa a la pág. 403.)

APLICACIONES DEL DISEÑO ASISTIDO POR ORDENADOR A LAS SUPERFICIES DESARROLLABLES

(SEGUNDA PARTE)

Por Víctor Villoria San Miguel
Doctor Ing. Naval

1. INTRODUCCION

El CAD es una aplicación en auge de los ordenadores al diseño gráfico.

En multitud de construcciones de ingeniería: obras de calderería, centrales térmicas y nucleares, buques, etcétera, se diseñan piezas de unión, conductos, adaptadores, chapas de forro, etcétera, a las que se intenta dar forma de superficies desarrollables, para poderlas construir fácilmente.

Se evitan al mismo tiempo deformaciones por calentamiento que además de encarecer la construcción de estas piezas, tienen consecuencias de pérdidas de espesores en la chapa, corrosiones, etcétera, que con el paso de los años debilitan, en gran manera, las mismas obligando a su sustitución.

Se estudian bajo el punto de vista del CAD en este artículo las superficies desarrollables, definiéndolas mediante el método más usual encontrado en la técnica: la desarrollable definida por dos curvas planas, obteniéndose una serie de conclusiones con respecto a su aplicación en los buques, que son igualmente válidas para otros muchos casos.

2. LAS SUPERFICIES DESARROLLABLES

2.1. Generalidades

Las superficies desarrollables son aquellas que supuestas flexibles e inextensibles pueden ser superpuestas sobre un plano sin deformación.

La generación más usual de estas superficies es la obtenida como envolvente de un plano móvil. Cada dos posiciones del plano móvil proporciona una recta común al plano móvil y a la desarrollable, recta que además de ser una generatriz de la superficies es su característica.

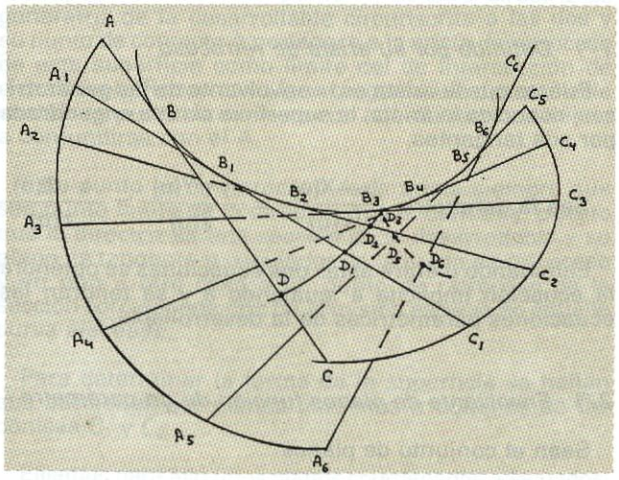
El plano móvil toca a la desarrollable en todos los puntos de la característica. Una desarrollable es entonces tangente a un mismo plano a lo largo de sus generatrices rectilíneas.

Cada posición del plano móvil contiene dos rectas que se cortan y, en el caso general, sus intersecciones forman los vértices de un polígono que en el límite es una curva envolvente de las generatrices. Las desarrollables pueden engendrarse por una recta tangente a una curva alabeada.

Una cara del poliedro desarrollable circunscrito contiene, así pues, tres vértices del polígono formado por las aristas. Pasando al límite se deduce que los planos tangentes de una desarrollable son osculadores de sus aristas de retroceso.

Estas superficies están comprendidas entre las llamadas superficies regladas, que son las engendradas por una recta móvil sujeta a ciertas condiciones. Si entre éstas figura la de que dos posiciones consecutivas de la generatriz se hallen en un plano se obtienen las superficies *desarrollables*, y en el caso contrario las *alabeadas*.

Las superficies desarrolladas son un caso particular de otras más generales conocidas con el nombre de superficies envolventes e involutas y pueden ser engendradas por las intersecciones sucesivas de un plano móvil sujeto en su movimiento a condiciones definidas.



Superficies desarrollables.

La envolvente de las distintas posiciones de sus generatrices rectas es una curva a la cual deben ser aquellas tangentes, denominádose a tal curva *arista de retroceso* y une las dos hojas diferentes de que la superficie está compuesta. Se justifica este nombre considerando que un punto A cualquiera de la tangente y suponiendo que esta recta rueda sin resbalar, siendo siempre tangente a la curva; a medida que el punto de contacto avanza a B_1B_2, etcétera. A toma posiciones A_1A_2... que se aproximan o se alejan del punto de contacto de la misma, alejándose o aproximándose a él una vez que lo ha alcanzado. El punto A describe de esta manera una curva en el espacio que tiene un retroceso al llegar a contactar con la arista de la superficie.

Si consideramos como definición de las superficies desarrollables la propiedad general de que puedan extenderse sobre un plano sin rotura ni doblez, puede demostrarse que para ello será necesario y suficiente que dos posiciones consecutivas de la generatriz indefinida se hallen en un plano, porque si la superficie no estuviera compuesta de elementos planos indefinidos sino limitados por otros, se formarían ángulos triedros o poliedros que de ningún modo pueden extenderse sobre su plano sin romper por alguna de sus aristas. En cambio, si dos generatrices próximas se cortan siempre existirán elementos planos consecutivos que podrán desarrollarse sobre el plano intermedio.

2.2. Plano tangente a una desarrollable

El plano tangente en uno de los puntos de una generatriz recta G contiene a esta generatriz y a la infinitamente próxima que se corta con G y, por tanto, contiene tres puntos infinitamente próximos de la arista de retroceso, por lo que es el plano osculador de esta curva en uno de sus puntos.

Asimismo, el plano tangente es el mismo en todos los puntos de la generatriz G. Conviene insistir en la propiedad de estas superficies de tener dos generatrices consecutivas contenidas en un plano, pues esta característica no es común al resto de superficies regladas en las que el plano tangente, aunque contiene la generatriz G recta, es sólo tangente a las superficies en dicho punto y es secante en todos los demás puntos.

2.3. Generación de desarrollables

Pueden engendrarse estas superficies de dstintas maneras, siendo diferentes las formas de obtener posiciones distintas de las generatrices:

1.º) Definida por su arista de retroceso

Puesto que la arista es la envolvente de las generatrices, conocida la arista, la superficie será la engendrada por sus tangentes.

Sea la generatriz $\dfrac{x-X(u)}{\dot{x}(u)} = \dfrac{y-Y(u)}{\dot{y}(u)} = \dfrac{z-Z(u)}{\dot{z}(u)}$

Eliminando u entre estas dos ecuaciones se obtendrá la ecuación implícita e igualando a v se tendrán las ecuaciones paramétricas de la desarrollable.

2.º) Envolvente de planos función de un parámetro

Sean el conjunto de planos:

$$A(u)x + B(u)y + C(u)z + D(u) = 0 \qquad [1]$$

Vamos a demostrar que la envolvente es una superficie desarrollable. Esta envolvente se obtiene eliminando u entre la ecuación anterior y su derivada:

$$A'(u)x + B'(u)y + C'(u)z + D'(u) = 0 \qquad [2]$$

O sea, que está engendrada por las rectas que forman esas ecuaciones, luego la superficie es reglada.

La generatriz infinitamente próxima es la de ecuaciones:

$$\begin{aligned} A'x + B'y + C'z + D' &= 0 \\ A''x + B''y + C''z + D'' &= 0 \end{aligned} \qquad [3]$$

Ambas rectas se cortan, pues tienen una ecuación común. Por tanto, la desarrollable se obtiene eliminando u entre la ecuación del conjunto de planos [1] y su derivada [2]. Las paramétricas se obtienen haciendo $z=v$ y despejando x e y del sistema anterior.

$$x = X(uv);\ y = Y(uv);\ z = v$$

La arista de retroceso será el lugar de la intersección de dos generatrices infinitamente próximas. Está definida, pues, por [1], [2] y [3]. Resolviendo ese sistema se obtienen las paramétricas:

$$x = X(u);\ y = Y(u);\ z = Z(u)$$

3.º) Envolvente de planos tangentes a dos curvas

Para demostrar que estos planos envuelven una desarrollable, basta demostrar que su ecuación se puede obtener en función de un parámetro:

Se escribe la ecuación general de los planos que pasan por la tangente en un punto genérico de una de las líneas. Ese plano es función de dos parámetros. Expresando que ese plano sea tangente a la otra curva, obligando a que el sistema correspondiente tenga una raíz doble, se tendrá una relación entre los dos parámetros, con lo cual quedará un solo parámetro independiente según lo inicialmente explicado.

4.º) Definida por dos directrices

Dadas dos curvas planas o alabeadas hay infinitas superficies regladas definidas por esas dos curvas como directrices, es decir, engendradas por una recta que se apoya en las dos, pero sólo existe una superficie desarrollable engendrada por esas dos directrices. Para demostrarlo, basta justificar que por un punto A_1 de una de ellas D_1 pasa un número finito de generatrices si la superficie ha de ser desarrollable. Pero al ser el plano tangente el mismo a lo largo de una generatriz sea ésta la que une el punto A_1 de D_1 con otro A_2 de D_2.

Fijamos el punto A_1. Proyectemos desde A_1 la curva D_2. Las generatrices que pasen por A_1 serán las de contacto de los planos tangentes a ese cono y que pasan por la tangente t_1 en A_1 a D_1.

Para obtener esos planos basta cortar el cono mencionado por un plano arbitrario. Existe a partir de A_1 un número limitado de generatrices de la desarrollable que pasan por A_1.

Las formas de engendrar la superficie 3) y 4) son equivalentes y normalmente desde el punto de vista práctico se escogerá el método más conveniente en cada caso, que, en general, es el de definir la superficie como envolvente de planos tangentes, aunque esto no siempre ocurre.

5.º) Desarrollable circunscrita a dos superficies

Definida a su vez como:

Envolvente de los planos tangentes simultáneamente a las dos superficies.

Al contener la ecuación general de un plano tres parámetros, si este plano es tangente a dos superficies, se obtienen dos condiciones mediante las cuales pueden expresarse los tres parámetros en función de uno sólo.

La envolvente de este plano contendrá, pues, un solo parámetro y su superficie envolvente será desarrollable, denominándose en este caso desarrollable circunscrita a las dos dadas.

En el caso particular de que estas superficies sean esferas, la desarrollable circunscrita está constituida por dos superficies cónicas de revolución cuyos vértices son los centros de homotecia o semejanza de las esferas.

2.4. Ecuación vectorial de una desarrollable

Las superficies regladas están definidas por la ecuación de una recta móvil $\bar{r} = \bar{r}_1(u) + \lambda\bar{r}_2(u)$ de manera que un punto P de la superficie está situado sobre la recta $\bar{r}_2(u)$ a una distancia λ del punto M que describe la curva $\bar{r}_1(u)$.

Si la superficie es desarrollable dos generatrices infinitamente próximas $G_1 = \bar{r}_2(u)$ y $G_2 = \bar{r}_2(u+\Delta u)$ se cortan, por lo que el vector $\bar{r}_1(u+\Delta u) - \bar{r}_1(u)$ y las generatrices G_1 y G_2 deben estar en un mismo plano:

$[\bar{r}_1(u+\Delta u) - \bar{r}_1(u)] \cdot [\bar{r}_2(u) \wedge \bar{r}_2(u+\Delta u)] = 0$ y pasando al límite resulta:

$\dot{\bar{r}}_2 \cdot \bar{r}_2 \wedge \dot{\bar{r}}_2) = 0$

Esta es la condición para que una superficie reglada sea desarrollable.

3. DESARROLLABLE CIRCUNSCRITA A DOS CONICAS

3.1. Apliquemos la teoría expuesta anteriormente al caso de determinar la superficie desarrollable generada por dos cónicas C_1 y C_2, a las cuales la superficie se circunscribe.

Supondremos que los planos de situación de las cónicas son paralelos y que la recta que une sus centros es perpendicular a esos dos planos.

Las tangentes de las cónicas en los puntos situados en una misma generatriz de la desarrollable deben estar en un mismo plano y, por tanto, son paralelas. Es fácil hallar los puntos donde una cónica es tangente a una recta de dirección dada y aplicando esto a las dos cónicas C_1 y C_2 puede, entonces, determinarse cuantas generatrices se desee de la desarrollable. Las proyecciones de un número suficiente de generatrices proporcionan como envolvente la proyección de la arista de retroceso de la desarrollable.

Si se desean obtener los puntos de la arista de retroceso situados en cada una de las generatrices de la desarrollable, puede usarse un cono osculador a la desarrollable a lo largo de cada generatriz.

Se sustituyen, pues, en dos puntos A_1 y A_2 de una misma generatriz G, situados cada punto en las cónicas C_1 y C_2, estas cónicas por sus círculos osculadores en A_1 y A_2. Se hace pasar por esos círculos situados en planos paralelos un cono cuyo vértice proporcionará el punto de encuentro V de la generatriz G con la arista de retroceso.

Sean R_1 y R_2 los radios de curvatura de esos círculos en A_1 y A_2; D la longitud de generatriz G comprendida entre A_1 y A_2, siendo G la distancia medida en la generatriz entre A_1 y V.

Denominemos con minúsculas g y d las proyecciones de D y G sobre un plano coordenado.

Se verificará:

$$G = \frac{R_1 \cdot D}{R_1 - R_2}; \qquad g = \frac{R_1 \cdot d}{R_1 - R_2}$$

Si los radios de curvatura R_1 y R_2 fueran iguales en algún punto de la generatriz G la longitud g sería infinita y la generatriz G sería asíntota de la arista de retroceso.

Si todos los radios de curvatura R_1 de una de las cónicas son mayores que los radios R_2 correspondientes de la otra, la arista de retroceso además de no tener puntos impropios queda toda ella de un mismo lado de los planos de las dos cónicas.

En las generatrices donde g tiene un valor mínimo o un valor máximo la proyección de la arista de retroceso y esta arista tiene esos puntos también de retroceso si las generatrices de las desarrollables no son perpendiculares al plano de proyección.

Esos puntos de retroceso de la arista son vértices o puntos límites de la desarrollable y se corresponden con extremos de arcos útiles de una directriz.

La simetría de la superficie respecto de los planos XOY, XOZ pone de manifiesto que existen infinitas generatrices de la superficie que son simétricas respecto de esos planos, por lo que existen otras dos líneas dobles de la superficie situadas en esos planos. Esas líneas son cónicas, pudiendo tomarse cualquiera de ellas junto con una de las dadas por directrices de la desarrollable.

En este caso es fácil comprobar que en esas dos nuevas líneas dobles existen arcos útiles y arcos parásitos de la desarrollable estando separados unos de otros por puntos límites o vértices de la desarrollable situados, por tanto, en esas cónicas.

En efecto, toda tangente G en un punto A a una directriz que contiene un punto A_1 de otra directriz es generatriz de la desarrollable circunscrita a las dos y su punto de contacto A pertenece a la arista de retroceso de esta superficie como límite del de intersección de dicha generatriz con otro plano tangente a la desarrollable cuando su punto de contacto con aquella directriz tiende a confundirse con el A.

Este punto es de retroceso de la arista siempre que sea punto límite de la directriz que lo contiene, puesto que la directriz es una sección de la desarrollable y su plano es tangente u osculador de la arista de retroceso y en uno u otro caso a un punto de retroceso de la sección corresponde otro de la misma especie en aquella curva alabeada.

Para determinar la forma de la superficie se hallan sus secciones por planos paralelos a aquellos de las cónicas C_1 y C_2.

Elijamos para ello unos planos coordenados adecuados. Supongamos un triedro trirrectángulo OXYZ y situemos

las dos cónicas C_1 y C_2 la primera en el plano YOZ y la segunda en un plano x=h paralelo al YOZ.

Suponiendo que los centros de las dos cónicas están situados en el eje OX y que sus ejes son paralelos a los OZ y OY sus ecuaciones respectivas son:

$$\frac{Z_1^2}{b_1^2}+\frac{y_1^2}{a_1^2}=1; \qquad x=0$$

$$\frac{Z_2^2}{b_2^2}+\frac{y_2^2}{a_2^2}=1; \qquad x=h$$

Los puntos A_1 y A_2 situados en C_1 y C_2 los definimos por sus coordenadas paramétricas:

A_1: $Z_1 = b_1 \operatorname{sen} \varphi_1$; $y_1 = a_1 \cos \varphi_1$; $x_1 = 0$

A_2: $Z_2 = b_2 \operatorname{sen} \varphi_2$; $y_2 = a_2 \cos \varphi_2$; $x_2 = h$

La tangente t_1 a C_1 en A_1 será:

$$\frac{z-b_1 \operatorname{sen} \varphi_1}{b_1 \cos \varphi_1}=\frac{y-a_1 \cos \varphi_1}{-a_1 \operatorname{sen} \varphi_1}=\frac{x}{0} \qquad [1]$$

y análogamente la t_2 de C_2 en A_2:

$$\frac{z-b_2 \operatorname{sen} \varphi_2}{b_2 \cos \varphi_2}=\frac{y-a_2 \cos \varphi_2}{-a_2 \operatorname{sen} \varphi_2}=\frac{x-h}{0} \qquad [2]$$

El haz de planos que pasan por t_1 y t_2 son:

$$\begin{aligned}&(a_1 \operatorname{sen} \varphi_1 z + b_1 \cos \varphi_1 y - a_1 b_1) + \lambda\, x = 0\\ &(a_2 \operatorname{sen} \varphi_2 z + b_2 \cos \varphi_2 y - a_2 b_2) + \mu\,(x-h) = 0\end{aligned} \qquad [3]$$

y expresando que estos dos planos son el mismo se obtiene:

$$\frac{a_1 \operatorname{sen} \varphi_1}{a_2 \operatorname{sen} \varphi_2}=\frac{b_1 \cos \varphi_1}{b_2 \cos \varphi_1}=\frac{\lambda}{\mu}=\frac{-a_1 b_1}{-a_2 b_2-\mu h}$$

de donde $\dfrac{a_1}{b_1} \operatorname{tg} \varphi_1 = \dfrac{a_2}{b_2} \operatorname{tg} \varphi_2$ [4]

que es *la ecuación de condición de desarrollabilidad* de la superficie.

$\mu h = \dfrac{b_1 a_2 \operatorname{sen} \varphi_2}{\operatorname{sen} \varphi_1} - a_2 b_2$ y sustituyendo a este valor en uno de los planos tangentes [3] de la desarrollable se obtiene:

$$(a_1 \operatorname{sen} \varphi_1 \cdot z + b_1 \cos \varphi_1 \cdot y - a_1 b_1) + \left(\frac{b_1 a_1}{h} - \frac{b_2 a_1}{h} \cdot \frac{\operatorname{sen} \varphi_1}{\operatorname{sen} \varphi_2}\right) x = 0 \qquad [5]$$

que junto con [4] definen este haz de planos en función de un parámetro.

Derivando la ecuación [5] con relación al parámetro obtendríamos un plano infinitamente próximo al [5] que junto al [5] proporciona la ecuación de la generatriz de la desarrollable, aunque en este caso es mucho más fácil obtenerla directamente. Su ecuación es en efecto:

$$G=\frac{z-b_1 \operatorname{sen} \varphi_1}{b_2 \operatorname{sen} \varphi_2-b_1 \operatorname{sen} \varphi_1}=\frac{y-a_1 \cos \varphi_1}{a_2 \cos \varphi_2-a_1 \cos \varphi_1}=\frac{x}{h}$$

3.2. Ecuación de la superficie

Para hallarla imaginemos un cono de vértice el punto A_1 de C_1 y de directriz C_2.

Su ecuación será:

$$\frac{x-x_1}{x_2-x_1}=\frac{y-y_1}{y_2-y_1}=\frac{z-z_1}{z_2-z_1}=t;$$ siendo t un parámetro.

La ecuación del cono en paramétricas es:

$$\begin{aligned}&z = b_1 \operatorname{sen} \varphi_1 + t\,(b_2 \operatorname{sen} \varphi_2 - b_1 \operatorname{sen} \varphi_1)\\ &y = a_1 \cos \varphi_1 + t\,(a_2 \cos \varphi_2 - a_1 \cos \varphi_1)\\ &x = th\end{aligned} \qquad [6]$$

o sea, cuya ecuación depende de tres parámetros.

Olvidémonos de la condición de desarrollabilidad anteriormente hallada. Consideremos este cono con diferentes vértices A_1 en C_1 y por tanto variando el parámetro φ_1. Tendremos así una familia de conos en los que φ_1 es el parámetro de la familia, al ser t parámetro de un punto de una de sus generatrices y φ_2 un parámetro que define su directriz. La desarrollable circunscrita a las dos cónicas es la envolvente de esta familia de conos. Esta envolvente se obtiene haciendo nulo el determinante:

$$\begin{vmatrix} \dot{x}_1 & \dot{x}_2 & \dot{x}_t \\ \dot{y}_1 & \dot{y}_2 & \dot{y}_t \\ \dot{z}_1 & \dot{z}_2 & \dot{z}_t \end{vmatrix} = 0$$

como se demuestra en la teoría de las superficies envolventes, lo que equivale a dar el mismo peso a todos los parámetros.

Este determinante vale:

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 & 1 \\ b_1(1-t) \cos \varphi_1 & t b_2 \cos \varphi_2 & E(\varphi_1\ \varphi_2) \\ -a_1(1-t) \operatorname{sen} \varphi_1 & -t a_2 \operatorname{sen} \varphi_2 & E(\varphi_1\ \varphi_2) \end{vmatrix} = 0$$

o lo que es igual:

$$(1-t)\cdot t\cdot(-b_1 a_2 \cos \varphi_1 \operatorname{sen} \varphi_2 + a_1 b_2 \operatorname{sen} \varphi_1 \cos \varphi_2) = 0$$

Las ecuaciones t=0, 1—t=0 se corresponden con el lugar geométrico de los puntos singulares de las involutas o conos, pues se podría haber considerado también el cono con vértice en C_2 y directriz C_1.

El resto de la ecuación es:

$$\frac{a_1}{b_1} \operatorname{tg} \varphi_1 = \frac{a_2}{b_2} \operatorname{tg} \varphi_2$$

ecuación [4] ya hallada anteriormente que expresa la condición de desarrollabilidad.

Las ecuaciones [6] junto con [4] representan las ecuaciones paramétricas de la desarrollable circunscrita a C_1 y C_2.

Tomando como parámetro $u = \operatorname{tg}(1\,1/2)$ se obtiene $\operatorname{tg} \varphi_1 = \dfrac{2u}{1-u^2}$ y hallando la intersección de la superficie con un plano Ax+By+Cz=1 se llega a una ecuación en t, u que proporciona el grado de la superficie, que es de octavo grado. Esto mismo se puede demostrar por otros procedimientos.

3.3. Arista de retroceso

Las ecuaciones [6] escritas así:

$$z = b_1 \operatorname{sen} \varphi_1 + \frac{x}{h} (b_2 \operatorname{sen} \varphi_2 - b_1 \operatorname{sen} \varphi_1)$$

$$y = a_1 \cos \varphi_1 + \frac{x}{h} (a_2 \cos \varphi_2 - a_1 \cos \varphi_1) \qquad [7]$$

junto con [4] definen la generatriz que engendra la superficie.

Expresemos [7] de manera más sencilla:

$$z = b(\varphi_1) + xp(\varphi_1)$$
$$y = a(\varphi_1) + xq(\varphi_1)$$

una vez sustituido φ_2 en función de φ_1 en [7] teniendo en cuenta [4].

El plano tangente en un punto M de esta generatriz será:

$$z - b(\varphi_1) - xp(\varphi_1) + K[y - a(\varphi_1) - xq(\varphi_1)] = 0$$

siendo obtenido K de manera que este plano contenga la generatriz de la desarrollable infinitamente próxima:

$$z = b + db + x(p+dp)$$
$$y = a + da + x(q+dq)$$

Sustituyendo en la ecuación del plano resulta:

$$db + xdp + K(da+xdq) = 0$$

que debe cumplirse independientemente de x. Por tanto:

$$db + k\, da = 0$$
$$dp + k\, dq = 0$$
$$K = -\frac{p'}{q'} = -\frac{b'}{a'}$$

siendo el plano tangente a la desarrollable:

$$z - b(\varphi) - xp(\varphi) - \frac{p'(\varphi)}{q'(\varphi)} [y - a(\varphi) - xq(\varphi)] = 0$$

no dependiendo este plano, pues, del punto de contacto de la generatriz G que lo contiene.

Cada generatriz G contiene un punto donde esta recta es tangente a la arista de retroceso.

Sea $X(\varphi)$ la abscisa de este punto; sus coordenadas serán:

$$z = b + p \cdot X$$
$$y = a + q \cdot X \qquad [8]$$
$$x = X$$

siendo los parámetros directores de la tangente a la arista de retroceso:

$$\dot{z} = b' + pX' + p'X$$
$$\dot{y} = a' + qX' + q'X$$
$$\dot{x} = X'$$

Para que esta tangente coincida con G debe haber proporcionalidad entre sus parámetros directores:

$$\frac{\dot{z}}{p} = \frac{\dot{y}}{q} = \frac{\dot{x}}{1} \quad \text{o bien} \quad \begin{array}{l} p'X + b' = 0 \\ q'X + a' = 0 \end{array}$$

y como $b'q' - a'p'$ es nulo al ser la condición de desarrollabilidad de la superficie, estas ecuaciones definen la abcisa

$$X(\varphi) = \frac{-b'}{p'} = \frac{-a'}{q'}$$

que en el caso considerado vale:

$$X(\varphi) = \frac{-b_1 \cos \varphi_1}{b_2 \cos \varphi_2 \dfrac{d\varphi_2}{d\varphi_1} - b_1 \cos \varphi_1}$$

y siendo $\dfrac{a_1}{b_1} \dfrac{d\varphi_1}{\cos^2 \varphi_1} = \dfrac{a_2}{b_2} \dfrac{d\varphi_2}{\cos^2 \varphi_1}$

resulta: $$X(\varphi) = \frac{b_1^2 a_2 \cos^3 \varphi_1}{b_1^2 a_2 \cos^3 \varphi_1 - a_1 b_2^2 \cos^3 \varphi_2} \qquad [9]$$

Las ecuaciones [8] y [9] definen junto con [4] la arista de retroceso de la desarrollable.

Para la determinación directa del punto de contacto de la arista de retroceso de la desarrollable con una de sus generatrices, es necesario tener en cuenta que la superficie cónica que desde dicho punto proyecta una línea cualquiera que tenga un contacto de segundo orden con una de las directrices, tiene un contacto de este mismo orden con la desarrollable en todos los puntos de la generatriz común a las dos superficies. Pues dos desarrollables que tienen un contacto de segundo orden en dos puntos de una misma generatriz común, tienen ese mismo orden de contacto en todos los puntos de esta generatriz y sus aristas de retroceso son tangentes a esa generatriz en un mismo punto. Basta, pues, con tomar dos cónicas que sean homológicas entre sí y que tengan un contacto de segundo orden con la desarrollable en los puntos en que la generatriz corta a las dos directrices, como la desarrollable circunscrita a estas nuevas curvas se compone de dos conos de segundo orden cuyos vértices son los centros de homología, uno de estos puntos es el de contacto pedido.

Como procedimiento práctico para determinar este punto de contacto con una de las generatrices, puede consistir en determinar el centro de curvatura del punto en que la generatriz corta a una de las directrices y hallar el de la sección que en la desarrollable produce un plano paralelo al de aquella directriz, trazado por el punto en que la generatriz considerada corta a esta segunda directriz. El punto pedido es el de intersección de esta generatriz con la recta que une aquellos centros de curvatura, puesto que sobre esta recta están los centros de homología de los círculos osculadores de las dos secciones consideradas.

3.4. Generalización del problema

Dos cónicas situadas en planos paralelos tienen siempre un sistema de diámetros conjugados paralelos. En efecto, supongamos que se traslade una de ellas paralelamente a su plano hasta coincidir con el plano de la otra y de manera que sus centros coincidan. Supongamos que a la cónica trasladada se le aplique un factor de escala, de forma que pase por diversos estados permaneciendo semejante a sí misma. Llegará un momento que será tangente en dos puntos a la cónica que ha permanecido invariable. El diámetro que pasa por estos puntos y aquel que es paralelo a las tangentes comunes son, evidentemente, conjugados en las dos cónicas, de acuerdo con lo enunciado. Si las dos cónicas siguen estando situadas en planos paralelos y se toman por planos coordenados, además del de una de las cónicas, otros dos que pasando por su centro contenga los diá-

metros conjugados paralelos de las dos cónicas, todos los cálculos previamente realizados serán válidos para hallar su desarrollable circunscrita porque las ecuaciones anteriormente expuestas no suponen limitación en cuanto a que deban referirse a un triedro trirrectángulo.

3.5. Estudio gráfico de la superficie

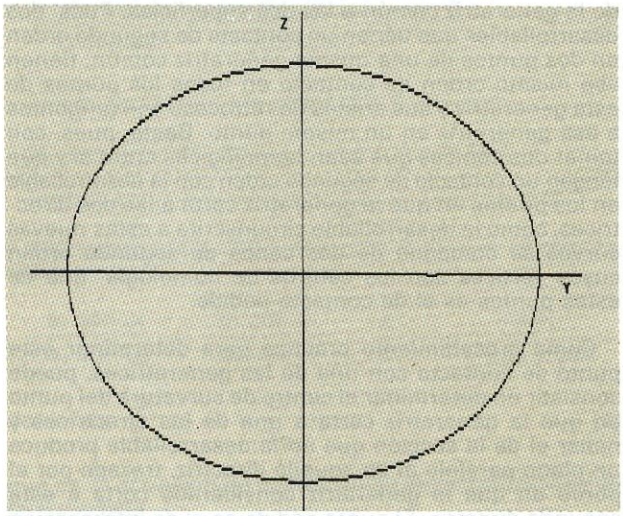
Para este estudio he desarrollado un programa de ordenador, escrito en BASIC, que me permite:

a) Hallar secciones de la superficie

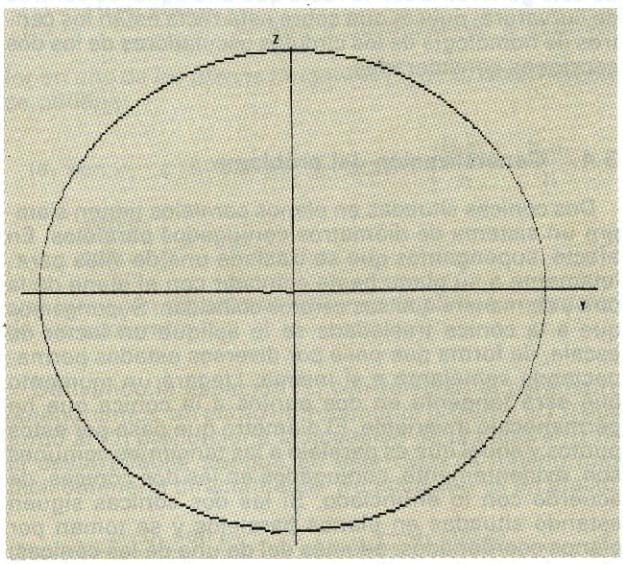
Las secciones primeramente consideradas son aquellas paralelas a los planos coordenados de las cónicas C_1 y C_2. Esto resulta posible utilizando las ecuaciones [7] de la generatriz de la superficie y suponiendo en estas ecuaciones que x=constante. Pues una gran ventaja del tratamiento matemático dado a la desarrollable ha sido buscar sus ecuaciones paramétricas para que puedan ser tratadas por un ordenador.

En este sentido he obtenido secciones en la superficie situadas entre las dos cónicas y más allá de las dos.

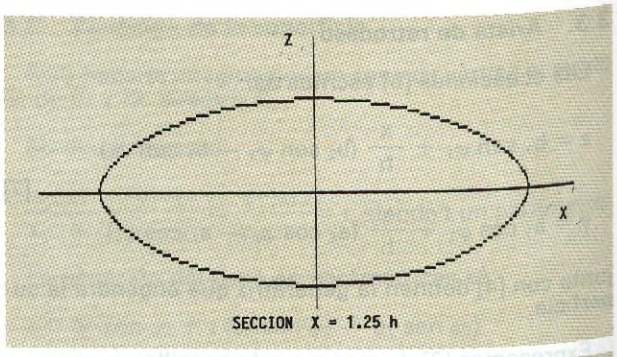
Es muy interesante observar lo que ocurre cuando esos planos encuentran a la arista de retroceso de la superficie que está en este caso situada a la derecha del plano de la cónica C_2.



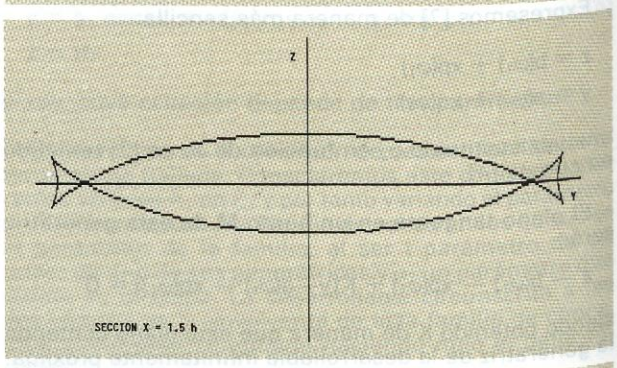
SECCION X = - h



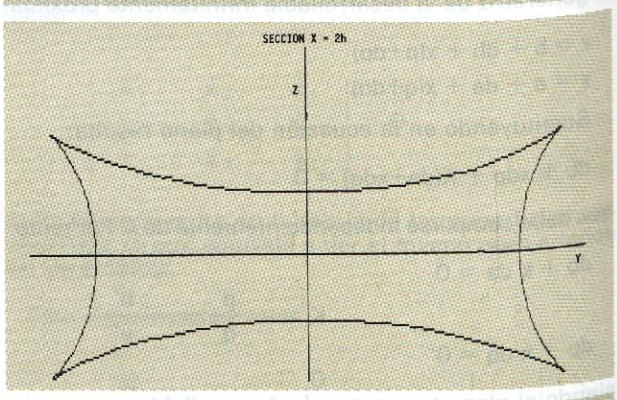
SECCION X = - 2h

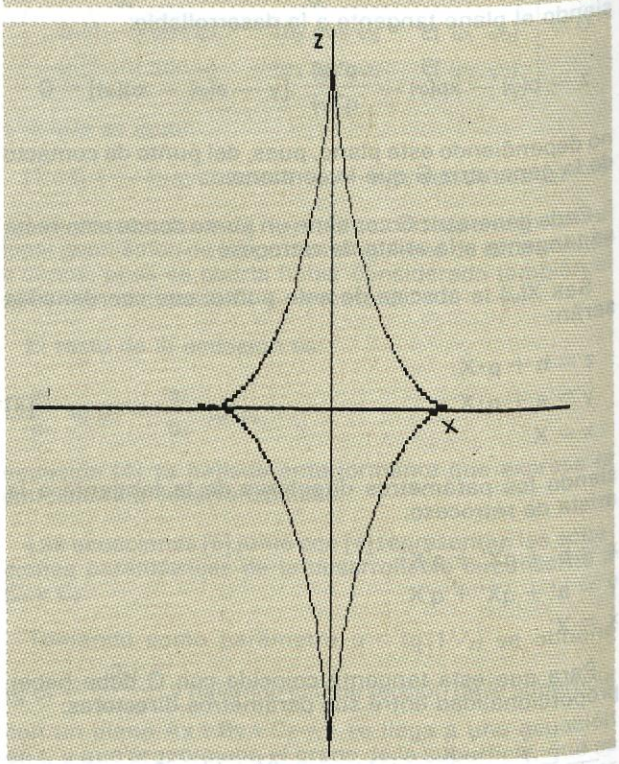


SECCION X = 1.25 h

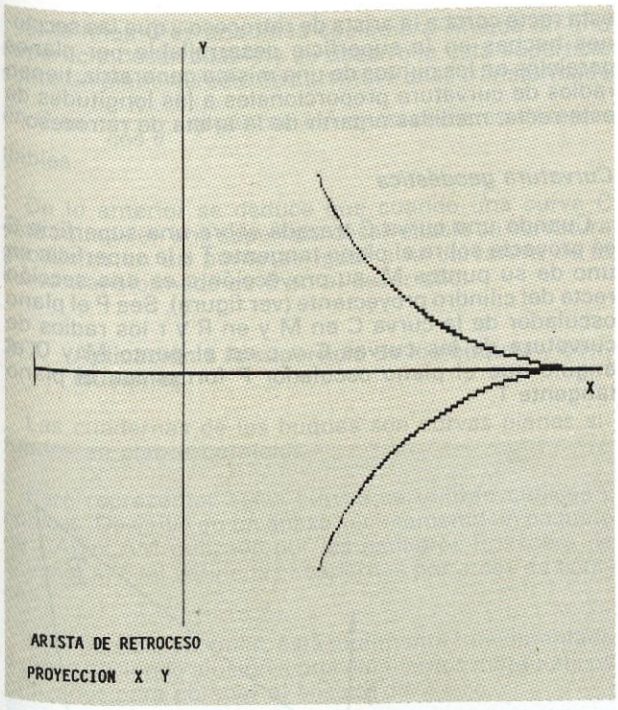


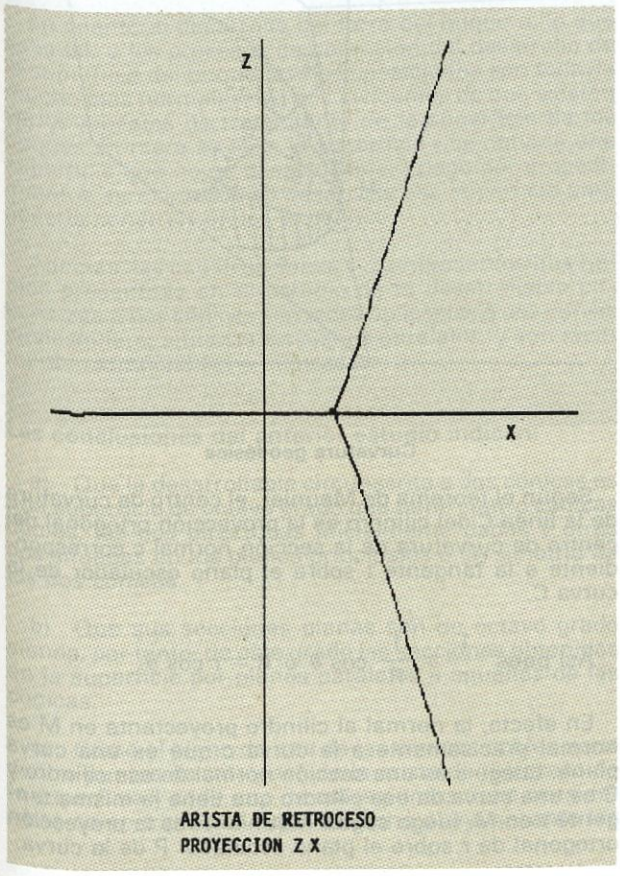
SECCION X = 1.5 h





ARISTA DE RETROCESO
PROYECCION Z X





Se adjuntan varias de estas secciones, aunque lógicamente el programa permite hallar todas las que se deseen.

b) Su intersección con los planos coordenados

Con el z = 0 resulta la sección:

$$x = x(\varphi_1\ \varphi_2) \qquad [10]$$
$$y = y(\varphi_1\ \varphi_2)$$

hallando $\dfrac{y}{x} = \dfrac{(a_1^2\, b_2^2 - b_1^2\, a_2^2)\ \text{sen}\ \varphi_2 \cos \varphi_1}{-ha_1\, b_1\, b_2\ \text{sen}\ \varphi_1}$

de donde $y = \dfrac{(a_1^2\, b_2^2 - b_1^2\, a_2^2)\ \text{sen}\ \varphi_2 \cos \varphi_1}{b_2\ \text{sen}\ \varphi_2 - b_1\ \text{sen}\ \varphi_1}$ [11]

y despejando tgφ_1 y elevando el cuadrado se puede sustituir tg$^2\varphi_1$ por su valor en función de sen φ_2 dada por la ecuación [4] de donde se obtiene:

$$\cos^2 \varphi_2 = \frac{b_1^4\, a_2^2\, h^2\, y^2}{a_1^2\, b_2^2\, x^2 (a_2^2\, b_2^2 - b_1^2\, a_2^2)^2}$$

y de la ecuación en x elevándola al cuadrado y empleando otra vez la ecuación [4] se deduce:

$$\text{sen}^2\, \varphi_2 = \left| \frac{b_1^4\, a_2^2\, (x-h)^2}{b_2^2\, x^2} - b_2^2\, a_1^2 \right| \cdot \frac{1}{a_2^2\, b_1^2 - b_2^2\, a_1^2}$$

quedando finalmente como sección con el plano XOY la curva:

$$\frac{h^2}{a_2^2\, b_1^2 - a_1^2\, b_2^2} \cdot y^2 + \frac{x^2}{a_1^2} - \frac{(x-h)^2}{a_2^2} = 0$$

ecuación de una elipse C_3 que tiene su centro en el eje OX. La sección con el plano XOZ hallada por procedimientos análogos es otra cónica C_4. Ambas cónicas C_3 y C_4 son curvas dobles de la superficie, pues en ellas se cortan dos generatrices de la misma que sean simétricas respectivamente respecto de los planos XOY y XOZ.

Cada una de estas cónicas C_3 o C_4 junto con C_1 o C_2 pueden tomarse como nuevas directrices de la superficie.

Si tomamos por nuevas directrices C_2 y C_3 se determinan fácilmente los arcos útiles y parásitos existentes en ambas o en una de ellas.

Las ecuaciones [10] y [11] son las ecuaciones paramétricas de la intersección de la superficie con el plano Z = 0.

De donde se puede deducir $\dfrac{dx}{d\,\varphi_1}$

y al ser $\dfrac{d\,\varphi_2}{d\,\varphi_1} = \dfrac{a_1\, b_2 \cos^2 \varphi_2}{a_2\, b_1 \cos^2 \varphi_1}$

ocurre que la derivada de x con relación a φ_1 se anula en el punto:

$$hb_1\ \text{sen}\ \varphi_1\ (a_1 b_2^2 \cos^3 \varphi_2 - a_2 b_1^2 \cos^3 \varphi_1) -$$
$$- ha_2 b_1^2 \cos^3 \varphi_1 \cdot (b_2\ \text{sen}\ \varphi_2 - b_1\ \text{sen}\ \varphi_1) = 0$$

luego la curva ofrece un punto de retroceso en ese punto. Ahora bien, ese es precisamente el punto de encuentro del plano secante con la arista de retroceso, siendo este punto un punto límite o vértice de la superficie por separar arcos útiles y parásitos de una de las directrices, en este caso la directriz C_3.

c) Representar la arista de retroceso y el contorno aparente de la superficie. Su grado.

El mismo programa mencionado anteriormente se utiliza para representar esta curva por sus proyecciones sobre los planos coordenados.

La proyección de la arista sobre estos planos proporciona los contornos aparentes de la desarrollable respecto de los planos coordenados, cuestión importantísima para estudiar su forma espacial. Pues al ser todas las gene-

ratrices de la superficie tangentes a la arista de retroceso, lo seguirán siendo en las proyecciones, de manera que la envolvente de las proyecciones de las tangentes forman ese contorno aparente.

En cuanto al grado de la superficie, la recta OX contine cuatro puntos dobles reales de aquélla situados en las cónicas dobles C_3 y C_4, en cada uno de los cuales se cortan dos generatrices reales. Por tanto, el grado de la superficie es ocho y de este mismo grado son sus secciones planas.

3.6. Curvatura de la desarrollable

Si en una superficie poliédrica circunscrita a una desarrollable consideramos los planos A, B y C de tres caras consecutivas y tomamos como vértices el punto ABC en que se cortan de un cono de revolución tangente a los tres planos cuyo eje es la recta de intersección de los diedros que forman A, B y C, en el límite, este cono de revolución es el osculador de la desarrollable propuesta a lo largo de una de sus generatrices.

Este cono osculador de la desarrollable puede sustituir a la superficie en cuanto se refiere a la determinación de relaciones entre las curvaturas de las secciones producidas en la misma superficie por planos cualesquiera en los puntos correspondientes a dicha generatriz, puesto que las secciones que un plano P produce en las dos superficies tienen en el punto situado en dicha generatriz un contacto de segundo orden, como posiciones límites de curvas que tienen tres tangentes comunes PA, PB y PC que tienden a confundirse en una sola.

De aquí se deduce además que dos superficies desarrollables que tienen común una generatriz recta G y su punto de contacto M con las aristas de retroceso y que pasan, respectivamente, por dos curvas que tienen, en otro punto N de dicha generatriz un contacto de segundo orden tienen este mismo contacto en todos los puntos de la misma generatriz distintos del A; puesto que los conos de revolución osculadores de estas dos superficies a lo largo de la generatriz G se confunden en uno.

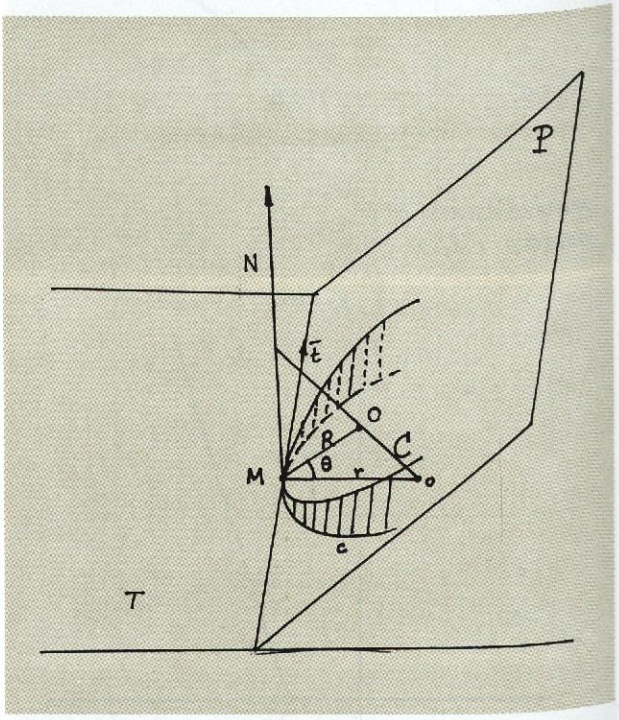
Dos superficies desarrollables que tienen entre sí un contacto de segundo orden en dos puntos M y N de una generatriz recta común, G, tiene ese mismo orden de contacto en todos los demás puntos de esta generatriz y tocan en un mismo punto A a las aristas de retroceso respectivas.

En efecto, si cortamos las dos superficies desarrollables por dos planos paralelos que pasen uno por el punto M y el otro por el N, las secciones que cada uno de estos planos produce en las dos superficies tienen entre sí un contacto de segundo orden y, por tanto, un mismo círculo osculador. La superficie cónica que proyecta una de las circunferencias así obtenidas desde el punto de contacto de la generatriz G con la arista de retroceso de una cualquiera de las dos superficies, tiene con ésta un contacto de segundo orden a lo largo de dicha generatriz y, por tanto, contiene la otra circunferencia, lo cual exige que dicho cono se confunda con el proyectante de la misma circunferencia desde el punto análogo del G en la otra superficie, es decir, que estos puntos se confundan y que las dos superficies cumplan con las condiciones indicadas.

El punto G es el de intersección de la generatriz con la recta que pasa por los centros de las dos circunferencias indicadas. El radio de curvatura en el cono será nulo cuando este plano pase por el vértice y, por tanto, este punto está en la arista de retroceso. Al ser la dirección de los planos arbitraria podemos concluir que una superficie desarrollable es osculatriz a lo largo de cada una de sus generatrices de una infinidad de conos de segundo orden que tienen su vértice en el punto donde esta recta corta a la arista de retroceso y que las secciones hechas en la superficie desarrollable por planos paralelos en los puntos de una misma generatriz, tienen radios de curvatura proporcionales a las longitudes de esta recta, medidas a partir de la arista de retroceso.

Curvatura geodéstica

Cuando una curva C trazada sobre una superficie S se proyecta sobre el plano tangente T a la superficie en uno de su puntos M, su proyección c es una sección recta del cilindro proyectante (ver figura). Sea P el plano osculador de la curva C en M y en R y r los radios de curvatura de las curvas C y c en el punto M y O el ángulo que el plano osculador P forma con el plano tangente T.



Curvatura geodésica

Según el teorema de Meunier, el centro de curvatura de la línea C del cilindro es la proyección ortogonal del centro de curvatura de la sección normal c correspondiente a la tangente t sobre el plano osculador de la curva C.

Así pues $\frac{1}{r} = \frac{1}{R} \cos\theta$ ó $R = r \cos\theta$

En efecto, la normal al cilindro proyectante en M es normal precisamente a la curva c que es una curva plana. Luego c es una sección normal de ese cilindro y C es una curva de ese cilindro que tiene la misma tangente t en M, luego según Meunier R es la proyección ortogonal de r sobre el plano osculador P de la curva.

Se llaman curvatura, radio de curvatura y centro de curvatura geodésica en un punto, los elementos de la proyección de una curva C sobre el plano tangente a la superficies. Por tanto $\frac{1}{r}$ es la curvatura geodésica de la curva C.

Las líneas geodésicas son aquellas que tienen curvatura geodésica nula, de lo que se deduce que la normal principal de la curva coincide en cada uno de los puntos de la línea geodésica con la normal en ese punto a la superficie.

Si la línea C es una línea cualquiera situada en una superficie desarrollable y se desarrolla esta superficie sobre un plano el radio de curvatura de la transformada en C es $\frac{R}{\cos\theta}$ según se vió en superficies desarrollables.

De lo anterior se deduce que cuando una curva C está situada en una superficie desarrollable su curvatura geodésica en un punto es igual a la curvatura de la curva transformada de C en el desarrollo.

3.7. Aplicación a la superficie de los buques y conclusiones

Las cuadernas de los buques son curvas planas situadas en planos paralelos.

Para representar estas curvas se utilizan cúbicas y cónicas. Describo en un anexo sucintamente un paquete de CAD/CAM utilizado por los astilleros Eriksberg de Suecia, el cual define las cuadernas por arcos de cónicas.

Esta suposición, pues, está totalmente fundamentada y estoy haciendo alusión a procedimientos matemáticos utilizados para obtener el alisado del casco.

En cuanto al desarrollo del forro del buque o, lo que es igual, a los procesos de obtención del desarrollo de la superficie del buque, estas suposiciones son todavía mucho más normales. No nos olvidemos de que existen varios modelos de tratamiento de la superficie de los buques. Primero se alisa la superficie y se obtiene una superficie que no es desarrollable. Luego por procedimientos aproximados se desarrolla esa superficie para poderla construir en los astilleros.

Además, las construcciones y razonamientos que hemos presentado en el estudio de la desarrollable circunscrita a dos cónicas son todos aplicables a dos curvas cualesquiera, situadas en planos paralelos, y son fácilmente extrapolables a cúbicas.

Las conclusiones del anterior estudio indican:

a) Que la desarrollable circunscrita a dos cónicas es una superficie de octavo grado que tiene cuatro cónicas dobles, las dos directrices inicialmente dadas y otras dos situadas en los planos principales o de simetría de las dos cónicas.

b) Que sus secciones planas son de octavo grado siendo, por tanto, de este grado las secciones obtenidas en la superficie por planos paralelos a aquellos de las cónicas.

c) Como el plano de una de las cónicas dobles tiene cuatro puntos de retroceso de la arista de retroceso de la superficie y cada uno de estos puntos debe considerarse como triple por estar en dicho plano secante las tangentes correspondientes, esta curva es de dozavo orden y, por tanto, cada una de las secciones planas de la desarrollable estudiada tiene a lo sumo doce puntos de retroceso, que son los de intersección del plano secante con la arista de retroceso. Naturalmente muchos de estos puntos pueden ser imaginarios. Por ejemplo, el plano paralelo a las cónicas C_1 y C_2 situado a la derecha de C_2 corta a la desarrollable en una curva con cuatro puntos de retroceso reales.

d) En el desarrollo de las superficies de los buques realizada por distintos procedimientos que he explicado en otros trabajos, estando la mayoría de ellos mecanizados por ordenador se toman lógicamente como curvas del mismo grado a varias cuadernas del buque, es decir, a todas aquellas que pertenecen a la chapa a desarrollar.

Todas estas secciones paralelas deben ser, pues, secciones de una misma desarrollable: de aquella que se supone sustituye a la superficie del buque en el entorno de la chapa.

Esto es sólo posible si todas esas secciones de cuaderna son curvas homológicas entre sí y, por tanto, secciones de un mismo cono, lo que es extremadamente difícil que ocurra.

Realmente el desarrollo de la superficie de los buques se efectúa suponiendo que se circunscribe un cono osculador a la superficie del buque considerada como desarrollable. Cono que tiene en el mejor de los casos, esto es, cuando se encuentra realmente una generatriz de reviro en la chapa que no es siempre posible, un contacto de segundo orden con aquella superficie en los puntos de una misma generatriz común a ambas, cuestión que explico también en el anexo.

No es extraño, pues, el que haya que deformar por calentamiento muchas de las chapas de los buques para hacer posible su construcción.

BIBLIOGRAFIA

1. LOSADA: "Geometría Analítica". E.T.S. de Ingenieros Industriales. Bilbao, 1968.
2. LEROY, F.: "Geometría Descriptiva". Editorial Gigord. París, 1905.
3. APARICI, R.: "Lecciones de Geometría Descriptiva". Librería Gutenberg. Madrid, 1925.
4. IZQUIERDO ASENSI: "Geometría Descriptiva Superior y Aplicada". Editorial Dossat. Madrid, 1978.
5. WALKERS: "Curves and Surfaces in Shipbuilding". Curves and Surfaces. 1972.
6. ROGERS, D. and ALAN, ADAMS: "Mathematical Methods in CAD". New York, 1972.
7. BEZIER, PIERRE: "Mathematicas in Unisurf CAD". Butterworths, 1986.

XXVIII SESIONES TECNICAS DE INGENIERIA NAVAL
Madrid, 30 de noviembre y 1-2 de diciembre de 1988

Isaac Peral y el desarrollo de la navegación submarina.

(La genial creación de Peral desde la perspectiva de un siglo)

Antonio Villanueva Núñez
Dr. Ing. Naval

INDICE

1. **Preámbulo.**
2. **Cómo tuvo lugar el desarrollo de la navegación submarina en el mundo y cuál fue la verdadera aportación de Peral.**
3. **En qué forma navegaba el submarino "Peral" bajo el agua.**
4. **Sobre la notable contribución de Isaac Peral al desarrollo del submarino militar.**
5. **Cómo se cerró bruscamente el más brillante proceso de investigación de nuestra historia naval.**
6. **Epílogo glorioso.**

Apéndices.

Bibliografía.

1. Preámbulo

Cuando se cumplen los 100 años de la botadura del submarino "Peral", que abrió al mundo las mejores posibilidades de navegación bajo el agua y que inició en nuestra patria el más brillante proceso de investigación de nuestra defensa nacional, inexplicablemente suspendido, los ingenieros navales españoles estamos especialmente obligados a rendir el debido homenaje a su genial proyectista e inventor.

Isaac Peral, uno de los personajes más atractivos de la historia contemporánea española, fue objeto en vida, al igual que su obra, de muy fuertes controversias y pasiones, que no llegaron nunca a empañar su nobilísima figura de marino e inventor, aunque pretendieron en algún caso desmerecer la grandiosidad de sus invenciones y han conducido incluso, como en el curso de este trabajo se verá, a referencias históricas equivocadas que exigen su pronta rectificación.

El rememorar y divulgar las realizaciones de Peral, como hombre de ciencia y como singular proyectista naval, hace tiempo que debió haber sido elegido como objetivo importante de la Asociación de Ingenieros Navales, aunque no fuera más que por el hecho de que nuestros compañeros de profesión de su época figuraron ante la opinión pública española, sin razón alguna, como los más severos detractores de sus inventos.

La obra de Peral, como inventor y proyectista naval, fue analizada por vez primera por el insigne hombre de ciencias don José Echegaray en el año 1890 y cinco años más tarde lo fue, también, por el teniente de navío don Luis Pérez de Vargas, que en su día había formado parte de la Junta Técnica de Marina, que había evaluado las pruebas del submarino.

El intentar examinar ahora, de la manera más objetiva, desde la amplia perspectiva que proporciona un siglo de alejamiento en la Historia, la verdadera contribución de Isaac Peral al desarrollo mundial de la navegación submarina y a la creación del submarino militar, es, además de un tema apasionante, el más sencillo homenaje que podemos dedicar a su memoria, siendo ésta la atrevida pretensión del autor, que no posee otros merecimientos para llevarla a cabo, que su profesión de ingeniero naval y una breve experiencia en la construcción de submarinos, pero pone de antemano su mayor entusiasmo en el cumplimiento de tan agradable cometido.

2. Cómo tuvo lugar el desarrollo de la navegación submarina en el mundo y cuál fue la verdadera aportación de Peral.

El medio ambiente submarino ha presentado siempre los más graves inconvenientes a la permanencia y circulación por el mismo, tanto del ser humano como de toda clase de artilugios ideados por su mente. Enormes presiones, en cuanto el descenso bajo la superficie alcanzaba un moderado valor, escasísima visibilidad, aún contando con aguas limpias y la necesidad de mantener una atmósfera respirable, hicieron inalcanzable aquella aspiración del hombre nada menos que hasta el siglo XIX.

Fueron ciertamente innumerables los intentos que se hicieron en la prehistoria del submarino para descender bajo las aguas y tratar de moverse en aquel medio con variados vehículos, pero en la mayoría de los casos los inventores de los mismos pagaron con su vida sus atrevidas experiencias, sin alcanzar resultados prácticos, y ello, a buen seguro, porque ni los materiales

disponibles ni la técnica de su empleo eran aún los adecuados para responder con un mínimo de seguridad a las ideas de aquellos genios.

Cuando los materiales y la técnica disponible mejoraron, la navegación bajo el agua se desarrolló impulsada principalmente por la idea de conseguir un arma de guerra eficaz y de difícil localización, con la que poder combatir contra poderosas fuerzas de superficie, más bien que por el interés en llevar a cabo investigaciones o explotaciones submarinas.

Para tratar de centrar el tema de nuestra conferencia, no vamos a referirnos en ella, para nada, a los artilugios submarinos prehistóricos, con valor de leyenda, sino que por el contrario vamos sólo a considerar los vehículos submarinos que de una manera fehaciente representaron una conquista indudable en la resolución del problema de la navegación bajo el agua, habiendo elegido como sistema de trabajo más adecuado, para lograr los fines de esta conferencia, el reunir en una misma Tabla las características y principales prestaciones de los tipos de unidades que a lo largo de la Historia significaron un avance más importante, pues el análisis crítico de tal Tabla, que hemos tratado de confeccionar de forma rigurosamente cronológica, mediante laboriosa selección, debe conducirnos, sin ninguna duda, a valorar la cuota de participación de cada una de dichas unidades y, por tanto, también del submarino "Peral", en lo que ha sido el desarrollo total de la navegación bajo el mar.

La repetida Tabla ha resultado constituida para nosotros por 12 unidades del mayor interés, sobre las cuales pasamos a hacer ahora algunos comentarios, exponiendo, principalmente, las razones que han justificado su selección.

La primera unidad incluida con toda justicia en la Tabla panorámica es el pequeño vehículo bautizado con el nombre de "Turtle" (figura 1), ideado por el ingeniero norteamericano David Bushnell en el año 1776. Este vehículo, de un solo tripulante, dotado de tanques de lastre para anular la flotabilidad, fue el primero de la Historia que navegó bajo el agua en cualquier dirección, aunque torpe y lentamente, al ser maniobrado mediante una hélice horizontal, otra vertical y un timón vertical, que habían de accionar los dos únicos brazos humanos existentes a bordo con la habilidad y diligencia propias de un músico de batería. Su capacidad de permanencia bajo el agua no superaba la media hora, al estar condicionada por el enrarecimiento del aire de la cámara, que sólo contaba con la renovación natural cuando salía a flote. No importa que este pequeño artilugio, con forma ovoide, atacase sin éxito al navío inglés "Eagle" de 64 cañones en la Guerra de la Independencia Americana, para que el mismo significase, con sus torpes y lentos movimientos ya mencionados, un escalón importante en el desarrollo de los vehículos submarinos.

En el año 1801 el ingeniero y gran inventor americano Robert Fulton ideó un pequeño submarino con forma de elipsoide de revolución, que fue bautizado con el nombre de "Nautilus" (figura 2) y que significó otro importante paso en el desarrollo de la navegación submarina, ya que consiguió recorrer distancias de hasta 400 metros bajo el agua y permanecer quieto y sumergido a siete metros de profundidad durante cinco horas, haciendo uso del aire comprimido para respirar. Su propulsión, que se llevaba a cabo mediante una hélice movida a mano, era desesperadamente lenta y aunque disponía de un timón vertical y de dos horizontales, todos ellos apenas gobernaban por la falta absoluta de velocidad del vehículo.

En el año 1863, el Capitán de Navío de la Marina francesa, Burgeois, construyó con plancha de hierro un submarino "gigante", que se bautizó con el nombre de "La Plongeur" (figura 3) y que tenía un desplazamiento de 450 toneladas métricas y una eslora de 45 metros. Fue éste el primer submarino en cuya impulsión se había sustituido el esfuerzo humano por la energía mecánica, realizándose su propulsión mediante la energía contenida en doce grandes botellas de aire comprimido a una presión de 12 atmósferas, que ocupaban la mayor parte del volumen de los compartimientos estancos en que el buque estaba dividido. Para regular la profundidad de inmersión disponía de un sistema ingenioso de émbolos alojados en el casco con los cuales se variaba el volumen de agua desalojado por el buque; pero tal sistema no respondió a lo que se esperaba, de forma que el submarino caminaba bajo el agua como dando saltos y siguiendo una trayectoria fuertemente sinusoidal en el plano vertical, que no podía ser corregida por la acción de los timones horizontales.

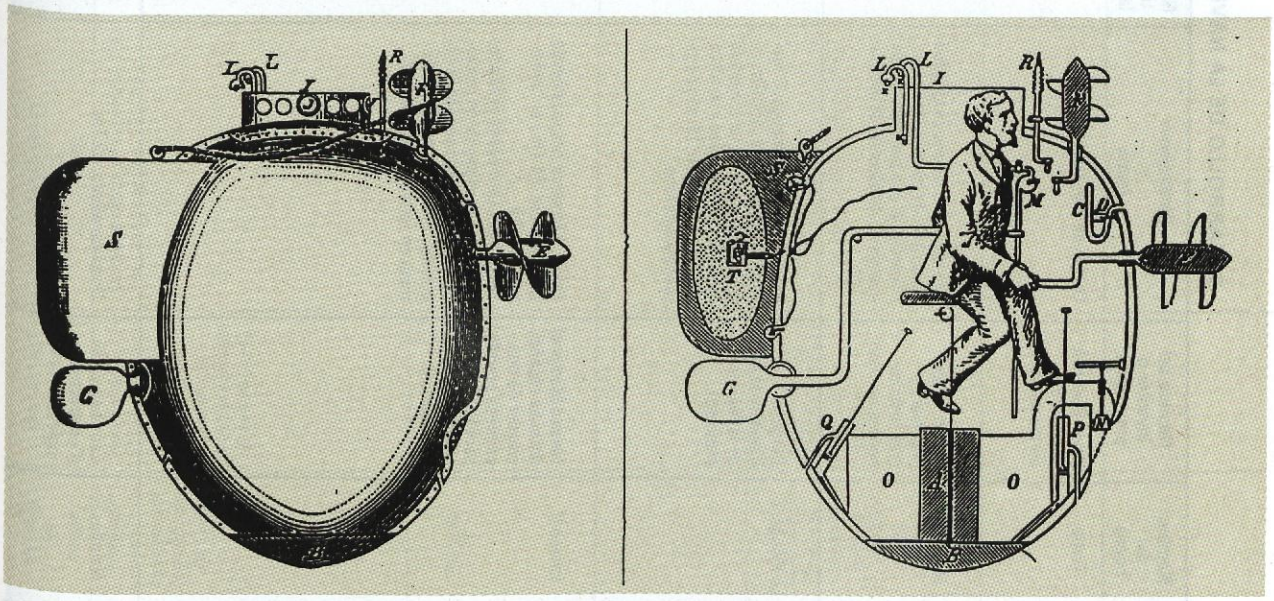


Fig. 1.—El vehículo submarino "Tortuga", construido por el ingeniero norteamericano David Bushnell en 1776, fue el primero de la Historia que navegó bajo el agua en cualquier dirección, aunque torpe y lentamente. Era maniobrado mediante una hélice vertical, otra horizontal y un timón vertical, todos ellos accionados por los brazos de su único tripulante.

Tabla I

DESARROLLO DE LA NAVEGACION SUBMARINA (Unidades que significaron un importante avance)

Año	Nombre del buque	Nombre del inventor o proyectista	Dimensiones y forma	N.° de tripulantes	Sistema de inmersión	Medios de propulsión y dirección bajo el agua	Velocidad y autonomía en inmersión y otros resultados de las pruebas
1776	Turtle	David Bushnell (Ingeniero norteamericano).	Ovoide de 3 metros de altura.	1	Tanques de lastre en el fondo, para anular la flotabilidad. Hélice vertical movida a mano para el gobierno en profundidad.	Hélice horizontal movida a mano para la propulsión. Timón vertical para el gobierno en dirección.	Se desplazaba lentísimamente y su autonomía bajo el agua no llegaba a media hora, pues venía impuesta por el cansancio del tripulante y el enrarecimiento del aire.
1801	Nautilus	Robert Fulton (Ingeniero y gran inventor norteamericano).	Elipsoide de 5 metros de longitud construido de plancha de cobre. Disponía de una pequeña torreta que servía de escotilla de acceso.	3	Dos depósitos en su fondo hacían de tanques de lastre para anular la flotabilidad. Disponía de timones horizontales que gobernaban muy mal por falta de velocidad.	La propulsión se efectuaba mediante una hélice movida a brazo, pero reduciéndose el esfuerzo por medio de engranajes multiplicadores. Timón vertical para el gobierno en dirección.	Navegó bajo el agua distancias hasta de 400 metros, pero sus condiciones maniobreras en inmersión eran pésimas, por la lentísima velocidad que conseguía con la propulsión a brazo.
1863	Le Plongeur	Burgeois (Capitán de navío de la Marina francesa).	Eslora, 45 metros; manga, 6 metros; desplazamiento, 450 Tm. Su silueta era la de un torpedero de botalón muy alargado y su casco estaba dividido en 12 compartimentos estancos.	12	Tanques de lastre en el fondo para anular la flotabilidad. La expulsión del agua de los tanques se efectuaba principalmente por aire comprimido. Para regular la profundidad de inmersión disponía de un sistema de émbolos alojados en el casco, mediante los cuales variaba el volumen de agua desalojada por el buque.	Propulsión, mediante una hélice horizontal movida por una máquina de 80 HP, accionada por aire comprimido a 12 atm. Timón vertical para el gobierno en dirección.	Alcanzó en inmersión una velocidad de cuatro nudos. El sistema de émbolos para regular la profundidad de inmersión no respondió a lo que se esperaba y el buque caminaba como rebotando, con una trayectoria ondulada en el plano vertical.
1864	Ictineo II	Narciso Monturiol (Inventor español, creador de una empresa privada para la construcción de submarinos)	Eslora, 17 metros; desplazamiento en superficie, 64 Tm.; en inmersión, 72 Tm. Doble casco de madera, el interior con forma de elipsoide de revolución, el exterior con secciones circulares, menos en popa que termina en forma de cola de pez.	12	Con la inundación de los tanques de lastre del buque descendía hasta dejar sólo fuera de la superficie del agua los cristales altos de la escotilla. En tal situación entraba en funcionamiento la "vejiga natatoria", ingenioso aparato inspirado en los propios órganos de los peces y que regulaba la traslación en sentido vertical del barco. El trimado longitudinal se obtenía por el desplazamiento de un cilindro de plomo, encarrilado paralelamente al eje longitudinal del buque.	La propulsión se realizaba por una hélice de doble fila de paletas, movida por una máquina de vapor de 6 HP, durante la navegación en superficie, y de otra de 2 HP, durante la navegación en inmersión. El generador de vapor era el mismo en las situaciones a flote y sumergido y sólo se le habían añadido para la última condición quince cámaras tubulares de seis centímetros de diámetro en el frente de la caldera. En cuanto se daba la orden de sumergirse se cerraba herméticamente el hogar de carbón y la boca del cenicero, cargándose inmediatamente las cámaras tubulares con quince cartuchos de mezcla y la vaporización continuaba bajo el agua. Además el timón vertical para el gobierno en dirección, disponía de dos hélices montadas a Br. y Er. sobre ejes a 45°, con las que podía hacer la ciaboga.	En las pruebas de resistencia estructural descendió hasta 30 metros de profundidad. La maniobra de inmersión era lenta, ya que tardaba 31 minutos en descender a 18 metros. La velocidad del buque en superficie era de dos a tres nudos, y aquélla del buque sumergido inferior a un nudo. La temperatura en el interior del submarino, cuando navegaba en inmersión, superaba los 50° C.
1886	Nautilus	Campbell y Ash (Constructores ingleses)	Desplazamiento, 52 Tm.	6	Disponía de un sistema de ocho émbolos alojados en el casco, con los cuales se regulaba la profundidad de inmersión haciendo variar el volumen del agua desalojada por el buque.	Fue el primer submarino de propulsión eléctrica, realizándose la propulsión a través de dos hélices laterales. Un timón vertical y otro horizontal gobernaban el submarino.	Tenía prevista una velocidad de seis nudos y una autonomía de 80 millas, pero se hundió en el fondo del Támesis, con el Director de Construcción Naval inglés a bordo, cuando realizaba su viaje de pruebas.

Año	Nombre del buque	Nombre del inventor o proyectista	Dimensiones y forma	N.° de tripulantes	Sistema de inmersión	Medios de propulsión y dirección bajo el agua	Velocidad y autonomía en inmersión y otros resultados de las pruebas
1887	Prototipo número 2 de Nordenfeldt (encargo de Turquía)	Nordenfeldt (Célebre multimillonario sueco, fabricante de artillería y famoso proyectista de submarinos).	Desplazamiento en superficie, 160 Tm.; en inmersión, 230 Tm.	10	Una vez inundados los tanques de lastre se alcanzaba una flotación que dejaba fuera del agua una pequeña superestructura con las torrecillas de acceso y chimenea. El buque, que disponía de una buena máquina de vapor que en superficie le daba un andar de 17 nudos, se sumergía por la acción combinada del impulso de su hélice propulsora y de la posición de sus timones horizontales y continuaba navegando luego bajo el agua más de tres horas, merced al vapor que se seguía generando en la caldera después de apagados los fuegos.	La propulsión en inmersión era la misma que en superficie, pero con los fuegos apagados. El aparato para mantener la profundidad y la horizontalidad bajo el agua era en esencia el mismo de que disponían para este fin los torpedos White Head, es decir, que una placa hidrostática y un péndulo debían manejar automáticamente los timones horizontales. Fue uno de los primeros submarinos con timones horizontales en proa y popa. A pesar del "aparato de profundidades" y de los timones horizontales su profundidad era difícilmente controlada.	Llegó a alcanzar en inmersión una velocidad de cinco nudos. Su falta de estabilidad en inmersión era muy grande, así como las dificultades de controlar su trayectoria bajo el agua.
1887	Porpoise	Waddington (Ingeniero inglés)	Eslora, 11,3 metros; manga, 1,83 metros. Sólido de revolución fusiforme.	2	Se llenaban los tanques de lastre hasta quedar sólo el kiosko por encima de la superficie del agua y se ponía en marcha el motor eléctrico propulsor, hasta obtener una velocidad de unos cinco nudos. Inclinando entonces los timones horizontales situados en los costados el buque se sumergía totalmente. Cuando se quería sumergir la embarcación estando en reposo, se hacía uso de un sistema de hélices alojadas en dos tubos verticales que atravesaban el buque de arriba abajo y que según girasen en uno u otro sentido le hacían descender o elevarse.	Propulsión eléctrica mediante una hélice movida por un motor de 8 HP. La energía eléctrica del buque era suministrada por una batería de 45 acumuladores a 90 V de tensión. Además de las placas o timones horizontales de los costados, que producían la inmersión cuando el buque navegaba, disponía de otro timón horizontal en popa. Para el gobierno en dirección disponía de un timón vertical.	En las pruebas realizó inmersiones de cierta duración con velocidades de unos cinco nudos. Su estabilidad era muy deficiente.
1888	Isaac Peral (Inició su construcción el 7-10-1887 y fue botado el 8-9-1888)	Isaac Peral (Marino, hombre de ciencia e inventor)	Eslora, 22 metros. Sección circular con 2,76 metros de diámetro en la cuaderna maestra. Desplazamiento en superficie, 77 Tm.; en inmersión, 85 Tm.	10	Inundando los tanques de lastre existentes en el doble fondo se alcanzaba una flotación que pasaba por la base de la torreta, es decir, una situación con poca fuerza ascensional; en dicho momento se ponían en marcha las dos hélices de eje vertical situadas en la parte baja del casco, que producían una tracción descendente y hacían bajar el buque a la cota deseada. El buque alcanzaba y mantenía, además, la profundidad deseada de una manera absolutamente automática, gracias al ingeniosísimo "aparato de profundidades" invento del propio Peral, el cual actuaba sobre la marcha de las hélices verticales con enorme eficacia y precisión. El sistema de inmersión de este buque, que se calificó como de "inmersión forzada", era de una gran seguridad, pues en el caso de cualquier avería tendía a subir a la superficie hasta sacar la torreta fuera del agua.	Propulsión eléctrica mediante dos hélices movidas por dos motores de 30 HP. La energía eléctrica para la propulsión del buque era suministrada por una batería de 496 acumuladores, que debían acoplarse hasta dar una tensión de 500 V. La horizontalidad del buque sumergido se mantenía automáticamente gracias a la acción de otro ingenioso invento de Peral, el péndulo eléctrico, que actuaba directamente sobre los motores de las hélices verticales. Disponía de dos timones verticales en un mismo eje, para gobernar en dirección y de dos pequeños timones horizontales, poco efectivos, para ayudar al gobierno en profundidad.	Fue el primer buque en el mundo que navegó en mar libre a nueve metros de profundidad sin ningún inconveniente y manteniendo un rumbo fijo durante una hora. Su velocidad en inmersión a régimen de 1/2 baterías, era de cuatro nudos y si los motores eléctricos hubieran podido funcionar al 100/100 de la tensión disponible, como estaba previsto, se habría alcanzado una velocidad bastante mayor. En superficie alcanzó la velocidad de ocho nudos haciendo funcionar los motores al régimen de 3/4 de su batería de acumuladores y su radio de acción era de 133 millas a la velocidad de seis nudos. La máxima profundidad de inmersión para la que había sido calculado era de 30 metros. Su estabilidad transversal en inmersión era muy buena, gracias al reparto de pesos previsto por su proyectista. En superficie sus condiciones marineras eran malas, como la de todo casco con forma de sólido de revolución y sin superestructuras.

Año	Nombre del buque	Nombre del inventor o proyectista	Dimensiones y forma	N.° de tripulantes	Sistema de inmersión	Medios de propulsión y dirección bajo el agua	Velocidad y autonomía en inmersión y otros resultados de las pruebas
1888	Gymnote (Botado el 23-9-1888)	Gustave Zedé (Ingeniero naval francés, famoso proyectista de submarinos, llegó a ser Director de Construcciones Navales)	Eslora, 17,20 metros. Fusiforme. Sección circular con 1,80 metros de diámetro en la cuaderna maestra. Desplazamiento en superficie, 30 Tm.; en inmersión, 31 Tm.	4	Inundando los tanques de lastre se alcanzaba una situación con muy poca reserva de flotabilidad, ya que la flotación pasaba por la base de la torreta. En dicha situación, y estando el buque en marcha, el descenso a la cota deseada se producía mediante la actuación de los timones horizontales de proa y popa y gracias al impulso de la hélice propulsora.	Propulsión eléctrica mediante una hélice movida por un motor de 55 HP. La novedad más acusada de este primer prototipo de Zedé fue la introducción de timones horizontales en propa y popa, como únicos elementos para tratar de lograr el gobierno en profundidad.	La velocidad máxima en superficie no superó los siete nudos y la correspondiente en inmersión los 4,3. Debido a la forma de sólido de revolución de su casco y a su pequeña superestructura sus cualidades marineras eran malas. Con la experiencia adquirida se construyó cinco años después en Francia el "Gustave Zedé" (1893), de 274 Tm., con sustanciales modificaciones y una superestructura que mejoraba las condiciones marineras en superficie.
1899	Narval	Max Laubeuf (Ingeniero naval francés, proyectista de submarinos)	Desplazamiento de 117 Tm. en superficie y 202 Tm. en inmersión. Submarino de doble casco completo, el interior resistente y de sección circular y el exterior de plancha fina con las formas de un buque torpedero.	—	En los submarinos de doble casco los tanques de lastre están situados entre los dos cascos y la reserva de flotabilidad, diferencia entre el desplazamiento sumergido y el desplazamiento a flote, factor muy importante para la seguridad, resulta siempre elevada. En el caso del "Narval" la reserva de flotabilidad resultó excesiva (73 por 100), con la contrapartida de un tiempo muy dilatado para la inmersión. Disponía de timones horizontales en proa y popa para el gobierno del buque en profundidad.	Caldera de petróleo y máquina de vapor de 250 HP para la propulsión en superficie. Batería de acumuladores y motor eléctrico para la propulsión en inmersión. Estando el barco en superficie la máquina de vapor podía accionar el motor eléctrico, que haciendo entonces de dinamo recargaba la batería, con lo que se había logrado lo que se dio en llamar el "submarino autónomo".	Velocidad máxima en superficie 10 nudos. Velocidad máxima en inmersión 6,5 nudos. Autonomía en superficie 500 millas. En los submarinos de doble casco las condiciones marineras en superficie y la estabilidad en inmersión resultaron buenas. En los sucesivos prototipos de Laubeuf se redujo notablemente el espacio destinado a los tanques de lastre, para obtener una inmersión más rápida, bajándose la reserva de flotabilidad en algunos casos a un 37 por 100. Prueba de inmersión máxima 40 metros.
1900	Holland número 9 (Prototipo de la primera serie de submarinos construida para la Marina de los EE.UU.)	John P. Holland (Ingeniero norteamericano dedicado al proyecto y construcción de submarinos)	Eslora, 19,30 metros; desplazamiento en superficie, 108 Tm.; en inmersión, 122 Tm. Fusiforme, con casco único de sección circular.	7	Por inundación de los tanques de lastre situados en el doble fondo. La reserva de flotabilidad de estos buques era solamente de un 13 por 100. El gobierno del buque en profundidad se llevaba a cabo mediante los timones horizontales de proa y popa.	La planta propulsora del tipo Holland número 9, construido en serie para los EE.UU., estaba constituida por un motor de gasolina de 160 HP, que le proporcionaba en superficie un andar de siete nudos y por un motor eléctrico de 70 HP, alimentado por una batería de acumuladores, que le proporcionaba en inmersión una velocidad de seis nudos. Cuando el buque navegaba en superficie podía recargar la batería, por lo que se trataba de un "submarino autónomo".	Velocidad en superficie siete nudos. Velocidad en inmersión seis nudos. Autonomía en superficie 1.500 millas. Autonomía en inmersión tres horas. Prueba de inmersión máxima 40 metros.
1941	Submarinos alemanes del tipo VII-C (El núcleo de su Marina durante la II Guerra Mundial)	Astilleros de Kiel (Alemania)	Eslora, 67 metros; diámetro del cuerpo cilíndrico, 4,70 metros; desplazamiento en superficie, 711 Tm.; desplazamiento en inmersión, 866 Tm.	36	Submarinos con casco de acero soldado, con una reserva de flotabilidad del 22 por 100. Para el gobierno en profundidad disponía de dos parejas de timones horizontales sin abatimiento. Tiempo de inmersión 30 segundos. Tiempo de achique de los tanques con aire comprimido dos minutos.	Para la navegación en superficie disponía de dos motores Diesel de 1.500 HP y para la navegación sumergida de dos motores eléctricos de 375 HP, alimentados por una batería de 124 acumuladores.	Velocidad máxima en superficie 18 nudos. Velocidad máxima en inmersión durante una hora ocho nudos. Autonomía en inmersión a cuatro nudos 90 millas. Profundidad máxima de navegación 100 metros.

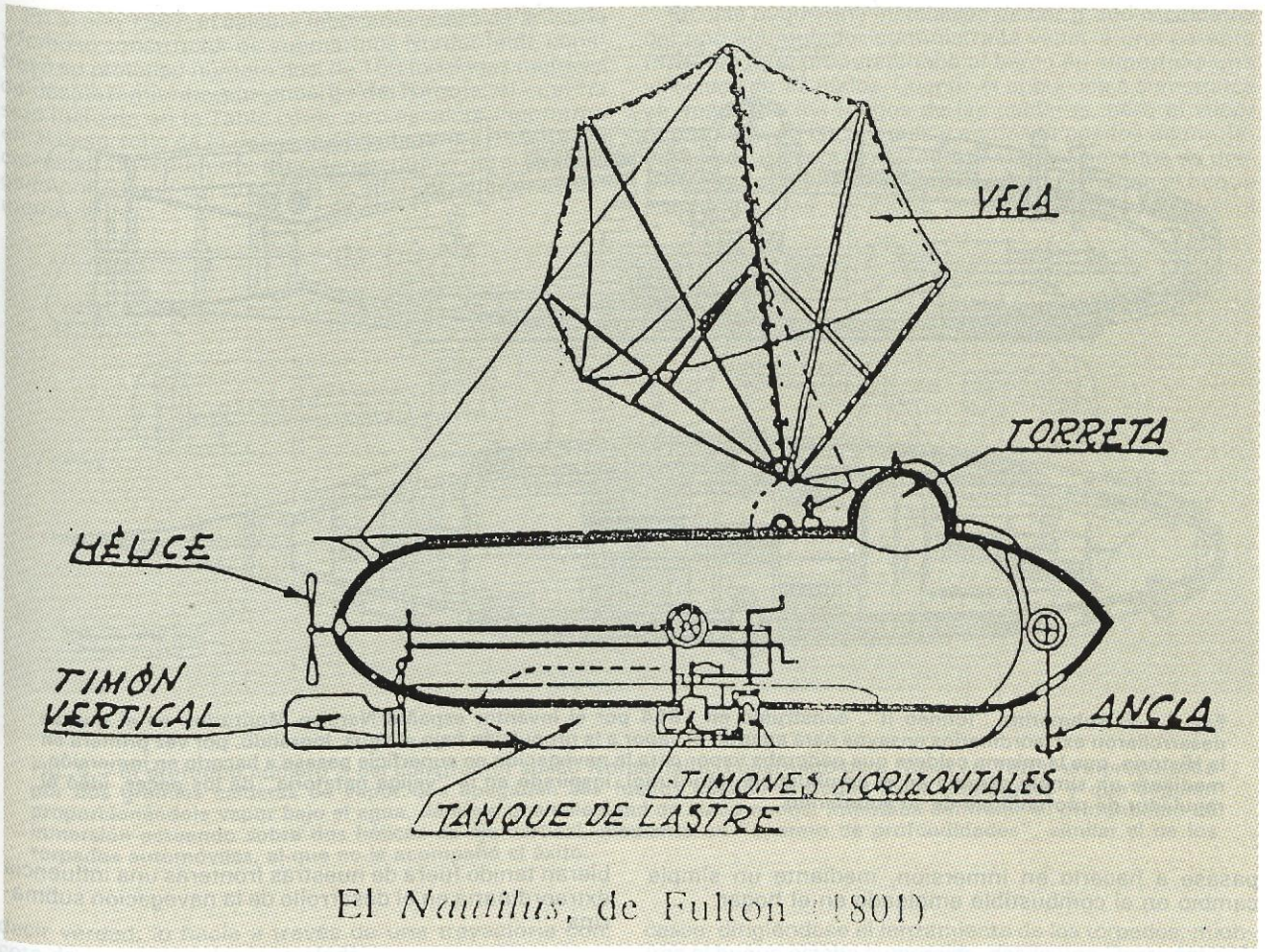


Fig. 2.—El vehículo submarino "Nautilus", construido en 1801 por el gran inventor norteamericano Robert Fulton, era propulsado por una hélice movida a mano y disponía de un timón vertical y de dos horizontales, que apenas gobernaban por la falta de velocidad. Llegó a recorrer distancias de 400 metros a una velocidad desesperadamente lenta.

En el año 1864, el gran inventor español Narciso Monturiol lanzó al agua su segundo prototipo de buque-pez, el "Ictineo II" (figura 4). Inicialmente concebido para ser propulsado mediante una hélice accionada a brazo por 16 hombres, pronto se convirtió en el más interesante banco de pruebas e investigaciones de todos los aspectos relacionados con la navegación submarina, con el mérito, por añadidura, de haber sido sostenido por una sociedad privada creada por el mismo Monturiol.

De extraordinaria hay que calificar la concepción del casco de este submarino, provisto de doble forro, de los cuales el interior o resistente tenía forma de elipsoide de revolución y el exterior con secciones también circulares, pero que se transformaban en elípticas en el extremo de popa, para remedar la forma de una cola de pez. Con el único material de que Monturiol pudo disponer, la madera, este buque pudo descender satisfactoriamente a 30 metros de profundidad.

Notable fue también en este submarino la concepción del regulador de inmersión, o "vejiga natatoria", como le llamaba su autor, por haberse inspirado en el órgano correspondiente de los peces, al tratar de encontrar un medio mecánico para descender a la cota de inmersión deseada.

Fueron, asimismo, extraordinarios los trabajos y ensayos que se hicieron en el "Ictineo II", como decimos, para adaptar el vapor a la propulsión bajo el agua, logrando Monturiol, por vez primera, que la misma caldera que generaba el vapor para la navegación en superficie

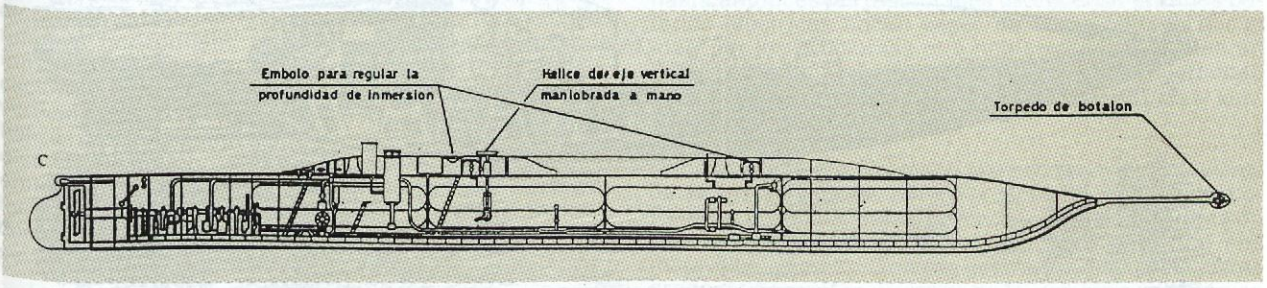


Fig. 3.—El submarino "Le Plongeur", construido en 1863 por el capitán de navío de la Marina francesa Burgeois, fue el primer submarino impulsado por energía mecánica, realizando su propulsión mediante la energía contenida en 12 grandes botellas de aire comprimido. Trató de regular su profundidad de navegación mediante émbolos alojados en el casco, pero caminaba bajo el agua siguiendo una trayectoria muy ondulada en el plano vertical, hasta llegar a rebotar casi con el fondo del mar.

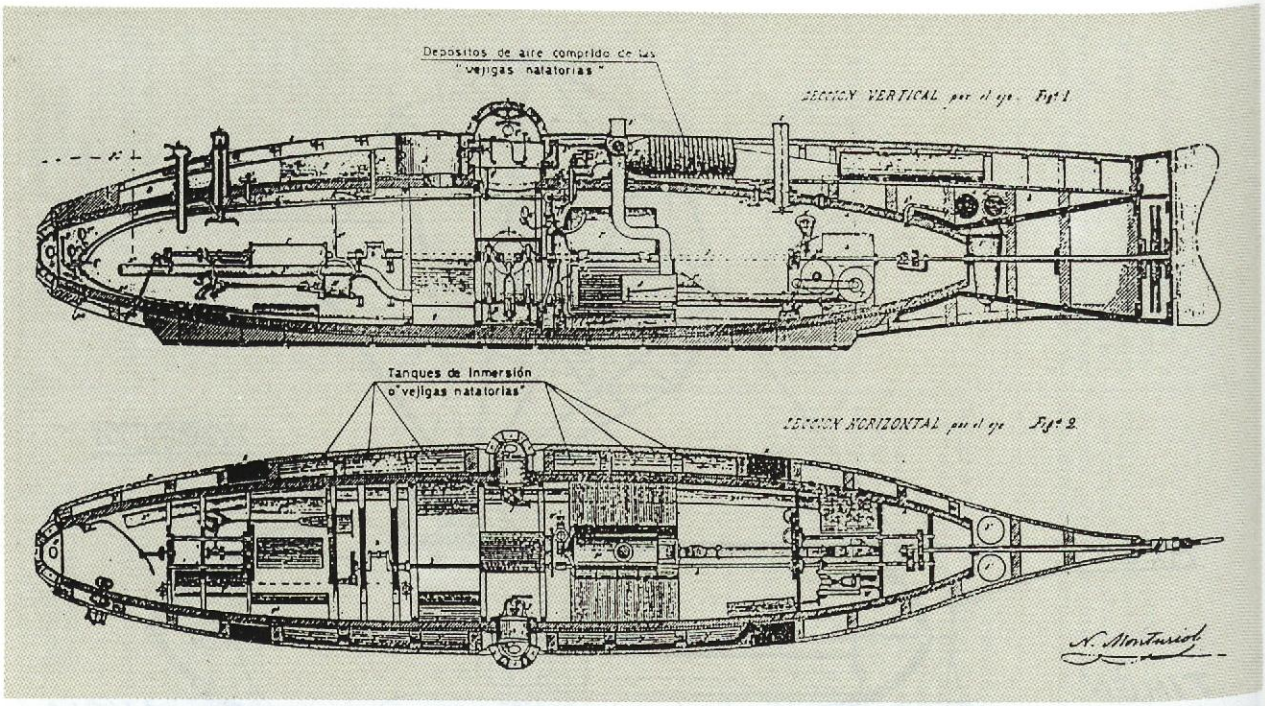


Fig. 4.—El submarino "Ictineo II", construido en 1864 por el inventor español Narciso Monturiol, en el que se desarrollaron extraordinarios ensayos para adaptar el vapor a la propulsión bajo el agua, logrando, por vez primera en la Historia, que la misma caldera que generaba vapor para la navegación en superficie pasase a hacerlo en inmersión, mediante un simple cambio en el combustible. Monturiol, inspirado en la "vejiga natatoria" de los peces, ideó el regulador de profundidad de su submarino.

pasase a hacerlo en inmersión, mediante un simple cambio en el combustible empleado en el hogar.

El "Ictineo II" disponía para la navegación en superficie de una máquina de vapor bicilíndrica de seis HP y para la navegación en inmersión de una monocilíndrica de dos HP y aunque las formas hidrodinámicas del buquepez eran perfectas, con tan escasa potencia no se llegó a alcanzar en inmersión una velocidad ni siquiera de un nudo. Por otro lado, las temperaturas en el interior de la cámara, cuando navegaba bajo el agua, superaban con facilidad los 50° C, lo que le hacía casi inhabilitable, al igual que ocurrió con todos los submarinos de vapor posteriores a él, pero ello no quita que tanto la forma de construcción de su casco, como sus métodos de regeneración del aire ambiente y especialmente todos los ensayos de propulsión a vapor llevados a cabo, no hubieran tenido fuera de nuestras fronteras una influencia extraordinaria en el desarrollo de la navegación submarina.

En el año 1886, los constructores ingleses Andrew Campbell y James Ash proyectaron el primer submarino de cierto tamaño con propulsión eléctrica, operado por una batería de 100 acumuladores, que fue bautizado con el nombre de "Nautilus". Este buque (figura 5), con un desplazamiento de 52 toneladas métricas, disponía para regular su profundidad de inmersión de un sistema de ocho émbolos alojados en el casco y que emergían más o menos de sus costados, en forma similar a como lo hiciera antes el submarino gigante "Le Plongeur", para variar el volumen de su carena; pero el "Nautilus" tuvo un final trágico, ya que se hundió en el fondo del Támesis, cuando realizaba el viaje de pruebas, llevando a bordo al Director de Construcción Naval inglés.

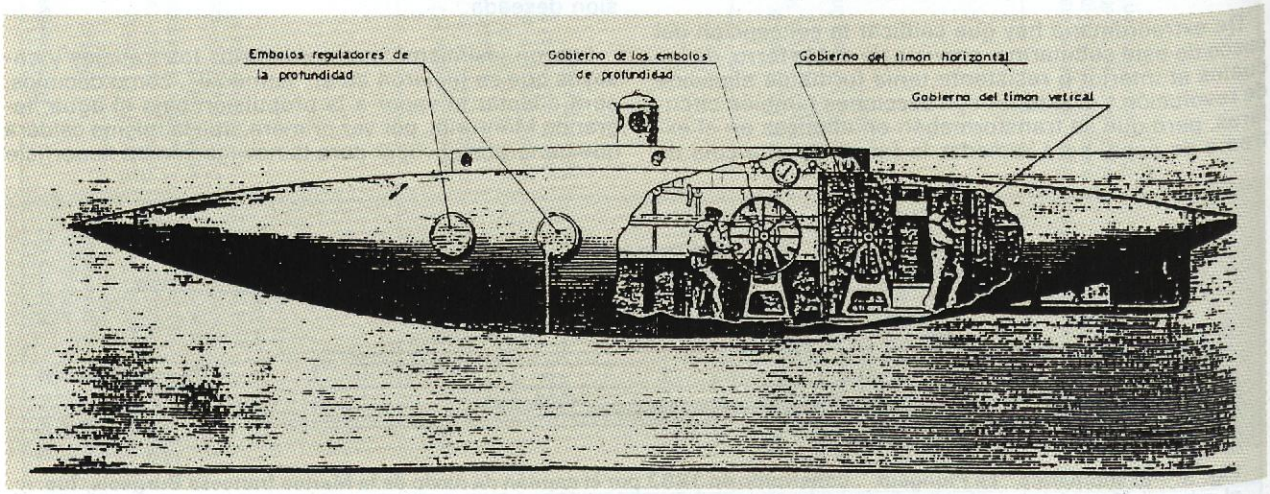


Fig. 5.—El submarino "Nautilus", construido por los ingleses Campbell y Ash en 1886, fue el primer vehículo submarino de cierto tamaño con propulsión eléctrica. Intentaba regular su profundidad de inmersión variando el volumen de su carena, mediante un sistema de émbolos alojados en el casco, pero tuvo un final trágico.

En el año 1887, el célebre fabricante sueco de artillería y famoso constructor de submarinos Nordenfeldt, construyó su prototipo número dos, de 160 toneladas métricas de desplazamiento, por encargo de Turquía, el cual ha sido incluido en la Tabla como otro escalón importante en el desarrollo de la navegación submarina (la figura 6 corresponde realmente al prototipo número tres, encargado por Rusia, del que sólo se diferenciaba en su armamento).

En este buque una instalación de dos grandes calderas del tipo acumulador suministraba vapor a una potente máquina, que proporcionaba al barco en superficie una velocidad de 17 nudos. Cuando el buque iba a sumergirse se apagaban los fuegos de las calderas, pero el vapor acumulado en las mismas y en dos depósitos acumuladores de 10 kilogramos/centímetros cuadrados de presión, era suficiente para seguir proporcionando al buque sumergido una velocidad de cinco nudos, aunque, a

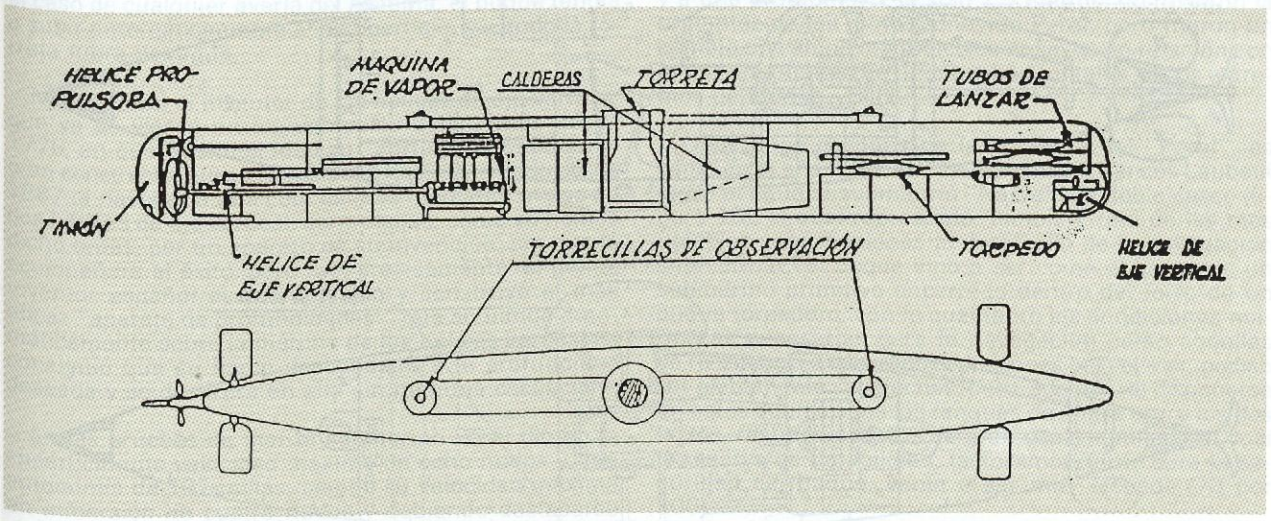


Fig. 6.—El prototipo numero 3 del constructor sueco Nordenfeldt, construido para Rusia en 1889, era propulsado por dos grandes calderas de vapor que apagaban sus fuegos cuando el buque iba a sumergirse y que seguían proporcionándole vapor bajo el agua, dándole una velocidad de cinco nudos. Intentaba controlar su profundidad de inmersión actuando sobre dos hélices de eje vertical, mediante un "aparato de profundidades", similar al de los torpedos automóviles, al que no le acompañó el éxito.

decir verdad, lo hacía a través de una trayectoria con cota de inmersión descontrolada.

Por la forma de comportarse en su propulsión, este tipo de submarino se asimiló en su época a un individuo que corriendo a gran velocidad por tierra se sumergiese en un río, buceando durante todo el tiempo que pudiese contener la respiración y saliendo a gran distancia y en un lugar imprevisto.

Este prototipo de Nordenfeldt intentaba navegar a una cota de inmersión estable utilizando un "aparato de profundidades", que era muy similar al de los torpedos automóviles Whitehead inventados pocos años antes, pero que actuaba sin éxito sobre las dos hélices de eje vertical de que disponía el submarino.

El submarino "Porpoise", construido por el ingeniero inglés Waddington en el año 1887 (figura 7), era por sus dimensiones un bote proyectado para su embarque en buques grandes, pero se ha incluido en la Tabla por haber sido uno de los primeros vehículos submarinos provistos de propulsión eléctrica y contar con un equipo de hélices para la inmersión en reposo y con dos amplios timones horizontales en el costado, para provocar la inmersión cuando iba navegando. En efecto, la embarcación disponía de cuatro hélices alojadas en dos tubos verticales que atravesaban el casco y según que dichas hélices girasen en uno u otro sentido, el buque descendía o se elevaba cuando estaba en reposo, pero cuando la embarcación navegaba en superficie con una cierta velocidad y con la flotación adecuada, bastaba el inclinar convenientemente los dos timones de costado para que se sumergiera.

En el año 1888, Isaac Peral puso a flote en el Arsenal Militar de La Carraca el primer torpedero submarino de la Historia (figura 8), provisto de un tubo lanzatorpedos en su proa, que podía recargarse desde el interior del casco, dirigiéndose el lanzamiento de los torpedos, mientras el buque estaba sumergido, desde una "torre óptica", verdadera precursora del periscopio submarino; pero estos logros militares, tan singulares e importantes, fueron simultáneamente acompañados en el nuevo buque de notables inventos e innovaciones, con los cuales Peral contribuyó al progreso de la navegación submarina como nadie lo había hecho antes de él.

En efecto, hemos mencionado ya cómo fueron Campbell y Ash en 1886 los primeros que aplicaron la energía eléctrica a la propulsión submarina en vehículos de un cierto tamaño y que un año más tarde Waddington había logrado brillantes resultados con su pequeña embarcación "Porpoise", pero el paso gigante en la electrificación de los submarinos fue dado precisamente por Peral, al llegar a instalar en su buque una batería de 600 grandes acumuladores, de los cuales 496 estaban destinados a proporcionar energía para la propulsión y los 104 restantes al alumbrado y otros servicios del barco. La modernísima planta generadora de energía eléctrica de su submarino era de la mayor capacidad que se había conocido (350 amperios/hora) y aunque se habían temido hasta entonces las dificultades de encerrar grandes baterías eléctricas en un casco de acero bañado por el mar, por los problemas que habían de presentarse en los aislamientos y en la propia seguridad del personal, tales problemas fueron sabiamente resueltos en el submarino español.

Indudablemente hay muchos motivos para maravillarse de la instalación de potencia eléctrica concebida por Peral, aconsejado, quizá, por su compañero de profesión y eminente electricista José Luis Díez, pero aún nos maravillamos más cuando se tiene en cuenta el incipiente grado de desarrollo mundial de la industria y la técnica eléctrica de aquellos tiempos, ya que, concretamente, la primera instalación eléctrica efectuada en España lo había sido en Madrid en el año 1881, es decir, sólo siete años antes.

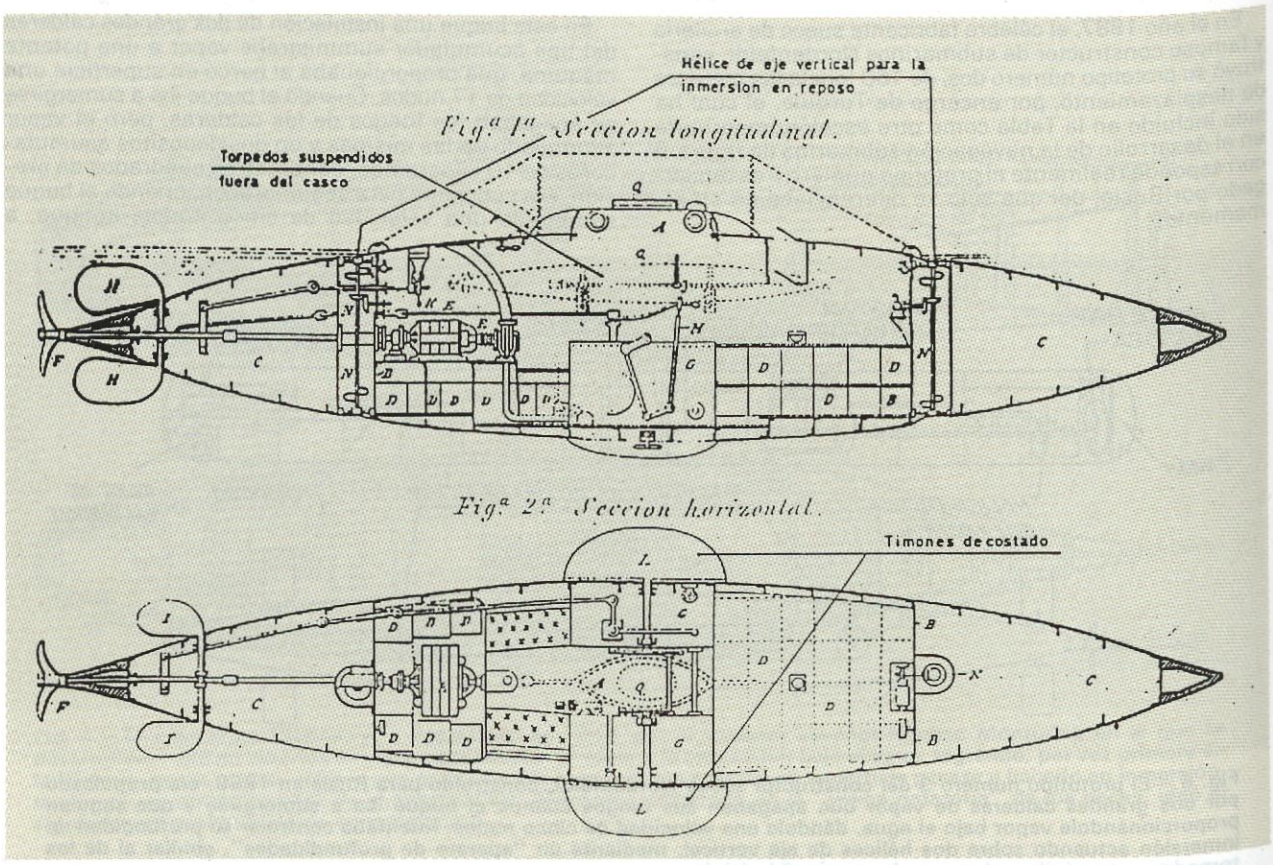


Fig. 7.—El pequeño vehículo "Porpoise" construido por el ingeniero inglés Waddington en 1887, fue uno de los primeros vehículos submarinos dotado de propulsión eléctrica y disponía de un equipo de hélices verticales para la inmersión en reposo y de dos amplios timones de costado para provocar la inmersión cuando navegaba en superficie.

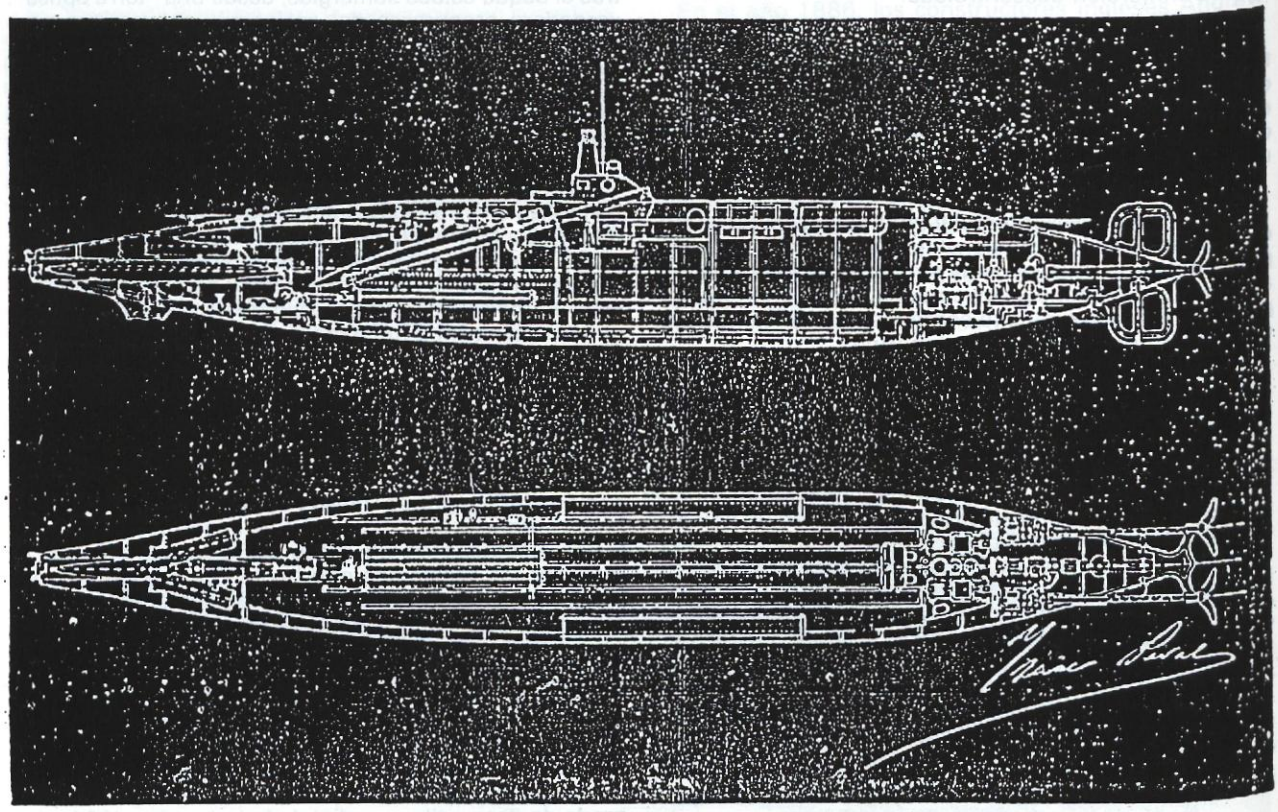


Fig. 8.—El submarino "Peral", primer torpedero submarino del mundo, botado en el arsenal de La Carraca en el año 1888, que consagró la propulsión eléctrica como el medio ideal para navegar sumergido, resolviendo el difícil problema de navegar bajo el agua con seguridad, regularidad y automatismo, gracias a su genial "aparato de profundidades".

Buscando Peral la mayor seguridad en cuanto al sistema de navegación bajo el agua, eligió el camino de la "inmersión forzada", mediante el empleo de una tracción descendente ejercida por dos hélices de eje vertical instaladas en el fondo del buque. Previamente a la inmersión el submarino era lastrado hasta una flotación que pasaba por la base de la torreta, con lo que su reserva de flotabilidad era pequeña y podía ser fácilmente vencida por la acción de las citadas hélices, resultando claro que en el caso de cualquier avería del sistema, el buque tendía a subir automáticamente a la superficie, sacando la torreta fuera del agua.

No fue Peral el inventor de las hélices de eje vertical, que ya se vieron en los vehículos submarinos desde 1776, en que Bushnell ideó su "Tortuga" y también el gran constructor sueco Nordesfeldt había intentado desde 1887 el navegar a una cota estable mediante el uso de dos hélices de eje vertical, controladas, como ya hemos dicho antes, por un aparato de su invención, sin que le acompañara el éxito, pero fue, precisamente, el genial inventor español el que concibió y construyó el más eficaz "aparato de profundidades", que actuando automáticamente sobre la marcha de las hélices verticales, consiguió que su barco descendiera a la profundidad deseada y se deslizara en ella sin ninguna oscilación.

En las pruebas de mar el submarino Peral dio en la superficie una velocidad máxima de ocho nudos y una autonomía de 132 millas, siendo su velocidad máxima en inmersión de cuatro nudos y debiendo destacarse que en las referidas pruebas no se pudieron hacer funcionar los motores eléctricos principales al 100 por 100 de la tensión disponible, como estaba previsto por su inventor y que con unos motores mejor fabricados se hubieran aumentado notablemente las velocidades máximas indicadas.

En el año 1888, el ingeniero naval francés Gustave Zedé, famoso proyectista de submarinos que llegó a ser Director de Construcciones Navales, puso a flote el pequeño submarino "Gymnote" de 30 toneladas métricas (figura 9), contemporáneo absoluto del "Peral", tanto en su botadura como en sus pruebas. Al igual que el submarino español, este buque disponía de propulsión eléctrica, pero ésta se llevaba a cabo mediante una sola hélice central movida por un motor eléctrico de 55 HP, en lugar de las dos hélices laterales de aquél.

La novedad más acusada de este primer prototipo de Zedé, desde el punto de vista del progreso de la navegación submarina, fue la introducción de timones horizontales en la proa del buque y la comprobación de que con ellos y los correspondientes timones de popa, había la posibilidad de gobernar sin el empleo de aparatos automáticos para mantener la profundidad. Hay que señalar, sin embargo, que las pruebas realizadas en la pequeña rada de Tolón, sobre una base de 1.200 metros y a una profundidad de sólo 2,5 metros, no tuvieron la brillantez de las inmersiones de Peral, pero fueron en cambio un campo magnífico de ensayos en relación con el uso simultáneo de timones horizontales en los extremos del buque.

Once años después de la botadura del "Peral", es decir, en el año 1899, el ingeniero naval francés Laubeuf lanzó al agua al submarino "Narval" de doble casco (figura 10), el cual representó, también, una de las más notables contribuciones al desarrollo de la navegación submarina. Tal buque vino a ser como el casco de un submarino primitivo encerrado dentro del forro de un buque torpedero, con lo cual tanto las condiciones marineras necesarias para la navegación como aquellas de resistencia a las grandes presiones bajo el mar, podían ser plenamente satisfechas; pero, además, al disponerse en estos submarinos los tanques de lastre entre los dos forros, resultaban éstos de gran capacidad, con lo cual la reserva de flotabilidad, factor importante para la seguridad del buque, venía a ser muy elevada (73 por 100).

La energía eléctrica almacenada en las baterías de acumuladores, que se había revelado a partir de Peral como el elemento ideal para propulsar a los buques bajo el agua, presentaba aún en 1899 una severa limitación, por la reducida capacidad que proporcionaba para intentar largas navegaciones, pero también este problema fue resuelto por Laubeuf en su primer prototipo. En efecto, con el "Narval" se había abandonado la propulsión única y se generalizaba el uso de la propulsión mixta, disponiendo este buque, para navegar en superficie, de una caldera de petróleo y de una máquina de vapor de 250 HP acoplada al eje de la hélice y para navegar en inmersión, de un motor eléctrico alimentado por una batería de acumuladores, pero es que, además, cuando el buque estaba en la superficie su máquina de vapor podía accionar el motor eléctrico, que actuando en tales

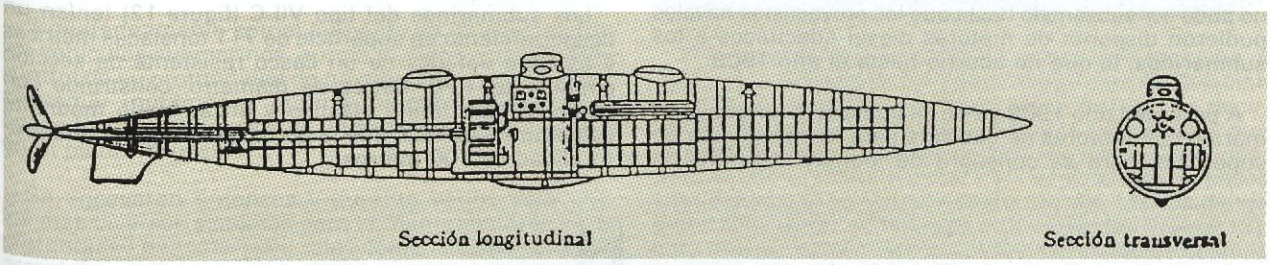


Fig. 9.—El submarino "Gymnote", proyectado por el ingeniero francés Gustave Zeddé y botado en el año 1888. Fue un submarino de propulsión eléctrica, cuyas pruebas realizadas en la pequeña rada de Tolón no tuvieron la brillantez de las inmersiones del "Peral", pero constituyeron un magnífico campo de ensayo en relación con la efectividad de los timones horizontales en el gobierno en profundidad.

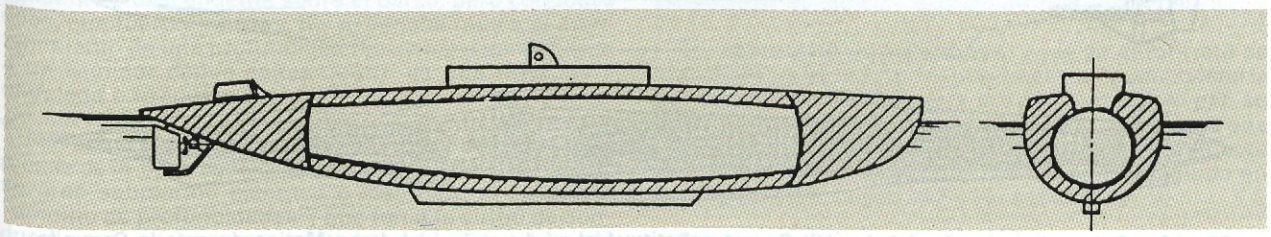


Fig. 10.—El submarino "Narval", con doble casco, propulsión en superficie de vapor de agua y eléctrica en inmersión, proyectado por el ingeniero naval francés Laubeuf en 1899, que representó una de las más notables contribuciones al desarrollo de la navegación submarina, logrando obtener lo que se dio en llamar el "submarino autónomo".

momentos como dinamo recargaba la batería, quedando con ello listo para una nueva inmersión, y habiéndose logrado lo que se dio en llamar el "submarino autónomo", por la independencia lograda con respecto a las estaciones eléctricas de carga en tierra.

El "Narval", que desplazaba 200 toneladas métricas bajo el agua, consiguió en las pruebas una velocidad máxima en superficie de 10 nudos y de 6,5 nudos en inmersión, siendo su autonomía en superficie de 500 millas a 6,5 nudos.

En el año 1900, John Phillips Holland, célebre inventor norteamericano dedicado desde el año 1875, nada menos, al proyecto y construcción de submarinos, terminó de fabricar su prototipo número nueve. Dicho prototipo (figura 11), del que se construyeron seis unidades con destino a la Marina de los EE.UU., fue considerado en su día como "el primer submarino eficaz y moderno de la Historia", hasta tal punto que varias Marinas europeas inspiraron en él sus primeras unidades militares. Tal buque era de casco único, de sección circular y teniendo los tanques de lastre en el doble fondo. Su reserva de flotabilidad era solamente de un 13 por 100 y el gobierno del buque en profundidad se llevaba a cabo mediante timones horizontales situados en proa y popa.

La planta propulsora estaba formada por un motor de gasolina de 160 HP, que le proporcionaba un andar de siete nudos en superficie, y por un motor eléctrico de 70 HP, alimentado por una batería de acumuladores, que le proporcionaba en inmersión una velocidad de seis nudos.

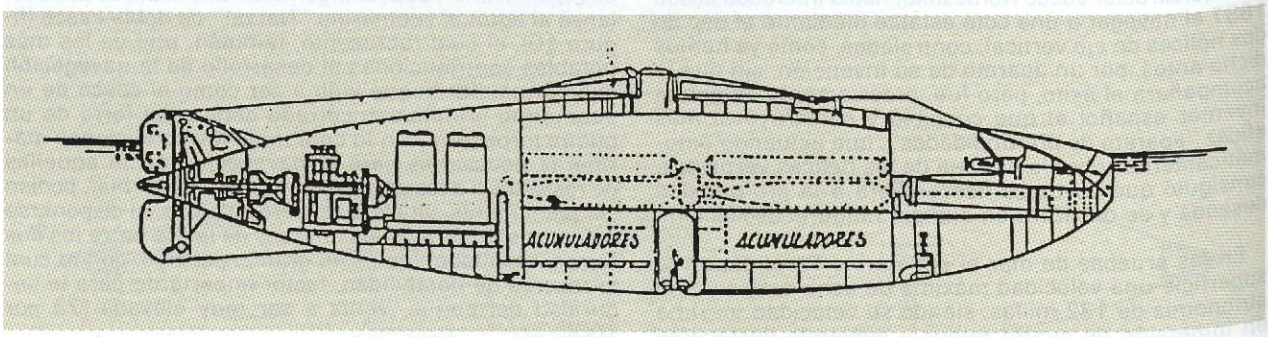


Fig. 11.—El prototipo número 9 del célebre constructor norteamericano John Phillips Holland, aceptado por la Marina de EE.UU. en el año 1900 como modelo de su primera serie de submarinos, por haberse considerado como el primer submarino militar eficaz de la Historia. Su propulsión era mixta de gasolina y eléctrica.

Las prestaciones de este buque eran de mucho interés militar, pues su autonomía en superficie llegaba a las 1.500 millas y podía navegar en inmersión tres horas seguidas con una velocidad de seis nudos, al mismo tiempo que descender hasta una profunidad de 40 metros.

No obstante, estos "modernos" submarinos de aquella época tenían todavía un severo inconveniente, la peligrosidad de sus motores de gasolina, cuyo combustible desprendía gases tan inflamables que en pocos años se registraron hasta doce accidentes muy graves en diversas Marinas de Guerra, pero este tremendo inconveniente no pudo ser subsanado hasta que los proyectistas navales pudieron disponer de motores diesel adecuados a los submarinos, lo que no ocurrió hasta el año 1909.

A partir del año 1909 ya no se construyó ningún submarino con motores de gasolina para la navegación en superficie, pero se consagró de manera definitiva la propulsión eléctrica como el medio idóneo para la navegación submarina, siguiéndose con ello el claro camino marcado por Isaac Peral en 1890.

Cerramos, finalmente, la Tabla de buques seleccionados con las características y prestaciones de los submarinos alemanes del tipo VII-C, uno de los más eficaces de su Marina durante la Segunda Guerra Mundial, para que tales magnitudes puedan ser comparadas con las de cada uno de los prototipos que acabamos de considerar, que marcaron, con toda probabilidad, los jalones más importantes del desarrollo de la navegación submarina.

Los submarinos del tipo VII-C (figura 12) tenían un desplazamiento en superficie de 711 toneladas métricas y estaban dotados de un casco resistente de sección circular de 4,70 metros de diámetro, construido con acero de alto límite elástico y ensamblado mediante soldadura eléctrica, que le permitía navegar a una profundidad de 100 metros.

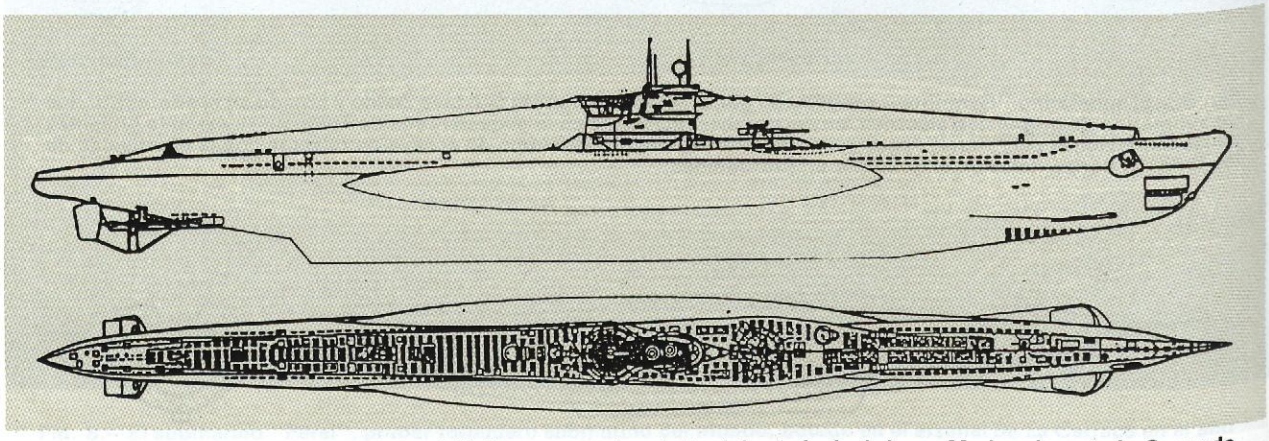


Fig. 12.—Submarino alemán del tipo VII-C, que constituyó el núcleo principal de su Marina durante la Segunda Guerra Mundial. Estaba provisto de propulsión Diesel en superficie y eléctrica en inmersión y portaba cuatro tubos lanzatorpedos en proa y uno en popa.

Su autonomía en superficie alcanzaba las 9.000 millas y aquélla en inmersión las 90 millas. Su velocidad máxima en superficie era de 18 nudos y la correspondiente en inmersión era sólo de ocho nudos.

* * * *

Una vez descritas las 12 unidades de la Tabla panorámica que acabamos de presentar, cuyo objetivo, repetimos, es el de proporcionar una ideal global, pero rigurosa, de los avances conseguidos a lo largo de la Historia en el campo de la navegación subacuática, son muchas las consideraciones de interés que pueden deducirse de la misma.

Indudablemente, los primeros intentos de navegación submarina fueron hechos con artilugios de madera, más interesados en descender verticalmente bajo el agua que en proporcionar movimientos dentro de ella. Luego los movimientos de los vehículos submarinos mejoraron en la pequeña medida en que el hombre aprendió a multiplicar el esfuerzo de su brazo mediante sencillos mecanismos, llegándose a realizar, de este modo, cortos recorridos que no podían calificarse de navegaciones.

Se aplicó después la maquinaria de vapor, recién descubierta, a la propulsión submarina, accionándose mediante ella las hélices propulsoras de los buques con mucha mayor potencia que lo habían hecho el brazo humano, siendo precisamente en esta época cuando el inventor español Monturiol proyectó y construyó una instalación de vapor para su segundo submarino, ayudado por su futuro yerno, el ingeniero industrial José Pascual Deop, instalación que no solamente estaba adaptada a las condiciones y dimensiones del submarino, sino que su caldera de vapor, que funcionaba con carbón durante la navegación en superficie, era también capaz de seguir suministrando vapor durante la navegación subacuática.

En efecto, cuando el "Ictineo II" de Monturiol iba a sumergirse se apagaba la caldera, se abatía la chimenea y se obturaba herméticamente la comunicación de los hogares con el exterior. En unos tubos suplementarios de la caldera se introducían entonces cartuchos con una composición química especial, que desarrollaba calor y producía oxígeno. El calor vaporizaba el agua de la caldera y el oxígeno se almacenaba para regenerar el aire interior del submarino y sostener el alumbrado.

Simultáneamente con el aumento de la velocidad de los vehículos submarinos, surgió el difícil problema del control de su profundidad de navegación, tratándose de conseguir inútilmente, durante muchos años, que el buque tuviera una trayectoria un mínimo regular y estable en el plano vertical.

Se ensayaron entonces y durante varios decenios, los más diversos sistemas para el mantenimiento de la profundidad de inmersión, tales como la disposición de grandes émbolos emergiendo del costado de los buques y con los cuales se variaba el volumen del agua desalojada, el ingenioso sistema de la "vejiga natatoria" del español Narciso Monturiol, o la instalación de hélices de eje vertical, para producir con ellas una tracción ascendente o descendente sobre el barco; pero con todos ellos, que fueron muchos, no se llegaba nunca al mantenimiento de una profundidad fija, como decimos, sino a un caminar dando saltos dentro de una trayectoria ondulada e irregular.

Fue en tal época y tales circunstancias, según se desprende de la Tabla confeccionada, cuando Peral construyó su gran submarino eléctrico o ideó para él su genial "aparato de profundidades", que tenía la virtud de conducirle automáticamente hasta la profundidad deseada y mantenerle en ella con una trayectoria impecable y sin oscilaciones, es decir, resolviendo por primera vez en la Historia el difícil problema de navegar bajo el agua con seguridad, comodidad y absoluto automatismo.

Algunos años después de Peral y coincidiendo precisamente con un mayor aumento de la velocidad de los vehículos submarinos, se llegó a comprobar la efectividad de unos timones horizontales bien emplazados sobre el gobierno en profundidad de los buques y con ello iban a resultar totalmente innecesarios en el futuro toda clase de aparatos o sistemas para mantener una cota de inmersión, entre los cuales el ingenioso aparato ideado por Peral había sido el más perfecto y eficaz.

A partir del año 1893 la investigación a escala mundial puede decirse que se centra en la forma y colocación de los timones de profundidad. La eficacia real de los distintos tipos de timones y su emplazamiento más adecuado, sólo podía ser apreciada en los ensayos sucesivos de submarinos que la Historia ha ido produciendo, habiéndose llegado por este camino al empleo casi general de timones de profundidad en proa y popa simultáneamente y también a una idea clara de que los timones de popa sirven bien para mantener una cota determinada, dada la buena estabilidad de marcha que proporcionan y que los de proa deben utilizarse más bien para el cambio de profundidad, por su mayor eficacia en este fin.

El progreso de la navegación submarina llegó así, en un continuo discurrir, hasta alcanzar el perfeccionamiento de los buques alemanes de la Segunda Guerra Mundial, que se han tomado como base de comparación final en nuestra Tabla y de la que se desprende, entre otras cosas, que aquellos temidos submarinos germanos tenían en el año 1945 una velocidad máxima de inmersión de ocho nudos durante un período de una hora, no pasando, por tanto, de duplicar la marca de velocidad del prototipo de Peral en el año 1890, es decir, 55 años antes.

3. En qué forma navegaba el submarino "Peral" bajo el agua.

El submarino "Peral" realizaba siempre su navegación bajo el agua en condiciones de "inmersión forzada", sistema que había de proporcionarle una gran seguridad, ya que ante cualquier avería mecánica, o fallo de la corriente eléctrica, el buque tenía que subir automáticamente a la superficie por la sola acción de una ley física tan conocida como el Principio de Arquímedes.

Previamente a la inmersión, había que proceder a inundar sus tanques de lastre, hasta que la flotación del buque pasase por la base de la torreta, es decir, buscando una situación de poca fuerza ascensional, que se correspondía exactamente con el paso del agua desalojada por la citada torreta, y en tal situación de pesos bastaba sólo el poner en marcha las dos hélices de eje vertical, situadas en los extremos del buque (figura 13), para que la tracción vertical descendente de las mismas venciera la fuerza ascensional del barco y comenzara la inmersión; pero es que además el buque se sumergía automáticamente hasta la cota seleccionada en el aparato de control por su Comandante, sin más intervención humana posterior, pues para ello había concebido el proyectista su genial "aparato de profundidades".

El "aparato de profundidades", que su autor trató de mantener en el mayor secreto mientras pudo, bastaría por sí solo para calificar a su genio creador, por su enorme simplicidad y eficacia, debiendo destacarse que hasta entonces el mantenimiento estable de una cota de inmersión había sido un objetivo no conseguido en la práctica por ningún vehículo submarino.

Según el ilustre ingeniero y académico don José Echegaray, gran admirador de Peral, tal "aparato de profundidades" estaba constituido solamente por un barómetro

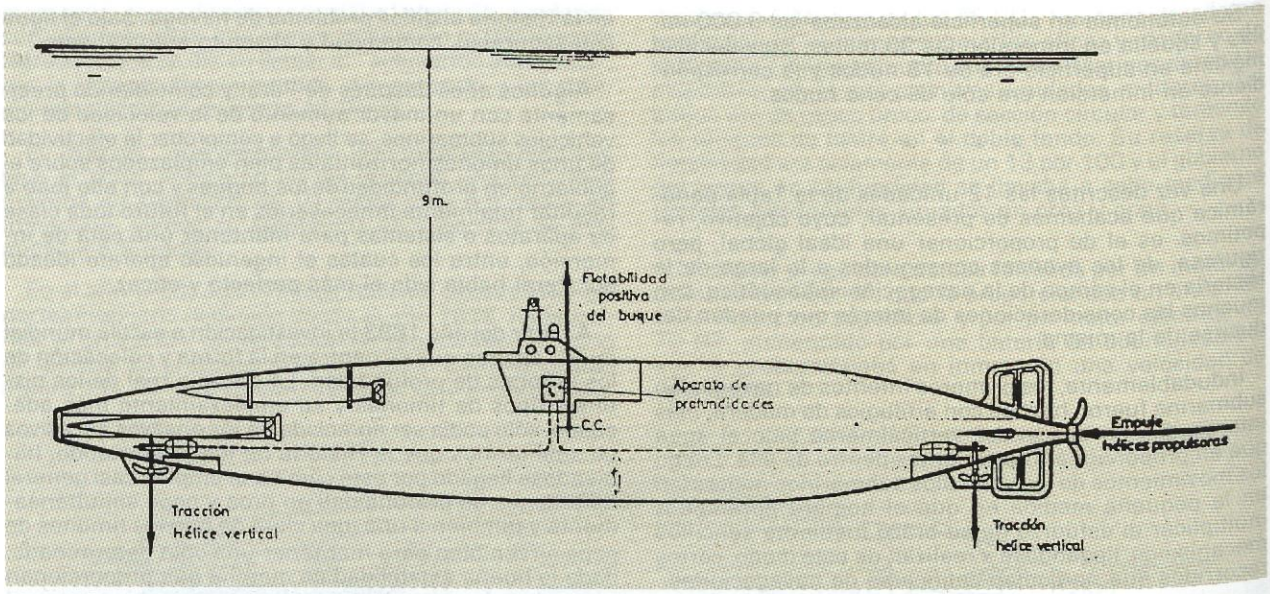


Fig. 13.—El submarino "Peral" navegaba bajo el agua en condiciones de "inmersión forzada" y se sustentaba en forma similar a como lo hace en el aire un helicóptero de doble rotor, manteniendo automáticamente la profundidad deseada gracias a la eficacia con que el "aparato de profundidades", idea de su genial proyectista, actuaba sobre las hélices verticales.

hidroestático con aguja, un contacto que se fijaba en el número correspondiente a la profundidad deseada, una corriente auxiliar que se establecía al llegar la aguja a dicho contacto y un relé dando paso a una corriente eléctrica de diferente intensidad. ¡Nada más simple, ingenioso y efectivo, que este mecanismo de acción directa entre el sensor de la profundidad y los motores de las hélices verticales!

Si hoy quisiéramos comparar la forma de sustentación del submarino "Peral", con alguno de los vehículos de nuestros días, diríamos que el que lo hace de modo más similar es nada menos que el moderno helicóptero con doble rotor.

En efecto, tal helicóptero es una aeronave más pesada que el aire y que asciende en la atmósfera merced a la tracción de dos hélices de eje vertical y el referido submarino era un cuerpo menos pesado que el agua, que descendía en la misma merced a la tracción de otras dos hélices de eje vertical, así que pudiéramos decir que se trata de dos vehículos de comportamiento simétrico con respecto al plano de la superficie del mar.

Y llegados a este punto, es preciso denunciar la forma lamentabilísima en que con frecuencia se describe la historia del submarino "Peral", pues, por ejemplo, una enciclopedia muy difundida como la gran Larousse Universal dice simplemente en su tomo 19, con el más absoluto desprecio a los grandes logros conseguidos:

> "En 1888 se botó en Cádiz el "Peral", primer submarino de marcha completamente eléctrica, que fue abandonado porque mantenía mal la inmersión."

Menos mal que en el tomo 16 de la misma enciclopedia se vierte otra enormidad de signo contrario, atribuyéndosele al "Peral" una velocidad en inmersión de nada menos que 21 nudos, valor que está aún lejos de alcanzarse por los más modernos submarinos de nuestra Marina de Guerra.

4. Sobre la notable contribución de Isaac Peral al desarrollo del submarino militar.

Hemos visto, hasta ahora, cómo Isaac Peral ascendió con su primer y único prototipo y gracias a su enorme genio creador, varios de los escalones más importantes del desarrollo mundial de la navegación submarina, consiguiendo por vez primera en la Historia el deslizarse bajo la superficie del agua a una velocidad apreciable (cuatro nudos), durante un espacio de tiempo considerable (una hora) y en la dirección y profundidad deseada (nueve metros) y todo ello mediante la utilización de equipos y sistemas totalmente originales, que le daban tal estabilidad de ruta submarina, que hacían innecesaria la utilización de los pequeños timones horizontales, de que también disponía el buque en su popa.

Con ser tan brillantes los logros conseguidos en el desarrollo de la hasta entonces incipiente navegación bajo el agua, el objetivo buscado por Isaac Peral con su prototipo era aún más ambicioso, ya que perseguía la creación de un nuevo tipo de barco de guerra, el "torpedero submarino", que debía de superar en eficacia al "torpedero de superficie" en la misión de defensa de costas y puertos, contra la acción de los grandes buques enemigos.

Pero antes de examinar los logros conseguidos por nuestro inventor en el desarrollo del submarino militar, que como veremos fueron también espectaculares, merece la pena el considerar el aspecto humano del proceso que dio origen en 1884 a seis años fructíferos de estudios, investigaciones, ensayos y trabajos en el campo de ingeniería naval, de un teniente de navío profesor de la Escuela de Estudios Superiores de la Marina Española.

Cuando surgió el conflicto del archipiélago de las Carolinas, con motivo de las aspiraciones alemanas sobre una de sus islas, Peral se presentó en el Observatorio Astronómico de la Marina de San Fernando y, pálido y nervioso, se dirigió al grupo de grandes científicos que allí trabajan, en los siguientes términos:

> "Señores, en estos momentos un deber de conciencia me obliga a revelar que creo haber resuelto el problema de la navegación submarina."

Como la modestia de Peral, en aquel entonces, era extremada, todos los presentes se quedaron sorprendidos y silenciosos y don Cecilio Pujazón, Director del Observatorio, le preguntó al fin:

—"¿Cree usted haberlo resuelto?
—Sí, señor.
—¿Cuándo?
—Desde hace un año; pero no me atreví a decirlo. Ahora lo juzgo una obligación, por el interés militar que puede tener para España.
—¿Y qué desea usted de nosotros?
—Deseo someter a examen mis cálculos y sólo cuando los apruebe el voto unánime de ustedes me atreveré a dirigirme al Gobierno."

Comenzaron entonces una serie de reuniones secretas, en las que el eminente sabio Pujazón, el profundo matemático Azcárate, el extraordinario calculista Viniegra y el insigne analítico García Villar, discutieron todas y cada una de las tesis de Peral, que éste sostuvo siempre victorioso, de tal manera que cuando meses más tarde el Ministro de Marina solicitó informe del Observatorio, su contestación tuvo lugar en los siguientes términos:

"Este Centro opina que el proyecto del señor Peral no tiene un solo punto vulnerable. Científicamente el problema está resuelto por él."

Una vez que ha sido expuesta la grandiosa sencillez con que inició sus primeros pasos el genial proyecto de torpedero submarino, elaborado por Peral durante muchas horas de cálculo y vigilia, es el momento de examinar los logros conseguidos por su inventor en el aspecto puramente militar, recurriendo de nuevo al método de contemplar sobre una misma Tabla, y por orden cronológico, los buques que representaron un avance en la evolución del armamento submarino.

Tabla II

EVOLUCION DEL ARMAMENTO DEL SUBMARINO MILITAR

Año	Nombre del buque y del proyectista	Armamento submarino instalado	Prestaciones militares del buque
1776	Turtle (David Bushnell)	Su arma de combate era una mina de 70 kilogramos, con aparato de relojería, que se fijaba al fondo del buque enemigo desde el interior del vehículo submarino.	Podía desplazarse lentísimamente y a escasa profundidad durante media hora, con lo que no podía alcanzar objetivos a más distancia de 250 metros del punto en que hubiese sido remolcado. Atacó sin éxito al navío inglés "Eagle" de 64 cañones por el fallo del sistema de fijación del explosivo a la obra viva del buque.
1801	Nautilus (Rober Fulton)	Mina provista de arpón para engancharlo al buque enemigo. Su explosión se provocaba mediante una llave de fuego manejada por un cordel desde el submarino.	Su velocidad era escasísima y sus condiciones maniobreras en inmersión pésimas. El máximo recorrido que realizó bajo el agua durante las pruebas fue de 450 metros y en el puerto de Brest consiguió hacer volar un buque preparado al efecto.
1863	Le Plongeur (Burgeois)	Su arma era el torpedo de botalón, es decir, una mina colocada en el extremo de una larga percha dispuesta en la proa del buque.	Si este buque hubiera llegado a ser operativo hubiera seguido la misma suerte que los torpederos de superficie armados de botalón, que muchas veces volaron por los aires simultáneamente con el buque atacado.
1864	Ictineo II (Narciso Monturiol)	El único armamento que se montó en este submarino fue un cañón corto de alma lisa de 10 centímetros. La instalación se hizo de tal forma que pudiera ser cargado desde el interior del submarino cuando estaba sumergido.	Durante las pruebas se efectuaron 30 disparos con el cañón desde una profundidad de siete metros, no dando resultados efectivos, lo que unido a una velocidad en superficie de sólo un par de nudos y a una velocidad de inmersión inferior al nudo, proporcionaban al buque unas prestaciones militares casi nulas.
1887	Porpoise (Waddington)	Llevaba dos torpedos automóviles suspendidos fuera del casco. La suspensión se hacía por medio de garfios que podían ser abiertos desde el interior del submarino, quedando libres los torpedos al mismo tiempo que se ponía en marcha su propulsión.	En las pruebas realizó esta embarcación inmersiones de cierta duración, con velocidad próxima a los cinco nudos.
1888	Peral (Isaac Peral)	El primer submarino portador de un tubo lanzatorpedos en la proa, con tapas estancas en los extremos que permitían recargarlo desde el interior del buque, adelantándose con esta idea en varios años a Nordenfeldt. El cargo militar de este submarino estaba constituido por tres torpedos Schwartzkoppf de 356 m/m.	El lanzamiento de los torpedos se llevaba a cabo con gran facilidad y precisión, siendo necesario que el buque asomase su torrecilla óptica por encima del agua para apuntar al blanco y graduar el torpedo, pues la citada torrecilla era un verdadero periscopio de reflexión. Su velocidad en inmersión al régimen de 1/2 baterías fue de cuatro nudos, pero como su autonomía en superficie era sólo de 132 millas a seis nudos de velocidad, ésta se consideraba insuficiente para la defensa de costas y puertos por la Marina española de aquella época.
1888	Gymnote (Gustave Zedé)	Iba armado con dos torpedos automóviles instalados exteriormente al casco del submarino, uno a cada lado de la torreta.	La velocidad máxima en superficie fue de siete nudos y la correspondiente en inmersión de 4,3 nudos. Con la experiencia adquirida con este prototipo, que tenía malas condiciones marineras en superficie y difícil gobernabilidad en inmersión, se construyó cinco años después en Francia el "Gustave Zedé" de 274 Tm., con sustanciales mejoras.

Año	Nombre del buque y del proyectista	Armamento submarino instalado	Prestaciones militares del buque
1889	Prototipo n.° 3 de Nordenfeldt (Encargo de Rusia)	Iba armado con dos tubos lanzatorpedos interiores al casco o instalados en su proa, siguiendo en todo la idea original de Isaac Peral.	En sus pruebas de inmersión llegó a recorrer bajo el agua una distancia de 20 millas a una velocidad de cinco nudos, aunque su falta de estabilidad sumergido era muy grande.
1899	Narval (Laubeuf)	Iba armado con cuatro torpedos automóviles trincados sobre la cubierta del submarino, los cuales se destrincaban y ponían en marcha mediante un dispositivo accionado desde el interior del buque.	Desde el punto de vista de la navegación submarina este buque constituyó un notable éxito, pero militarmente fue un fracaso, no sólo por la forma de utilizar los torpedos, sino también por el excesivo tiempo de la maniobra de inmersión. La velocidad máxima en superficie fue de 10 nudos y la correspondiente en inmersión de 6,5 nudos. Su autonomía en superficie era de 500 millas a 6,5 nudos.
1900	Holland n.° 9 (John P. Holland)	Iba armado con dos tubos lanzatorpedos dispuestos en la proa en montaje gemelo y portaba cuatro torpedos automóviles de 457 m./m.	Pertenecían a este prototipo la primera serie de submarinos construida para la Marina de los EE.UU., tomándolo también como modelo, posteriormente, las Marinas de varios países europeos. Su autonomía en superficie era de 1.500 millas a siete nudos de velocidad y su velocidad máxima en inmersión de seis nudos.
1941	Submarinos alemanes del tipo VII-C (Astilleros de Kiel, Empresa Krupp)	Iban armados con cuatro tubos lanzatorpedos instalados en proa y uno instalado en popa. Llevaban una dotación de 12 torpedos de 533 m./m.	El protagonismo de estos buques durante la Segunda Guerra Mundial fue tremendo, ya que estuvieron, entre otras cosas, a punto de ganar la llamada "batalla del Atlántico" y cortar el envío de los suministros norteamericanos a Europa, lo que hubiera significado la derrota de los países aliados. Hundieron durante los años de la contienda 2.840 buques mercantes de los países aliados con 14.500.000 TRB y además 150 buques de guerra, perdiéndose por parte de Alemania 753 submarinos. Su autonomía en superficie era de 9.000 millas y aquélla en inmersión de 90, y su velocidad máxima bajo el agua de ocho nudos durante una hora.
1954	Nautilus (Construido para la Marina de EE.UU. en los Astilleros de la Electric Boat de Groton)	Primer submarino del mundo con propulsión nuclear. Va armado con seis tubos lanzatorpedos instalados en proa para torpedos de 533 m./m.	Autonomía, el mundo, ya que un kilo de su combustible nuclear equivale a 3.000.000 de kilos del mejor carbón. Entre las hazañas de este submarino se incluye el haber pasado del Océano Atlántico al Pacífico bajo la capa de hielo del Océano Artico, cruzando el Polo Norte geográfico el 3 de agosto de 1958. Este submarino, con 4.040 Tm. de desplazamiento en inmersión, tiene una velocidad en superficie de 18 nudos y una velocidad continuada bajo el agua de 30 nudos.
1959	George Washington (Construido para la Marina de EE.UU. en los Astilleros de la Electric Boat de Groton)	Primer submarino del mundo armado con misiles balísticos intercontinentales. Va armado de 16 tubos para el lanzamiento de misiles Polaris y de seis tubos lanzatorpedos instalados en proa para torpedos de 533 m./m.	Dotado de propulsión nuclear permaneció sumergido durante su viaje inicial 66 días. Con un desplazamiento de 6.700 Tm. en inmersión, tiene una velocidad en superficie de 20 nudos y de 30 nudos bajo el agua, pudiendo lanzar todos sus proyectiles sumergido.

Apreciamos, de este modo, en la nueva Tabla panorámica (Tabla II), que el pequeño vehículo "Turtle" (figura 1), ideado por Bushnell en 1776 y propulsado manualmente, portaba exteriormente al casco una fuerte carga explosiva, que su piloto había de tratar de adherir al fondo del buque enemigo; pero como su desplazamiento era lentísimo y no podía alcanzar objetivos a más distancia de unos 300 metros del punto en que hubiese sido remolcado, sus prestaciones militares eran escasísimas.

El pequeño submarino "Nautilus", proyectado por Robert Fulton en 1801 (figura 2) y propulsado también manualmente, portaba exteriormente a su casco una mina provista de arpón, el cual había que tratar de engancharlo al buque enemigo, pero como su velocidad era reducidísima y sus condiciones maniobreras en inmersión malas, su valor militar resultaba casi nulo.

El submarino de grandes dimensiones "Le Plongeur" (figura 3), proyectado en 1863 por Burgeois, portaba en su extremo de proa un torpedo de botalón, a semejanza de los torpederos semisumergibles americanos "David" de su época. Tal torpedo de botalón era una mina colocada en el extremo de una larga percha, que al chocar con el buque enemigo debía producir su explosión, siendo probable que si este submarino hubiese llegado a ser operativo y entrado en acción, hubiera volado simultáneamente con el buque atacado, como le aconteció al primer torpedero semisumergible "David" utilizado por los Confederados en la Guerra de Sucesión de los EE.UU. el 5 de octubre de 1863.

Con respecto al submarino "Ictineo II", proyectado por Narciso Monturiol en 1864 y que en muchos aspectos de la navegación submarina había representado, como ya hemos visto antes, un enorme progreso para su tiempo, en lo referente al armamento llegó a montar un cañón corto de alma lisa de 10 centímetros, instalado en forma que pudiese ser cargado y disparado desde el

interior del buque (figura 14), realizando ensayos que en aquellos momentos no contaban con antecedente alguno en la Historia.

El pequeño submarino de propulsión eléctrica "Porpoise" (figura 7), construido por Waddington en 1887, llevaba suspendidos fuera del casco dos torpedos auto-

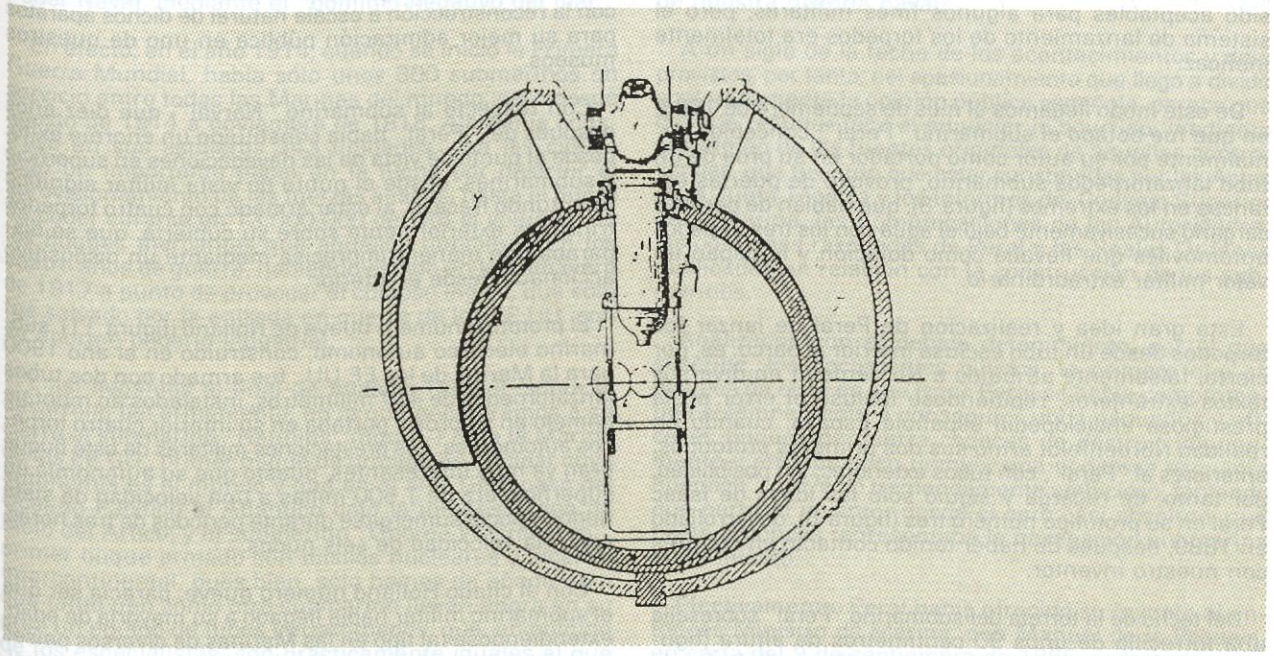


Fig. 14.—Sección por el cañón del submarino "Ictineo II" de Monturiol. Se aprecia el cañón instalado entre los dos forros del buque, así como su sistema de carga desde el interior del barco.

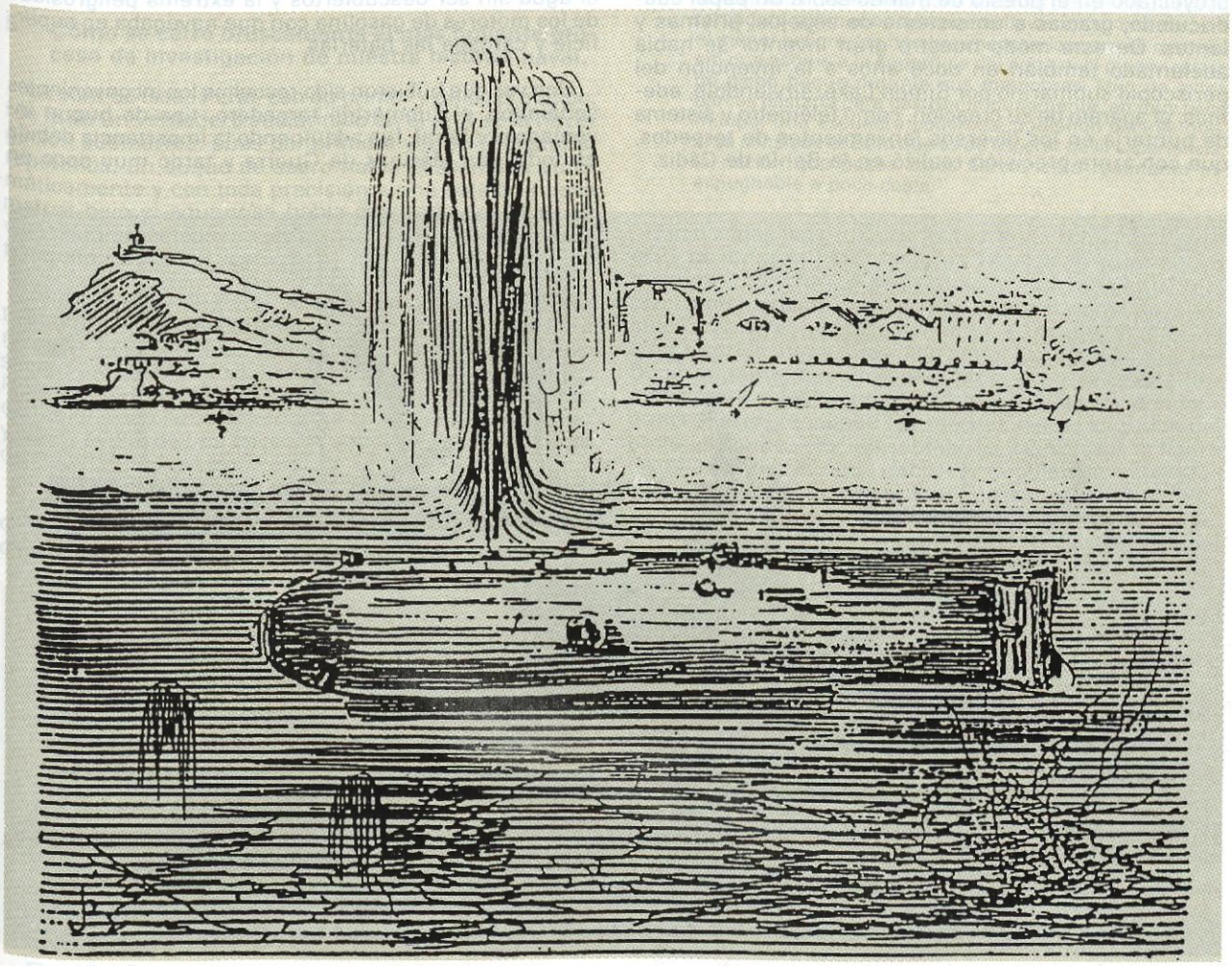


Fig. 15.—El "Ictineo II" de Monturiol disparando su cañón desde siete metros de profundidad, en las pruebas celebradas el 22 de diciembre de 1865 frente al puerto de Barcelona.

móviles, dispuestos en forma que pudiesen dejarse libres y ser arrancados sus motores desde el interior del submarino. La velocidad y la autonomía de este pequeño prototipo, tripulado sólo por dos hombres, podrían haber sido aceptables para algunos fines militares, pero el sistema de lanzamiento de los torpedos era totalmente ineficaz.

De este modo llegamos al mes de septiembre de 1888, en que fue botado el submarino "Peral", concebido genialmente por su autor como portador en su proa de un tubo lanzatorpedos submarino, provisto de puertas estancas en los extremos (figura 8), que habían de permitir cargarlo sucesivamente bajo el agua con los tres torpedos automóviles que llevaba como dotación y le daban un valor militar extraordinario.

Esta gran idea y realización de Peral de lanzar los torpedos desde un tubo esclusa interior al barco, es, por cierto, falsamente atribuida a Nordenfeldt en diversos textos extranjeros, repitiéndose incluso el error en la prestigiosa enciclopedia española Espasa, cuando en realidad Nordenfeldt armó sus dos primeros prototipos, anteriores al "Peral", con tubos exteriores, sin posibilidad, por tanto, de recarga y siguió sólo las ideas de Isaac Peral en su prototipo número tres (figura 6), desarrollado en 1889, después de haber tenido contacto en Londres con nuestro inventor.

Del techo de la torreta del submarino "Peral" sobresalía una torrecilla de unos 90 centímetros de altura (figura 16), conteniendo en su interior un "aparato óptico de visión indirecta", concebido por Isaac Peral para que el Comandante del buque pudiera ver el panorama exterior proyectado en el puesto de mando sobre un papel cuadriculado, gracias a un sistema de espejos, prismas y lentes. De este modo nuestro gran inventor se había adelantado también en doce años a la invención del periscopio submarino por Simon Lake, sirviéndole, además, el aparato de su creación, como telémetro y sistema de puntería en los diversos lanzamientos de torpedos, que con tanta precisión realizó en la Bahía de Cádiz.

El contemplar los planos de la torrecilla y de su sistema óptico, así como los planos del aparato de profundidades, en poder del Archivo Histórico Nacional, proporciona hoy día un placer singular, que debiera complementarse con la reconstrucción a escala natural de dichos aparatos para su mejor admiración pública en uno de nuestros museos.

Con respecto al submarino "Narval", que diez años después del "Peral" había constituido un enorme éxito, desde el punto de vista de las navegaciones en superficie y submarinas, desde el punto de vista militar significó un rotundo fracaso, al estar armado con cuatro torpedos trincados exteriormente sobre su cubierta, que se disparaban de manera imprecisa mediante un dispositivo accionado desde el interior.

El prototipo número nueve de Holland (figura 11), submarino eléctrico autónomo, construido en el año 1900 para la Marina de los EE.UU., fue armado con dos tubos lanzatorpedos de 457 milímetros, instalados en montaje gemelo en su proa y portaba en su interior cuatro torpedos automóviles. Las prestaciones militares de este buque eran ya muy interesantes, puesto que su autonomía en superficie era de 1.500 millas a una velocidad de siete nudos y podía sumergirse durante períodos de tres horas, con una velocidad de seis nudos.

Con el citado Holland número nueve, parecía ser que el submarino militar había llegado a su mayoría de edad, extendiéndose tal tipo en las Marinas de diversos países europeos; sin embargo, el buque submarino, en general, contaba todavía con dos graves inconvenientes, la falta de largos y finos periscopios, para poder observar bajo el agua sin ser descubiertos y la extrema peligrosidad de los motores de gasolina con que navegaba en superficie y cargaba las baterías.

Una vez que hubieron sido resueltos los inconvenientes señalados, el submarino torpedero, tipo de buque inventado por Peral, fue adquiriendo la importancia debida en todas las Marinas de Guerra y tardó muy poco en

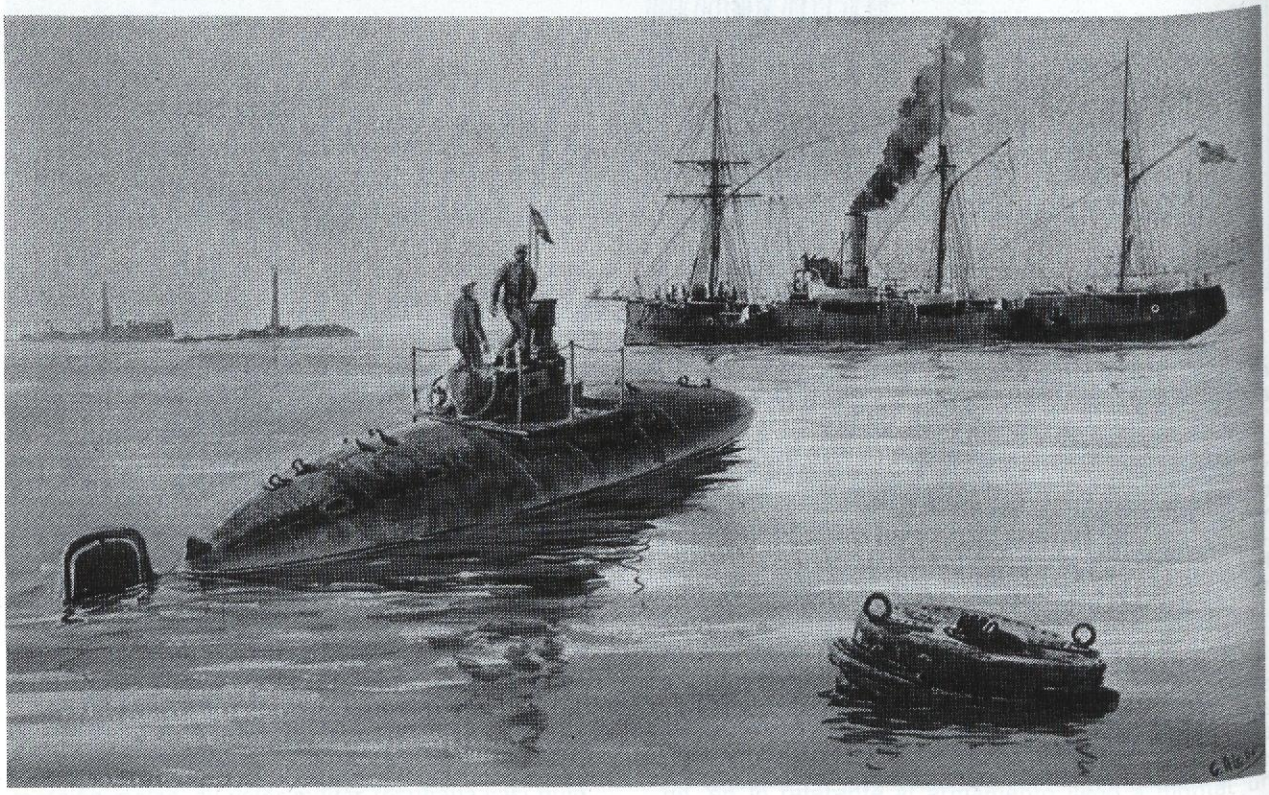


Fig. 16.—El submarino "Peral" frente al crucero "Colón", construido también en el arsenal militar de La Carraca, según una bonita acuarela de González Aledo.

tener un tremendo protagonismo, tal y como había sido previsto por nuestro insigne marino e inventor, llegando incluso a reservarse una parcela muy importante del Poder Naval, mediante el "dominio negativo del mar".

En efecto, en el año 1914, cuando se inició la Primera Guerra Mundial, había sólo unos 300 submarinos en servicio entre todas las Marinas del mundo; pero desde agosto de 1914 a noviembre de 1918, Alemania construyó en sus astilleros 343 unidades, con las cuales jugó un importante papel en la lucha por destruir el aprovisionamiento de las fuerzas aliadas, hasta el punto de poder cifrarse en 13.000.000 de TRB el volumen de los buques mercantes que aquéllas hundieron en los cuatro años de guerra, habiendo estado en la primavera de 1917 a punto de provocar el colapso inglés, que sólo fue salvado por la entrada en guerra de los EE.UU. con su enorme poderío industrial.

Y así llegamos al final de nuestra Tabla II, sobre el desarrollo del armamento, en la que encontramos a su cierre al submarino "Nautilus" (figura 17) de la Marina de los EE.UU., primer buque de propulsión nuclear cuya autonomía es el mundo y que en el año 1958 pasó del Océano Pacífico al Atlántico bajo la inmensa capa de hielo del Artico, y al submarino "George Washington", primer buque armado con misiles nucleares y alcance intercontinental, pues bien, sólo hemos de añadir aquí que tanto uno como otro submarino llevan ahora en su proa un equipo de tubos lanzatorpedos, que, en opinión de los especialistas, son prácticamente iguales al que ideara Peral en 1885, con excepción de las mejoras que la actual tecnología les ha aportado.

5. Cómo se cerró bruscamente el más brillante proceso de investigación de nuestra historia naval.

La obra de Isaac Peral, con su primer y único prototipo, fue la de un verdadero adelantado en el arte de la navegación submarina, pues por primera vez en la Historia, repetimos, un buque de acero había descendido automáticamente y con toda precisión a una cota de nueve metros bajo el agua y se había deslizado por ella con velocidad apreciable y comodidad insospechada, manteniendo un rumbo prefijado.

Pero el buque de Peral, además de consagrar definitivamente la propulsión eléctrica como medio ideal para navegar bajo el agua, había sido el primer torpedero submarino del mundo, lanzando con precisión y facilidad los torpedos automóviles, cuando estaba sumergido, mediante un tubo lanzatorpedos de su exclusiva invención y con la ayuda de una torrecilla óptica de visión indirecta concebida también por Peral.

¡Cómo con todas estas características podía alguien dejar de calificar de singulares y prodigiosos los avances conseguidos por Peral con su primer prototipo!

Cabe entonces el preguntarse, con toda razón. ¿Por qué se cerró de una manera tan brusca lo que hubiera sido, sin duda, el más brillante proceso de investigación de nuestra historia naval?

A un siglo de la fecha de los acontecimientos y desprovistos, por tanto, del apasionamiento que llegó a dividir acaloradamente la opinión pública española, parece que debería resultar fácil el enjuiciar lo ocurrido, mediante el examen de las fuentes originales de aquellas controversias, que tuvieron que estar constituidas por las Actas de la Junta Técnica y los Informes del Consejo Superior de la Marina, las Comunicaciones de las Autoridades, las opiniones razonadas de Peral y las Reales Ordenes publicadas en relación con la construcción de los submarinos.

Analizados con el debido detenimiento, por el que suscribe, los documentos citados, lo primero que se destaca de ellos es que Isaac Peral se había comprometido solemnemente a conseguir "unos pequeños y eficaces buques de guerra capaces de destruir impunemente y en muy poco tiempo, una poderosa escuadra enemiga", proyecto tremendamente ambicioso, teniendo que partir el inventor desde el cero casi absoluto, que hasta entonces representaba la navegación submarina en el mundo.

Efectivamente, Peral había ofrecido su invento al entonces Ministro de Marina, don Manuel de la Pezuela, en carta del 9 de septiembre de 1885, redactada en la siguiente forma:

> "En estos últimos días he inventado y tengo hechos todos los cálculos necesarios para la construcción de un barco torpedero submarino que puede llevar en su interior, sin el menor peligro, los hombres necesarios para su manejo, sin que asome a la superficie del agua ni el menor rastro de dicho buque durante sus maniobras. Uno de estos barcos bastaría para destruir impunemente, en muy poco tiempo, una escuadra poderosa; pudiendo decirse que, si se consigue el éxito que es de esperar de la experiencia, la nación que posea estos barcos será realmente inexpugnable a poca costa."

Finalizadas las pruebas de mar en la Bahía de Cádiz, el 21 de junio de 1890, la Junta Técnica de Marina tuvo que emitir el informe de evaluación del submarino y lo hizo, a mi modesto parecer, con toda ponderación, aunque Peral no lo pensase así en un principio. El informe de la referida Junta, presidida por el Capitán General del Departamento, don Florencio Montojo, y de la que formaba parte el Inspector de Ingenieros Navales, don Fernando Berro, resaltaba los méritos extraordinarios del prototipo como vehículo submarino y ensalzaba la figura de su inventor; aunque hacía ver también las carencias con respecto al objetivo militar que se había pretendido. Le faltaba al buque velocidad para ir al encuentro del enemigo; su autonomía era más bien escasa, para el mismo fin; su condición de invisibilidad, fundamental

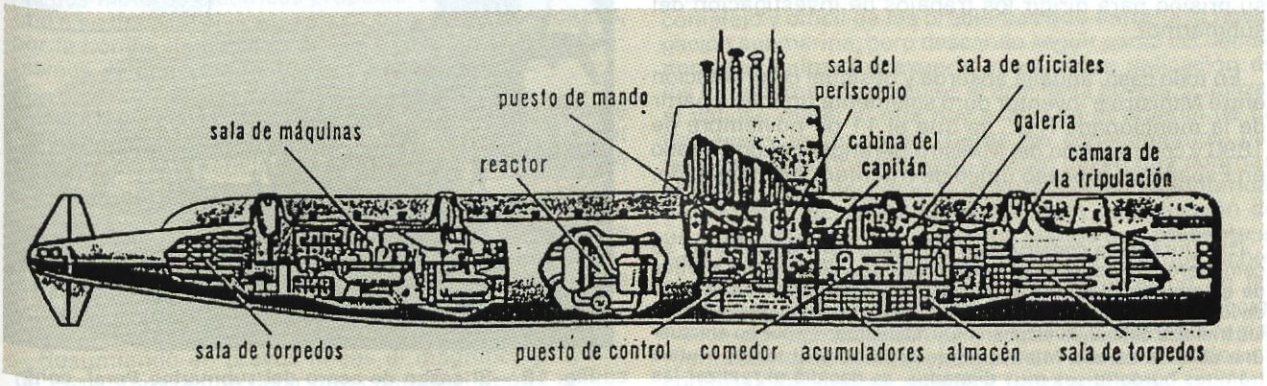


Fig. 17.—El submarino "Nautilus", de la Marina de los EE.UU., construido en el año 1954, con propulsión nuclear y cuya autonomía es el mundo, porta en su proa seis tubos lanzatorpedos submarinos de la misma concepción de los que ideara Peral en 1885.

para las acciones diurnas, era bastante relativa, por la poca altura de la torrecilla óptica, inventada por Peral como precursora del periscopio submarino.

Estaba, por tanto, muy claro para la citada Junta, que aquel prototipo de submarino, que navegaba bajo el agua mejor que ningún otro lo había hecho hasta entonces y disparaba los torpedos con extremada facilidad, no era aún suficientemente adecuado para las misiones que, en su opinión, debían encomendársele en una guerra naval y por ello concluía su informe recomendando la construcción de un segundo torpedero submarino, que reuniese las condiciones apetecibles, en aquel momento, para la defensa eficaz de costas.

Pocos días después el Consejo Superior de Marina, encabezado por el Ministro Beranger, redactó su propio informe, tergiversando en una gran parte las afirmaciones que, fundadas en principios científicos, hacía la Junta Técnica de Cádiz e incluyendo una absurda reprimenda al inventor por su presunta responsabilidad en los defectos de construcción del buque, pues le acusaba de "carencia de práctica para dirigir como ingeniero la construcción de un barco" (*).

Con tales antecedentes oficiales se redactó la Real Orden del 10 de octubre de 1890, firmada por la Reina Regente María Cristina, que contenía algo tan positivo y alentador como el encargo a Peral de un segundo prototipo de submarino, con los planos que él presentara y bajo su dirección, pero, ¡resulta increíble!, aquel histórico documento recogía íntegramente la reprimenda del Consejo Superior (Apéndice IV) y había sido redactada de forma tan villana que intentaba desproveer a Peral de toda su categoría como inventor, para adornarle solamente con los méritos de laboriosidad, patriotismo y experiencia adquirida, en atención a los cuales se le autorizaba a elaborar los planos de un segundo tipo de submarino.

A partir de aquel momento, es fácil imaginar lo que ocurrió entre un gran inventor resentido en su amor propio por la redacción desafortunada de la citada R.O. y queriendo a toda costa la dirección exclusiva de la obra, para llevarla a buen fin, y un Consejo Superior de la Marina tratando de encasillar la nueva construcción en los rígidos trámites burocráticos de una fabricación en serie. La retorcida redacción de la R.O., que sorpendió la firma de la augusta Reina, provocó en Peral el natural rechazo y su enfrentamiento con el Ministro, el cual, a su vez, calificó de arrogante su comportamiento.

¡Arrogante! ¿Quién es capaz de apreciar la medida en que pudo haber influido, en todo momento, sobre el espíritu caballeroso y privilegiado de Peral, el inicuo arresto que le fue impuesto por el referido Ministro en el año 1889, sin motivo alguno justificado y por el que permaneció confinado durante mes y medio en el penal de Cuatro Torres (La Carraca), con salidas exclusivas de su prisión para dirigir los trabajos de investigación del submarino?

En todo caso, aquella absurda y desigual confrontación entre Ministro e inventor duró solamente un mes a partir de la mencionada R.O., ya que el 11 de noviembre de 1890 y con un oficio del Ministro Beranger quedó cerrado en España un proceso único de fructífera investigación, cuya continuación hubiera hecho posible el equilibrar nuestro poder marítimo con el de otras naciones de mayores recursos, en una época histórica en que tan necesitados estábamos de medios navales para defendernos.

6. Epílogo glorioso

Isaac Peral, marino y hombre de ciencia, cuya figura de inventor y proyectista naval se agiganta a nivel mundial bajo la perspectiva del tiempo, como ha podido apreciarse de la forma más objetiva y natural a lo largo de este trabajo, fue, además, un gran patriota, cuyas actuaciones estuvieron siempre motivadas por el deseo del mejor servicio a su país, renunciando, incluso, a ventajosas ofertas extranjeras, sin recibir otra compensación que la apreciada Cruz del Mérito Naval.

Las circunstancias propias de la época en que le tocó vivir y la falta de inteligencia y de claro proceder de alguna de las autoridades de Marina, le impidieron culminar el extraordinario proyecto militar que tenía concebido para la defensa de España, cuando ya había logrado contribuir de una manera colosal, con su primer prototipo, al desarrollo mundial de la navegación submarina y a la perfecta concepción del submarino militar.

¡Cuanto más transcurre el tiempo, más noble aparece la figura de Peral, más grande su genio y mayores los merecimientos de su genial creación!

Apéndices

Apéndice I.—Breve descripción del submarino "Peral".

Parece obligado el incluir en este trabajo una breve descripción interior del submarino "Peral", cuyo casco de acero ha llegado hasta nosotros intacto, al haberse eregido como monumento al inventor de su ciudad natal de Cartagena (figura 18), pero de cuyas instalaciones interiores, aparatos especiales y maquinaria, que le habían dado capacidad para navegar bajo el agua con pleno automatismo y seguridad, apenas ha quedado otro vestigio que los planos custodiados por el Archivo Histórico Nacional.

A principios de octubre de 1890 Peral se había retirado a su casa de San Fernando, en espera del resultado de las controversias oficiales y su gran obra había quedado, por decirlo de alguna manera, indefensa. Se inició entonces el desguace lento del contenido del buque, empezando por sus baterías de acumuladores y terminando con toda clase de aparatos y maquinaria, con una sola

Fig. 18.—El casco de acero del submarino Peral, construido hace 100 años en el arsenal de La Carraca, eregido como monumento a su inventor en su ciudad natal de Cartagena.

(*) Durante la construcción del casco del "Isaac Peral" se cometieron defectos en el remachado, que condujeron a faltas de estanqueidad de los mamparos, especialmente en la zona de los tanques de lastre. Cuando se evidenciaron tales defectos los trabajos del buque estaban muy adelantados y por no efectuar una obra de carena relativamente costosa, y el temor a unos trámites burocráticos muy dilatados, se decidió el realizar las pruebas en unas circunstancias que, como puede fácilmente comprenderse, mermaron la seguridad del buque y la brillantez de los resultados.

excepción, la del "aparato de profundidades", que un subordinado de Peral, delineante de la Armada, destruyó a martillazos, para presentar los restos en casa del inventor y decirle emocionado:

"Don Isaac de ese aparato no se aprovechará ya nadie."

Con estos antecedentes y teniendo a la vista los planos de construcción del buque firmados por el propio Peral (figura 8) y la maqueta de su estructura metálica existente en el Museo Naval de Madrid, pasamos a describir el interior del submarino.

Disponía de una sola cámara de sección circular con 2,76 metros de diámetro en su parte central y de una longitud aproximada de 20 metros, lo que le hubiera dado una gran sensación de amplitud, si no hubiera sido por los gruesos puntales metálicos de su estructura resistente, y el entramado soporte de sus baterías de acumuladores.

Recorriendo dicha Cámara, a partir de su extremo de proa, nos encontraríamos, en primer lugar, con lo que fue la novedad militar más importante de aquellos tiempos, el tubo lanzatorpedos submarino ideado por Peral, hallándose a continuación un perfecto equipo de maniobra para el manejo rápido y cómodo de los torpedos, desde el momento de su introducción en el casco, hasta su carga en el tubo de lanzar.

Hacia el centro de la eslora y sobre la parte superior de la cámara, estaba emplazada la torre de mando, cuya tapa superior era de bronce, a fin de no perturbar a la aguja magnética, situada unos centímetros por fuera del casco de acero.

Del techo de la torre de mando sobresalía una torrecilla de unos 90 centímetros de altura, conteniendo en su interior el "aparato óptico de visión indirecta", concebido por Peral para que el Comandante del submarino pudiera ver el panorama exterior proyectado sobre papel cuadriculado.

Dentro de la torre de mando se encontraba también emplazado un aparato fundamental para la navegación submarina, fruto del ingenio de Peral. Era éste el "aparato de profundidades" y "péndulo eléctrico para mantener la horizontalidad", que actuaba automáticamente sobre las hélices verticales y hacía que el submarino navegase de una manera suave y estable por la cota seleccionada por el Comandante.

El gobierno de los timones verticales se llevaba a cabo por un timonel, que, haciendo su guardia bajo la torre de mando, observaba el compás magnético, situado en plano superior al suyo, mediante un sistema de espejos.

El extremo de popa de la cámara estaba ocupado por los dos motores eléctricos propulsores, acoplados cada uno a su línea de ejes a través de engranajes reductores, por la bomba de achique de los lastres y por los mecanismos de gobierno de los timones.

Bajo el piso de la cámara existía un doble fondo donde estaban dispuestos tres tanques de lastre, uno central para anular la flotabilidad del submarino y los otros dos a proa y popa, para el ajuste del trimado.

Para la regeneración del aire ambiente disponía de depósitos de aire comprimido y de una excelente instalación regeneradora a base de cal viva e hidrato de sosa.

Resumiendo en breves líneas el magnífico proyecto de Peral, habría que decir que cuando el buque estaba en reposo la sensación de amplitud y comodidad, con respecto a los submarinos de su época, provistos de calderas, maquinaria de vapor y carboneras, era muy grande, al haberse sustituido tales elementos por baterías de acumuladores y motores eléctricos, con mucho menor empacho y más fácil ubicación.

¿Pero qué ocurría cuando el buque navegaba sumergido? Pues que entonces las diferencias con los submarinos de vapor se hacían abismales, ya que mientras que en nuestro submarino el nivel de ruidos y de temperaturas apenas aumentaba con la propulsión, en aquellos se alcanzaban con facilidad temperaturas de más de 50° C que los hacía inhabitables, siendo los fuertes ruidos generados por ellos totalmente impropios para cualquier acción militar discreta.

Apéndice II. Proyecto de agujas giroscópicas de movimientos permanente.

Hay que destacar que Peral había tratado de construir en el año 1886 en el arsenal de La Carraca, para el gobierno del submarino, una aguja giroscópica eléctrica de movimiento permanente, que no dio resultado debido al herramental empleado y que posteriormente, en el año 1889, encargó la fabricación en Londres, con planos suyos, de una segunda aguja giroscópica más perfeccionada que la anterior, lo que revela una vez más la tremenda capacidad creadora de nuestro gran inventor.

Apéndice III. El segundo proyecto de submarino de Peral.

El segundo tipo de torpedero submarino, cuyos cálculos tenía desarrollados ya Peral cuando se produjo su enfrentamiento final con la Marina, iba a tener un desplazamiento de 130 toneladas métricas, unos 30 metros de eslora y recogía todas las interesantes experiencias deducidas del primer prototipo, con una mayor velocidad y autonomía. Como su propulsión iba a seguir siendo exclusivamente eléctrica, había de necesitar estaciones en tierra para la carga de baterías, debidamente distribuidas en los puertos españoles, siendo la opinión de Peral, sobre este asunto, que 40 submarinos del nuevo tipo y 10 estaciones de carga podían garantizar la defensa de la Península, Baleares y Canarias.

Apéndice IV. Real Orden del 10 de octubre de 1890 encomendando a Peral la construcción de un segundo prototipo de submarino.

"S. M. el Rey (q.D.g.), y en su nombre la Reina Regente del Reino, ha tenido a bien disponer se comunique al teniente de navío Don Isaac Peral el acuerdo que dice así: Por todo lo expuesto, y después de la más amplia y extensa discusión, el Consejo Superior de la Marina se halla conforme con que el torpedero eléctrico sumergible, ideado y construido por el teniente de navío Don Isaac Peral, no llena las condiciones que el autor se prometía, debiéndose las principales causas de ello a su falta de práctica en la ciencia de la construcción naval y a lo complejo y difícil de los problemas que entraña la navegación submarina; pero deseando seguir como las demás naciones cultas los experimentos sobre aplicación de los torpederos sumergibles al arte de la guerra, y utilizar el valioso material que hoy existe en el arsenal de La Carraca; y teniendo en cuenta los conocimientos, patriotismo, laboriosidad, celo y buen deseo que adornan al señor Peral, así como la experiencia por él adquirida, acordó que considera conveniente la construcción de un nuevo submarino, según los planos que presente el señor Peral y bajo su dirección; entendiéndose que dichos planos, el proyecto en general y la ejecución de las obras han de ser examinados, aprobados e inspeccionados por las autoridades y centros a quienes reglamentariamente corresponde, puesto que se trata de una construcción que no requiere trámite oficial."

(Pasa a la pág. 403.)

La Expedición Malaspina (1789-1794) doscientos años después. II. Un marino ilustrado

Por Juan Pimentel Igea
Ldo. en Historia

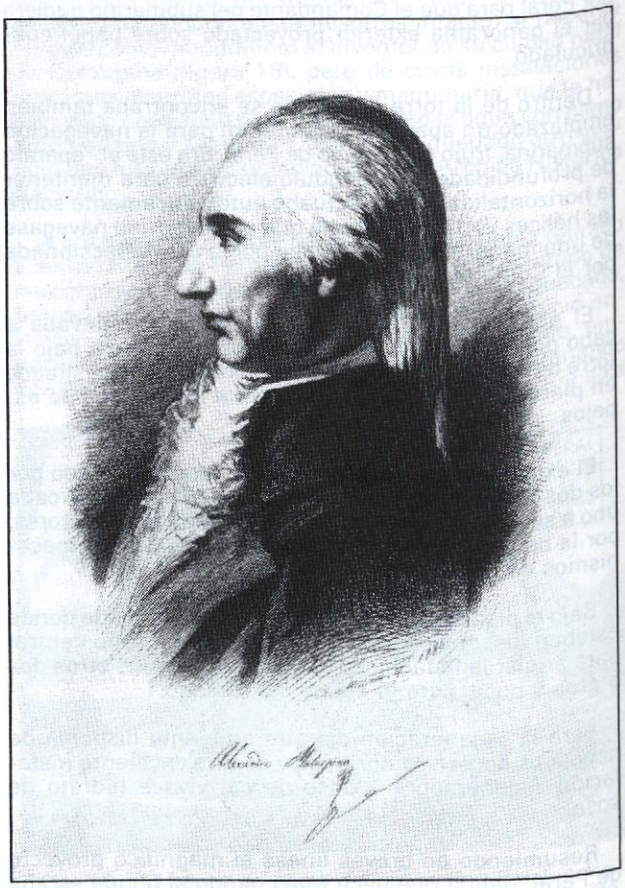
Alejandro Malaspina, hijo del marqués Carlo Morello y de Caterina Melupi, había nacido en la pequeña localidad de Mulazzo, no muy lejos de Génova, en noviembre de 1754. Parece ser que el hecho de que su madre estuviera emparentada con Giovanni Fogliani —primer ministro durante la etapa napolitana del que sería Carlos III de España— hizo posible no sólo que el Marqués de Mulazzo fuera "arrancado de sus montes para brillar en las cortes italianas" (1), sino que también debió tener bastante que ver con que el propio Alejandro —antes de cumplir los veinte años, pero después de recibir formación universitaria allí en Italia— decidiera seguir los pasos del monarca hacia la Península Ibérica, no ya para ser coronado —naturalmente—, sino para enrolarse en la Armada española, concretamente en la Academia de Guardiamarinas de Cádiz, ciudad que por muchos motivos —el puerto, el observatorio, los círculos ilustrados, la propia Academia, etcétera— constituía en la víspera del Ochocientos una de las ciudades españolas más modernas en lo que a ambiente cultural y científico se refiere: el que las Cortes liberales de 1812 se reunieran allí no fue, evidentemente, una mera casualidad.

Cuando en 1774 Malaspina llegó a España, hacía ya tiempo que la Corona se había embarcado en una política de centralización del Estado, modernizando las estructuras más básicas del mismo y reformando desde *arriba*, jurídicamente, lo que de hecho tardó mucho más tiempo en ser cambiado: la división estamental de la sociedad española. Dentro de este marco general conocido historiográficamente bajo la fórmula *Despotismo ilustrado*, la Real Armada fue, además de una de las instituciones que más se resintió de los cambios introducidos, uno de los instrumentos más importantes de los que la Monarquía se valió para hacer llegar sus largos brazos y la nueva concepción del imperio hasta los últimos confines de sus posesiones en América y Oceanía.

Así, por ejemplo, las reformas de Ensenada —el gran artífice de la Marina moderna—, la proliferación de expediciones científicas a lo largo de las colonias españolas y el mismo proceso de institucionalización de la ciencia llevado a cabo parcialmente por la Armada, no eran otra cosa que buenas muestras de ese interés del Estado por desarrollar a través de la Marina de guerra una determinada política científica y colonial.

La expedición protagonizada por Alejandro Malaspina durante los años que van desde 1789 a 1794 se inscribe en este contexto histórico, siendo en realidad la auténtica recopilación de aquello que los anteriores viajeros habían hecho sectorialmente en diferentes áreas del imperio: levantar cartas hidrográficas, describir las distintas clases de animales y plantas que allí encontraban, conocer el verdadero estado social y económico de los virreinatos, etcétera.

Pero antes de que se llevara a cabo tamaña empresa, el joven oficial de origen italiano tuvo que comprobar en carne propia los rigores de una carrera como la suya: a los combates que le tocó vivir a causa del conflicto que enfrentó a españoles e ingleses con motivo de la Guerra de Independencia americana, habría que sumar



Alejandro Malaspina, según B. Maura (grabado para la edición del diario de viaje que publicó Novo y Colson en 1885).

(1) Enmanuel Greppi: "Alejandro Malaspina", en PALAU, M. (ed.). *Diario de viaje de Alejandro Malaspina*, Madrid, 1984, página 2.

las dificultades inherentes a las duras travesías que realizó antes de la gran expedición. Las epidemias, las carencias y los increíbles riesgos de la propia navegación eran el denominador común de estos viajes; pero no representaron suficiente obstáculo como para que Malaspina no fuera el primer italiano y el decimotercero de los navegantes de toda la historia en realizar un viaje de circunnavegación.

Esto ocurrió en los años 1786-1788 a bordo de una fragata llamada Astrea, cuya derrota siguió la navegación acostumbrada en este tipo de travesías: de Cádiz al Cabo de Hornos, de allí hacia el norte ascendiendo por la vertiente occidental del continente, para después surcar el Pacífico desde Callao hasta Manila. Una vez allí, ponían vela rumbo al Cabo de Buen Esperanza atravesando el Océano Indico y desde allí, siguiendo la costa atlántica de Africa, volvían a Cádiz. Fueron ventiún meses alrededor del mundo que le permitieron hacerse una idea bastante precisa de cómo funcionaban las líneas marítimas y comerciales del imperio, así como apreciar las peculiaridades de cada sistema de dominación (inglés, francés y holandés, fundamentalmente). Esta experiencia hizo posible que madurara en él la idea de realizar una expedición como la que al año de volver se puso en marcha. Pero —no convendría olvidarlo— que él junto con otro oficial llamado José Bustamente y Guerra presentaran un "plan de un viaje científico y político alrededor del mundo" (2), no es equivalente a decir que una empresa como esa —con todos los medios que requería— se organizaba por el capricho de dos oficiales. Muy al contrario, el Estado —como hemos dicho— se valía de la institución militar para ejecutar aquellos actos que consideraba de vital importancia para sus intereses. Y entre éstos, uno de los más destacados era saber qué estaba ocurriendo bajo sus dominios al otro lado del Atlántico. A cumplir este objetivo se dirigió la expedición comandada por Alejandro Malaspina.

Naturalmente, no se trataba de saber cómo eran América y el Pacífico por un simple afán de conocimiento aséptico. La ciencia —entonces y ahora— es, antes que nada, un medio que el hombre posee para, a través del conocimiento del mundo, pasar a dominarlo. La llamada "Expedición Malaspina" no fue, ni de lejos, ajena a este hecho. Las opiniones de su comandante, vertidas en los diarios de navegación, son bastante ilustrativas de esto que estamos diciendo.

Así, por ejemplo, era el propio Malaspina quien ya antes de partir reconocía abiertamente que, aunque en lo referente a la parte científica se debían seguir los ejemplos de Cook y Lapérouse, "un viaje hecho por navegantes españoles debe precisamente implicar otros dos objetos: el uno es la construcción de cartas hidrográficas para las regiones más remotas de América, y de derroteros que puedan guiar con acierto la poca experta navegación mercantil; y la otra la investigación del estado político de la América, así relativamente a España como a las naciones extranjeras" (3). Es decir, ciencia para un imperio necesitado de un mejor conocimiento de sus dominios.

Básicamente las opiniones que Malaspina dejó escritas en los diarios de navegación y en los múltiples informes realizados en las distintas escalas, nos hablan de una percepción del espacio colonial que es característica de la época de transición en la que está situado. Malaspina nació en 1754 —en los días de la Enciclopedia— y murió en 1810 —en la Europa napolitana—; la expedición zarpó de Cádiz en julio de 1789 —casi al tiempo de que se iniciara la Revolución francesa— y regresó en septiembre de 1794 —en plena guerra contra la Convención—. Ambos, el hombre y la empresa, están colocados en dos períodos privilegiados de la historia —de larga y corta duración respectivamente— que conocieron dos tránsitos particularmente importantes para el curso posterior de los acontecimientos en el Occidente decimonónico. La ideología malaspiniana, no podía ser de otra manera, responde a esta peculiaridad.

Indígena norteamericana (Museo de América).

Por un lado, la visión que el oficial tenía de las colonias ultramarinas entronca con una sólida tradición del pensamiento crítico que viene de muy atrás; que se inició —en lo que toca a América— prácticamente al día siguiente del Descubrimiento. En el siglo XVIII esta tendencia, recogiendo los ribetes del arbitrismo de la pasada centuria y asumiendo la clásica acción ilustrada a la hora de desterrar lo falso, se va a consolidar formándose toda una literatura proyectista en la que los escritos de Malaspina se instalan, por mucho que él mismo renegara constantemente del calificativo de "proyectista" (4).

En este sentido, el punto esencial de la crítica colonial se centraba en la escasa rentabilidad de las posesiones para la Corona, lo cual era el lógico coletazo del utilitarismo que marca gran parte del pensamiento y de la política de la centuria. El modelo colonial debía cambiar, los impuestos tendrían que simplificarse, habría que reconcentrar las fuerzas defensivas en pocos y estratégicos puntos... Pero no porque todo aquello fuera malo en sí, sino porque la práctica histórica había demostrado la ineficacia del sistema. Para Malaspina lo errado del

(2) Archivo del Museo Naval. Ms. 583, ff. 5-7.
(3) *Ibídem*, f. 6 v.

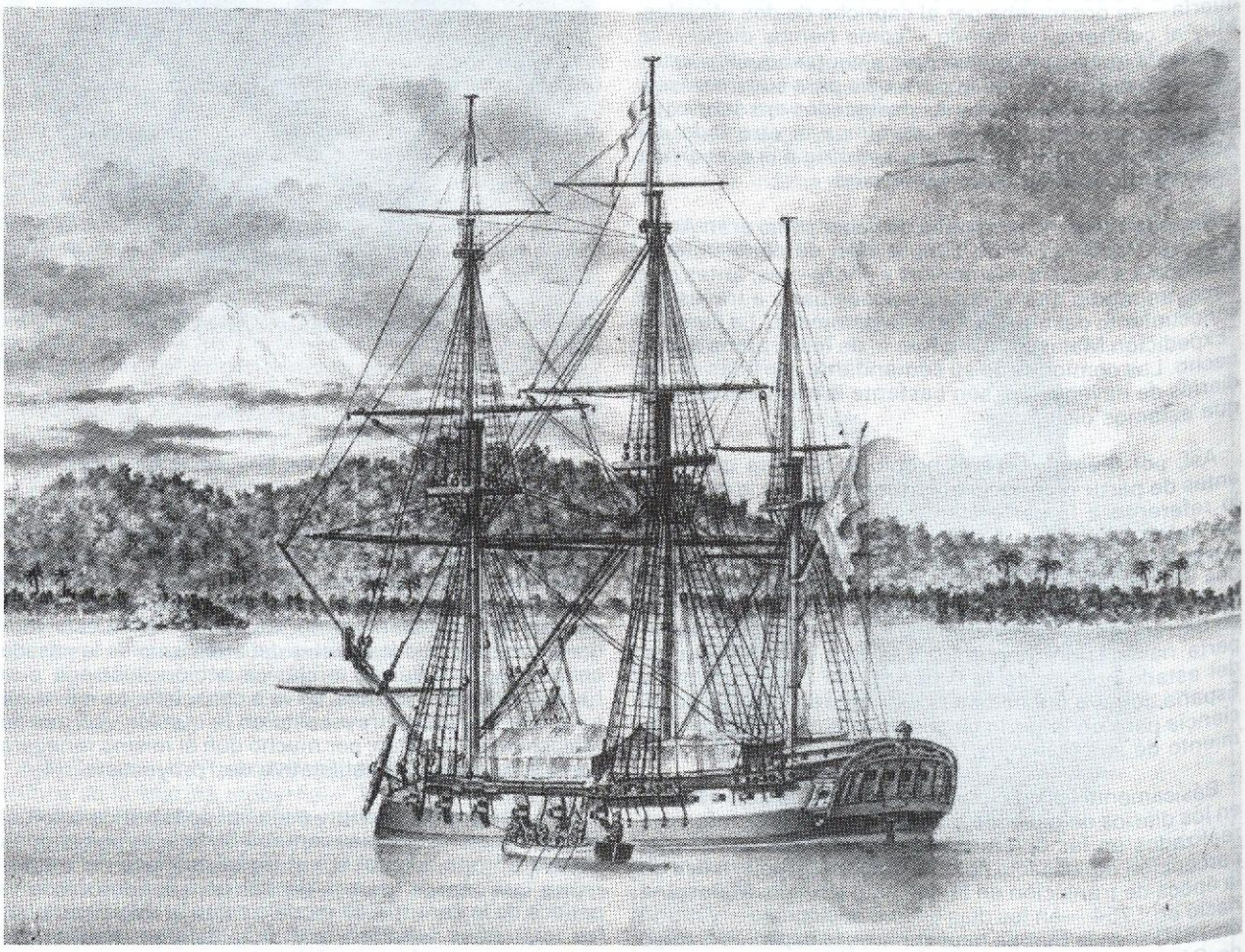
(4) El concepto debió tener un claro matiz peyorativo en aquellas fechas.

modelo no era debido a que se sustentara sobre principios rechazables, sino al descalabro que siguió a su puesta en marcha: los metales preciosos se iban según llegaban a la Península y los que se quedaban no eran adecuadamente utilizados en inversiones; la superposición de distintos cuadros administrativos en América generaba un excesivo número de funcionarios y, por lo tanto, un elevado número de trámites innecesarios y de trabas ante cualquier iniciativa de un virrey o de un visitador que llegara con ánimos de cambiar las cosas. El sistema era perjudicial para los intereses de la Monarquía, en una palabra, porque no se mostraba útil y porque no contribuía a la tan dieciochesca "felicidad pública" (concepto difícil donde los haya).

Pero del mismo modo, Malaspina se estaba haciendo eco de una nueva consideración del lugar que los espacios americanos y oceánicos podían desempeñar en el contexto moderno de las relaciones internacionales. Para él, las colonias debían formar parte importante, por derecho propio, en el diseño de una política internacional y, en el caso español, pensaba que lo oportuno era agrupar las posesiones en torno a tres grandes unidades ligadas a la metrópoli sólo en lo tocante al sistema militar y al religioso. Estas tres unidades eran las que la naturaleza ya había dispuesto como unidades diferenciadas: América del Sur, América del Norte e islas Filipinas y Marianas en el Pacífico. Y es que la naturaleza —en Malaspina y en tantos ilustrados— suponía el modelo racional cuyo equilibrio armónico el hombre debía tratar de seguir en el momento de establecerse en sociedad.

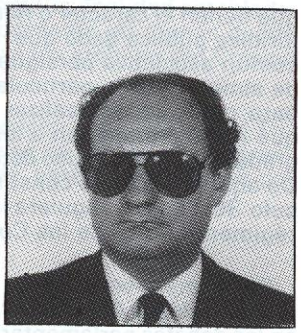
Finalmente, el discurso ideológico del marino no estaba exento de un marcado tinte romántico, en el que abundaban frecuentes apelaciones al deterioro que suponen para el hombre la civilización y el progreso material. La búsqueda de un ideal de vida "sosegada y filosófica" —como él mismo decía— se convirtió en el sueño utópico de un hombre consagrado a la acción.

El drama de la expedición y de su comandante fue que a su vuelta el interés del Estado por lo que sucedía en América se había trocado en miedo por lo que ocurría en Francia. Un año después del regreso, en 1795, a causa de un enfrentamiento con Godoy, Alejandro Malaspina se vio condenado a pasar diez años en la prisión militar de San Antón de La Coruña y los papeles que recogían los trabajos de aquellos cinco años a bordo fueron depositados en cajas cerradas: el mismo Estado que había proyectado la empresa ahora renegaba de sus frutos, una ingente muestra de la realidad ultramarina relativa a todos los ámbitos del saber científico de la época y un informe político y económico que reflejaba lo precario de una situación, como así el tiempo se encargó de poner de manifiesto algunas décadas más tarde.



La "Descubierta", dibujada por J. Cardero (A.M.N.).

La colegiación obligatoria para el ejercicio profesional: es constitucional



Por José Antonio Ferrer-Sama

El Colegio de Oficiales de la Marina Mercante viene manteniendo, desde hace ya muchos años, una enconada batalla con la Administración para que reconozca, de forma expresa, la colegiación obligatoria de los titulados de la Marina civil, principio recogido en los Estatutos colegiales, aprobados por Real Decreto 2.020/80, de 31 de julio.

El silencio protagonizado por el Ministerio de Transportes, Turismo y Comunicaciones en respuesta a las peticiones formuladas por dicho Colegio, provocó un recurso contencioso-administrativo cuyo conocimiento corresponde a la Sección 4.ª de la Sala de lo Contencioso-Administrativo de la Audiencia Nacional, la cual, antes de resolver, promovió, ante el Tribunal Constitucional, cuestión de inconstitucionalidad por los motivos que luego se expresarán. Recientemente el Tribunal Constitucional ha dictado sentencia con el consiguiente eco en la prensa nacional dada la importancia del tema sometido a debate.

Ciertamente, la materia objeto de discusión afectaba no sólo al Colegio que había interpuesto el recurso sino también a la totalidad de los Colegios Profesionales al cuestionarse si es conforme al ordenamiento jurídico la exigencia de colegiación para el ejercicio de determinadas profesiones. En efecto, la Audiencia se plantea la pregunta y se la traslada al Tribunal Constitucional de la posible inconstitucionalidad del párrafo 2.°, del artículo 3.°, de la Ley 2/74, de 13 de febrero, al establecer:

"Será requisito indispensable para el ejercicio de las profesiones colegiadas la incorporación al Colegio en cuyo ámbito territorial se pretenda ejercer la profesión."

Según el Tribunal este principio puede ser incompatible y chocar frontalmente con los artículos 22 y 36 de la Constitución española y, si así fuera, quedaría automáticamente derogado. De aquí la importancia de la decisión del Tribunal Constitucional para la totalidad de los Colegios Profesionales.

¿Y a qué se refieren los preceptos constitucionales? El artículo 22 reconoce el derecho de asociación, y por lo que respecta al artículo 36 dice lo siguiente:

"La Ley regulará las peculiaridades propias del régimen jurídico de los Colegios Profesionales y el ejercicio de las profesiones tituladas. La estructura interna y el funcionamiento deberán ser democráticos."

Conviene decir para aquellos que no estén muy versados en materias jurídico-procesales que la cuestión de inconstitucionalidad consiste en un recurso que puede plantear cualquier órgano judicial que entiende sobre determinada materia ante el Tribunal Constitucional y mientras no se produce resolución de éste se paraliza la litis o procedimiento sobre el que está entendiendo. Tiene, por tanto, naturaleza de cuestión prejudicial.

En opinión de la Sección 4.ª de la Sala de lo Contencioso-Administrativo de la Audiencia Nacional, el derecho de asociación reconocido en el artículo 22 de la Constitución española posee dos vertientes: el derecho a asociarse y el derecho a no asociarse. La exigencia impuesta por el artículo 3.2 de la Ley de Colegios Profesionales antes trascrito y referente a la colegiación obligatoria está en contradicción con esta segunda faceta. Dada la contradicción existente debe prevalecer el derecho de asociación por dos razones:

a) Los Colegios Profesionales no son un fin en sí mismos por tener un carácter instrumental para el mejor desarrollo de la persona y el orden social.

b) Lo que constituye el fundamento del orden político y de la paz social es la dignidad de la persona y de los derechos inviolables que le son inherentes, entre los que se encuentra el derecho a asociarse y, por tanto, a no asociarse.

Esta teoría nos es compartida por el Tribunal Constitucional. El fundamento jurídico tercero de la resolución que se comenta considera que el punto de partida es erróneo al razonar que la colegiación obligatoria entraña una vulneración del derecho de asociación en su proyección negativa, es decir, en cuanto al artículo 22 de la C.E. protege y ampara también la libertad de no asociarse. Este presupuesto, razona la sentencia, condiciona o prejuzga su conclusión al considerar que los Colegios Profesionales a los que se refiere el artículo 36 de la C.E. están incluidos, sin más, en el ámbito del derecho de asociación del artículo 22.

En opinión del Tribunal Constitucional los Colegios Profesionales son corporaciones que cumplen a la vez

fines públicos y privados, pero integrados siempre en la categoría o concepto de corporación a que se refería ya el Código Civil en su artículo 35, al mencionar a las personas jurídicas. Este artículo separa "las Corporaciones, Asociaciones y Fundaciones de interés público reconocidas por la Ley" de las "Asociaciones de interés particular sean civiles, mercantiles o industriales". En definitiva, los Colegios Profesionales son Corporaciones que tienen el carácter o naturaleza pública o de persona jurídica pública dado que no obstante tener una base común asociativa persiguen fines más amplios que los de simple interés particular o privado. Por este motivo para que puedan realizar aquellos fines y funciones, que no sólo interesan a las personas asociadas o integradas, se hace preciso dotarles de intermediación legal. De aquí el mandato constitucional contenido en el artículo 36: "La Ley regulará las peculiaridades propias del régimen jurídico de los Colegios Profesionales".

Por primera vez aparece en un texto constitucional el respaldo de los Colegios Profesionales. Recuérdese que en los debates parlamentarios, concretamente la palabra "Colegio" fue añadida o introducida en la Comisión Constitucional del Congreso de los Diputados en virtud de una enmienda defendida por el profesor Alzaga de UCD, por cierto, "in voce", aprobada por unanimidad. Sin embargo, la redacción de una norma aislada dedicada exclusivamente a los Colegios Profesionales fue hecha por el Senado y personalmente creo que como consecuencia de la defensa encomiable que al respecto realizó el entonces senador señor Pedrol Rius, a la sazón decano del Colegio de Abogados de Madrid y presidente del Consejo General de la Abogacía. Con su ardoroso alegato consiguió el respeto constitucional a "los principios de adscripción y ejercicio hasta ahora vigentes", en base a los antecedentes históricos de la organización colegial de la profesión de abogado que parten de los siglos XIV y XV.

Posteriormente, la Comisión Mixta Congreso-Senado suprimió tan valiente redacción, quizá ciertamente exagerada y se hizo referencia exclusivamente a la Ley Ordenaria: "la Ley regulará las peculiaridades propias...".

No obstante, constitucionalizar la existencia de los Colegios Profesionales, la nueva Constitución no establece su naturaleza jurídica, la cual —y en esto compartimos la tesis de la doctrina imperante— debe partir de una concepción bifronte, dada su base asociativa nacida de la misma actividad profesional titulada que cumplen a la vez fines públicos y privados dentro siempre del celofán que les envuelve corporativo. La única especialidad impuesta por la Constitución es establecer la intermediación de la Ley que regulará "las peculiaridades propias del régimen jurídico de los Colegios Profesionales".

Ante estos principios la sentencia del Tribunal Constitucional fundamenta las bases de la contradicción mantenida con la Sección 4.ª de la Audiencia Nacional, pues evidentemente afirma "si los Colegios Profesionales, por su tradición, por su naturaleza jurídica y fines y por su constitucionalmente permitida regulación por Ley no son subsumibles en la totalidad del sistema general de las asociaciones a las que se refiere el artículo 22 de la C.E. ...es claro que no pueden serles aplicable el régimen de éstas" (asociaciones de naturaleza jurídico privadas). Por tanto, el artículo 22 de la Constitución no prohíbe la existencia de entes que exijan un específico tratamiento. Precisamente por esto se justifica que la Constitución española en su artículo 36 haya querido despejar o separar a los Colegios Profesionales del régimen general asociativo. Y entre aquellas normas específicas o peculiares está precisamente la adscripción forzosa al Colegio Profesional, condición que el legislador puede establecer o no en razón a la configuración específica y fines del Colegio correspondiente, dada la reserva de ley regulada en dicho artículo 36.

Nada que objetar al razonamiento del Tribunal Constitucional. Tan lógico razonamiento no debió nunca ponerse en duda ni tan siquiera cuestionarse, pues los perjuicios que de ellos se derivan han sido en este caso graves para el colectivo que interpuso, allá por el año 1981, el recurso contencioso-administrativo, además del resto de los Colegios que han visto la espada de Damocles sobre sus cabezas y porvenir.

A este respecto, es conveniente patentizar las posturas de las partes en el proceso. Es razonable que el recurrente se manifestara contrario a la tesis mantenida por la Sala de lo Contencioso-Administrativo de la Audiencia Nacional sobre la supuesta inconstitucionalidad del artículo 3.2 de la Ley 2/74, dada su postura procesal: impugna el acto administrativo presunto —dado el silencio de la Administración ante las reiteradas peticiones— y, en consecuencia, está pidiendo de la Administración de justicia el amparo de su derecho que no es otro que la exigencia de la obligatoriedad de la colegiación para ejercer una determinada profesión.

Conviene, sin embargo, resaltar la postura mantenida en el proceso por el Ministerio Fiscal. Se opone también a la cuestión de inconstitucionalidad planteada por la Audiencia Nacional. No es exagerado afirmar la soledad de los señores magistrados de la Audiencia, retóricamente hablando, pues su tesis no fue compartida por ninguna de las partes intervinientes en el proceso. Ni tan siquiera la objetividad que la normativa vigente impone al Ministerio público cayó de su lado. Y aún hay más, la representación del Ministerio Fiscal invoca en apoyo de su postura la jurisprudencia emanada por el Tribunal Europeo de Derechos Humanos sobre Colegios Profesionales y examina diversos supuestos en los que la obligación de inscribirse a una disciplina colegial no es limitativa injustificadamente, ni mucho menos implica supresión del derecho garantizado en el Convenio Europeo de Derechos Humanos, en su artículo 11, paralelo al artículo 22 de nuestra Constitución (libertad de asociación).

Abundando en la tesis mantenida por el Ministerio Fiscal, la sentencia razona:

> "La misma consideración institucional y parecidas exigencias y requisitos son los exigidos en los países de nuestro entorno, e incluso, respecto a la colegiación obligatoria en la jurisprudencia del Tribunal Europeo de Derechos Humanos, en resoluciones que el mismo auto proponente y las partes citan, concretamente las sentencias de 23 de junio de 1981 (asunto Le Compte) y 10 de febrero de 1983 (asuntos Albert y Le Compte), cuya cita es adecuada al caso presente. Como bien dice el Fiscal, el artículo 22 se refiere al derecho de asociación de los individuos como ciudadanos y el 36 establece el marco supralegal de determinados ciudadanos y deja a la Ley que imponga las condiciones necesarias para su ejercicio..."

Urgando en mis archivos he encontrado un informe realizado en el año 1985 solicitado por el entonces secretario del Colegio Oficial de Ingenieros Navales, motivado por una carta que por aquella época le dirigió a nuestro decano el presidente del Colegio Oficial de la Marina Mercante Española, por la que ponía en su conocimiento la cuestión de inconstitucionalidad planteada por la Audiencia Nacional respecto a la obligatoriedad de la colegiación para el ejercicio de la profesión. En dicho informe llegué a la misma conclusión que lo hace ahora el Tribunal Constitucional y lo hicieron con anterioridad el recurrente y el Ministerio Fiscal y, lo digo sin pedantería, dado lo generalizado del criterio, lo que le resta importancia. Permítaseme transcribir los dos últimos párrafos, que ponen de manifiestoo no sólo lo que an-

tecede sino también la voluntad de nuestro Colegio de apoyar judicialmente esta tesis. Se decía así:

"En definitiva, a mi entender, no existe incompatibilidad entre las normas mencionadas, ya que ambas garantizan el derecho de asociación. Además, la Constitución remite a una Ley Orgánica que regulará los Colegios Profesionales, su estructura interna y funcionamiento, los cuales deberán ser democráticos. Al Tribunal le surge la duda de si la promulgación de la Constitución ha abolido la Ley 2/74 o, mejor dicho, si parte de sus normas en vigor contradicen la misma."

"Esperemos, y es lo deseable, que el Tribunal Constitucional declare, que el artículo 3.2 de la Ley de Colegios Profesionales es concorde con la Constitución española y, mientras tal resolución se produzca, procesalmente nada puede hacer el C.O.I.N. ni ningún otro Colegio Profesional, dado el veto que la Ley Orgánica del Tribunal Constitucional impone en su jurisdicción a los terceros."

En efecto, el C.O.I.N. era partidario de intervenir activamente en el proceso abierto por la Audiencia Nacional de la cuestión previa de inconstitucionalidad entablado. No podía ser por razones procesales. Al menos quede constancia de su propósito, y a los archivos del Colegio me remito.

Congratulémonos de la decisión adoptada por el Tribunal Constitucional. Esta vez se ha hecho justicia, creemos que, como siempre, tarde, pero justicia. No es poco.

(Viene de la pág. 368.)

33. VAN MANEN, J. D. y LAP, A. J. W.: "Scale effect on Victory Ships and Models" (segunda parte), R.I.N.A. (1958).
34. BRARD. R. y AUCHER, M.: "Resistance a la marche, sillage, suction et effect de scale sur la propulsion", Bulletin ATMA (1969).
35. SASAJIMA, H. y TANAKA, I.: "On the Estimation of Wake of Ships", 11th ITTC, Tokyo (1966).
36. BOWDEN, B. y DAVISON, N.: "Examination of the Wake Scale Effect for Single-Screw Ships Using the NPL/BSRA Correlation Data", Working Paper del Performance Committee, 14th ITTC (1975).
37. NAKATAKE, K.; KOGA, T. y YAMAZAKI, R.: "On the Interaction between Screw Propeller and Rudder", Transactions of the West Japan Society of Naval Architects (1981).
38. YAZAKI, A.: "A Diagram to Estimate the Wake Fraction of an Actual Ship from a Model Tank Test", Proceedings of the 12th ITTC, Roma (1969).
39. SUDO, S. y TANIMOTO, T.: "A Consideration of Model-Ship Correlation on Wake-Friction", Journal of JSNAJ (1967).
40. DYNE, G.: "On the Scale Effect on Thrust Deduction", Transactions of the R.I.N.A. (1973).
41. WAGNER, K.: "Resistance and Propulsion Tests on a Series of Victory Models", Schiffbauforschung (1967).

(Viene de la pág. 397.)

Bibliografía

1. RUIZ DEL ARBOL, Emilio: *Los buques submarinos.* 1889.
2. *Informes de la Junta Técnica de Marina.* Archivo del Observatorio de Marina de San Fernando. 1890.
3. *Revista General de Marina.* Años 1888, 1889 y 1890.
4. ECHEGARAY, José: *Examen de varios submarinos comparados con el "Peral".* 1891.
5. MONTURIOL, Narciso: *Ensayo sobre el arte de navegar por debajo del agua.*
6. *Diccionario enciclopédico Hispano-Americano.* 1894.
7. PEREZ DE VARGAS, Luis: *Recuerdos de antaño.* 1895.
8. *Diario de Cádiz.* Años 1887 y 1891.
9. *El profundo Isaac.* Documentos del archivo de Isaac Peral y Caballero. 1934.
10. ALDEREGUIA, Claudio: *Sumergibles.* 1923.
11. CLERC, G.: *Los submarinos.* Rampal. 1924.
12. *Enciclopedia General del Mar.* Ediciones Garriga. 1957.
13. BJÖRN LANDSTRÖM: *El buque.* 1961.
14. DUNCAN HAWS: *Los buques y el mar.* 1975.
15. BOWEN, Daniel: *War machines.* 1977.
16. CIERVA, Ricardo de la: *Historia básica de la España actual.* 1981.
17. *El buque en la Armada española.* Editorial Silex. 1981.
18. RAMIREZ GABARRUS, M.: *El Arma Submarina española.* 1983.
19. *The new Encyclopedia Britannica.* 1979.
20. *Enciclopedia Universal Ilustrada.* Espasa-Calpe. 1927.

NOTICIAS

ASTILLEROS

LA POLITICA JAPONESA

La Chambre Syndicale des Constructeurs de Navires francesa ha publicado recientemente una nota de coyuntura de la que se resumen algunos temas tratados.

El Director General de B&W propone contar o sumar los buques mejor que las toneladas o los arqueos, ya que se ha demostrado que las evoluciones son prácticamente idénticas.

Si se consideran los buques de 2.000 TPM y mayores, la situación es la siguiente:

— Flota mundial: 26.000 buques.
— Flota amarrada muy reducida.
— Edad de la flota: la mitad de los buques tienen más de quince años, frente al 39 % que tienen diez años.
— Sobre la base de una vida útil de 25 años, la renovación anual deberá ser de 1.000 buques (ó 900, si se tiene en cuenta el tamaño cada vez mayor). La producción, si bien está aumentando desde 1987, es actualmente de sólo unos 750 buques, de los cuales se construye uno de cada cuatro en Europa (en lugar de uno de cada tres, en 1977).
— Incremento de los precios de los buques nuevos (iniciado desde precios muy bajos).

Un aumento del 5 % del transporte marítimo no exige más que un aumento del 1 al 2 % de la flota (tamaño, productividad).

Se obtiene una estimación de unos 1.100 buques, demanda a la que pueden atender los astilleros existentes gracias a las mejoras de productividad. Además, el ritmo de los desguaces permite corregir las desviaciones: "Por consiguiente, todo hace pensar que si no se ponen en marcha nuevas capacidades, la construcción naval deberá convertirse en una actividad sana a lo largo del próximo decenio".

Los años 60 fueron un período de expansión generalizado en Europa mientras que Japón lanzó su ofensiva. En los años 80 después de una caída general aprovecha una corta recuperación para relanzar su construcción creando una grave crisis (asunto Sanko), incluido Japón, que reduce su capacidad de construcción.

La voluntad de hegemonía japonesa en la construcción naval parece evidente con la reapertura de astilleros. Hay razones para temer por el equilibrio del mundo marítimo y es necesario limitar la reapertura de astilleros del Extremo Oriente (más bien que una reglamentación de una competencia intra-europea marginal).

«La teoría según la cual Europa debe especializarse en ciertos segmentos del mercado, los más puntuales o los más sofisticados, lleva a preconizar que los países europeos limiten su producción a lo que Tokyo tenga a bien concederles.

En la actualidad, la casi totalidad de los graneleros y petroleros se construyen en Extremo Oriente. En Europa Occidental sólo quedan España y Dinamarca construyendo estos tipos de buques, pero ¿por cuánto tiempo? Una vez asegurados los mercados de buques sencillos, Corea y Japón han decidido conquistar el de los buques más sofisticados.

En la competencia que encuentran diariamente en Extremo Oriente, los constructores europeos se enfrentan con una baja cotización sistemática concertada entre Japón y Corea, que llega al 30-35 % en buques como transportes de gas o portacontenedores, que se consideraban como especialidades europeas.

Los japoneses construyen, con la colaboración de una sociedad de clasificación europea, su primer gran paquebote de cruceros, el "Crystal Harmony", tipo de buque en el que hasta el presente, Japón no tenía experiencia.

¿Se puede uno imaginar que un armador japonés tenga simplemente la idea de pedir un buque de cruceros en un astillero europeo experimentado con la justificación de que la construcción de este tipo de buque amadrinado en Europa, desde hace tiempo, es más barato y supone menos riesgos? El simple enunciado de esta proposición parece incongruente y casi inconveniente. En Europa, la proposición es inversa: "Los buques europeos deben contratarse en Europa por razones de política industrial global", que suena de forma inconveniente.

Se puede invocar la diferencia de culturas, cultura imperial de Japón, cultura liberal de Europa. La pena es que en este juego el vencedor es siempre Japón... y no sólo en construcción naval».

BUQUES DE OCASION

Los nuevos buques construidos a los precios de hoy no pueden ser rentables con los fletes actuales, según un informe realizado por el gabinete McKinsey con el Consejo de Investigación Científica y la Asociación de Armadores de Noruega. Rechaza la opinión extendida sobre el incremento de pedidos de nuevas unidades y la subida de precios de construcción en un futuro próximo. Según el informe es más seguro invertir en buques de segunda mano. La compra de una unidad de quince años proporciona beneficios durante un período de cinco a diez años. Si se mantiene el mercado, el buque puede bien desguazarse o bien modernizarse para durar todavía esos años. Por el contrario, un buque nuevo debe proporcionar un beneficio razonable durante veinte o treinta años.

Los autores prevén mercados más estables en los años 90, que antes de la crisis petrolera de los años 70. Deberá establecerse un mejor equilibrio entre la demanda y la oferta de tonelaje. Es de esperar tasas elevadas de fletes sin las fluctuaciones de antes de la crisis. Un miembro del gabinete no acepta la afirmación de que en el campo marítimo, la intuición cuenta más que un análisis detallado. En su opinión la capacidad de análisis debe incrementarse con el fin de una mejor interpretación de las condiciones macro y micro-económicas y del tratamiento de una gran cantidad de información.

La experiencia operacional adquiere cada vez mayor importancia para captar rápidamente las indicaciones del mercado, actuar sobre los buques de ocasión exige, también, el conocimiento de las normas técnicas de los buques, una vigilancia constante para negociar en un buen momento, un peso financiero y, sobre todo, autoridad para tomar decisiones.

TRAFICO MARITIMO

INFORME ANUAL DEL GCBS

Según el informe anual del Consejo General de los Armadores británicos, publicado recientemente, el tonelaje bajo control británico deberá registrar un descenso del 25 % hasta el año 1992.

La Comunidad Europea es cada vez más el centro de atención de la política marítima internacional de los armadores británicos. El empuje político creciente en la óptica de 1992 y el establecimiento del gran mercado interior tienen una fuerte influencia tanto directa como indirecta. El informe pone énfasis en la débil tasa de rentabilidad de las inversiones en el campo marítimo, comparado con otras actividades. El GCBS, juntamente con las otras asociaciones de armadores europeos presionan sobre la Comisión europea para que se tomen medidas que reduzcan las disparidades de las condiciones de explotación y de costes tanto en el seno de la propia Comunidad como con los competidores exteriores que se benefician de costes de explotación muy bajos.

El informe insiste en el hecho de que varios de los objetivos de la segunda fase de la política marítima europea coinciden con los del mercado internacional pero en lo que se refiere al campo marítimo en 1992, recubre un concepto lleno de incertidumbres. Aunque se felicitan de la supresión de los controles sobre los movimientos de bienes y personas, el GCBS queda preocupado por los efectos de las propuestas relativas a la desaparición de las barreras fiscales. La abolición del impuesto fiscal y la aplicación de la TVA, al precio de los pasajes, así como a los suministros de los buques, colocarán a los armadores europeos en una posición de debilidad creando una "pesadilla burocrática", tanto para los viajes intra como extracomunitarios.

Entre las realizaciones del año se pueden señalar: acuerdos fiscales satisfactorios para los marinos británicos que navegan fuera del Reino Unido en buques de terceros; las "light dues" se han reducido el 10 %; el nuevo sistema marítimo global de destreza y seguridad será introducido de forma progresiva con las adaptaciones sobre la tarea tradicional del oficial radio; acuerdos sobre la protección de los buques en el Golfo Pérsico; formación de un mayor número de alumnos oficiales.

El tamaño, la composición, las tripulaciones de los buques de propiedad británica se han transformado bajo la influencia de factores económicos mundiales. Desde 1980, la flota ha perdido más de la mitad de su tonelaje. El número de oficiales embarcados en buques de armadores pertenecientes al GCBS es el 40 % del nivel de 1980 y el personal subalterno ha pasado de 30.000 a menos de 15.000. Sin embargo, la flota de comercio británica proporciona 25.000 empleos directos y las actividades con ella relacionadas: seguros, agentes, suministradores, decenas de millares. La flota de 1989, ciertamente es reducida pero más productiva. Los buques británicos ingresan anualmente 3.400 millones de libras en divisas y una aportación neta de 1,3 millones de libras a la balanza de pagos, después de la deducción de gastos en el extranjero.

En muchos sectores, el año 1988 ha aportado mejoras sustanciales pero a partir de niveles muy bajos. Por primera vez, después de muchos años, alguna sociedades han tenido beneficios de explotación, la actividad en cruceros continúa en expansión pero se empieza a sentir sobrecapacidad en líneas regulares.

Según el informe, hay que señalar dos factores que explican la baja rentabilidad de las inversiones y las previsiones de una reducción del 25 % de la flota: "En primer lugar, la mayoría de nuestros competidores se benefician, ya sea de ayudas de sus gobiernos o de costes de explotación mucho más bajos, por razones de todos conocidas. En segundo lugar, la mayor parte de las industrias británicas terrestres, actúan en un campo puramente nacional sin competencia extranjera, o con la protección de las tarifas de la CEE, o con la elevación de las barreras aduaneras frente al «dumping» de los países en vías de desarrollo". El GCBS continúa con su campaña para que la actuación gubernamental coloque en pie de igualdad lo terrestre y lo marítimo.

El nuevo presidente espera que los armadores europeos podrán tomar de nuevo la salida en los años 90 y siguientes. A propósito de las ayudas ha declarado que algunos armadores de la Comunidad no pagan impuestos sobre las empresas, otros lo hacen con tasas muy bajas y otros se benefician de tasas de amortización de las inversiones marítimas, muy favorables.

VARIOS

PUBLICACIONES DE LA C.E.I.

La Comisión Electrotécnica Internacional ha editado últimamente las publicaciones siguientes:

— 92-201 (1980): Instalaciones eléctricas en buques. Parte 201: Diseño de Sistemas-Generalidades.

— 92-350 (1988): Instalaciones eléctricas en navíos. Parte 350: Cables de energía a baja tensión para uso en navíos. Construcción general y requisitos para los ensayos (primera edición).

— 92-353 (1988): Instalaciones eléctricas a bordo de los navíos. Parte 353: Cables simples y multipolares con aislamiento sólido extruido, para tensión asignada de 0,6/1 kV (primera edición).

CURSO SOBRE FIABILIDAD ESTRUCTURAL

Los cursos ISPRA, de la Comisión de las Comunidades Europeas, han organizado un curso sobre "Fiabilidad Estructural" que tendrá lugar en Lisboa, los días 13 al 17 de noviembre, con la colaboración del Instituto Superior Técnico. Universidad Técnica de Lisboa.

Las restricciones económicas, sociales y técnicas con las que se enfrentan las nuevas tecnologías, son el origen del continuo aumento de demanda de valoraciones de fiabilidad.

La estimación de la vida restante, el coste del ciclo de vida, la duración, los márgenes de seguridad, criterios generales de aceptación, vulnerabilidad, utilidad, definición de criterios de proyecto son algunos de los problemas cuya solución se encuentra en la consecución de una correcta valoración de la fiabilidad.

El curso se propone presentar los fundamentos y avances en las aproximaciones teóricas y aplicaciones prácticas de la fiabilidad estructural.

Tratará las distintas disciplinas que constituyen el campo científico de la fiabilidad: teoría de la información, mecanismos de fractura, inspección no destructiva, teoría de probabilidades, etcétera.

Durante el curso se mencionarán un número de temas centrales: métodos básicos, tratamiento de incertidumbres, modelos estocásticos, procesos de daños y predicción de vida, combinación de cargas, uso de sistemas expertos, aplicaciones.

El curso se dirige a personas relacionadas con la aplicación y desarrollo de métodos de fiabilidad en proyecto, prueba y valoración de seguridad de estructuras. Para hacerlo útil tanto a principiantes como a expertos empezará con una revisión comprensiva de principios básicos y posteriormente se extenderá a temas avanzados.

BIBLIOGRAFIA.—Agosto-septiembre 1989

32. Construcción naval (tecnología propia)

2.821. **Introduction of technical electronic data processing for design and construction at Schichau Unterweser AG (SUAG).**
A. Delius.
"Hansa". Febrero 1986.

2.822. **Covaygas —a steam to steam conversion.**
J. Parga.
"Marine Engineers Review". Agosto 1984.

2.823. **Experience with installation of the main hydroturbogear assembly at ship repair yard** (en ruso).
A. Matveichuk.
"Sudostroenie". Octubre 1984.

2.824. **Developed plate expansion using geodesics.**
J. Clements.
"Marine Technology". Octubre 1984.

2.825. **Friction welding and J-laying of pipes.**
A. Johansen.
"Norwegian Maritime Research". 1984.

2.826. **Recent technology advances and their application to the U.S. Merchant fleet.**
E. Brady.
"Society of Naval Architects and Marine Engineers". Marzo 1984.

2.827. **Investigation of lauching of ships and offshore structures from horizontal berth by tipping table principle.**
I. Senjanovic y otros.
"International Shipbuilding Progress". Diciembre 1986.

2.828. **The salvage of MV Essi Silje and Lloyd's Arbitration Hearing.**
E. Chan.
"Marine Technology". Enero 1987.

2.829. **Evaluating ease of construction of inland ship hulls** (en ruso).
V. Golland y V. Karaastelin.
"Sudostroenie". Septiembre 1987.

2.830. **Robotisation of production processes in shipbuilding** (en ruso).
S. Titkov.
"Sudostroenie". Octubre 1984.

2.831. **Analysis of motion elements of ship's bow at end lauching.**
N. Nikolaev.
"Sudostroenie". Diciembre 1986.

2.832. **Salvage of stranded tankers with the aid of computers.**
J. Clay.
"Marine Technology". Octubre 1985.

2.833. **The products and the progress.**
"Marine Engineers Review". Octubre 1986.

2.834. **The principle of basic unification and increasing ease of construction of ships.**
I. Spassky y S. Bass.
"Sudostroenie". Mayo 1987.

2.835. **HICADEC: integrated CAD/CAM system with 3D interactive date processing architectures for CIMS in shipbuilding.**
M. Kanou y otros.
"Journal of the Society of Naval Architects of Japan". Vol. 160. Diciembre 1986.

2.836. **Areas of flexible automation in assembly/welding operations in modular construction of fishing vessels** (en ruso).
G. Volynkin.
"Sudostroenie". Febrero 1988.

2.837. **Problems of the application of modular construction methods in shippbuilding** (en ruso).
D. Ivanov e Y. Kireev.
"Sudostroenie". Febrero 1988.

2.838. **Competitive bilding in the shipbuilding industry: strategies and decision modeling.**
A. Friis.
"Journal of Ship Production". Marzo 1984.

2.839. **International conference on the problems of the developing maritime world; UAE 1987.**
"Institute of Marine Engineers Transactions". Vol. 99. 1987.

2.840. **The establishment of shipbuilding construction tolerances.**
J. Butler y T. Warren.
"Journal of Ship Production". Marzo 1987.

2.841. **The effect of welding cables on production schedules and costs: a case study.**
M. Agee, M. Jones y C. Galgocy.
"Journal of Ship Production". Agosto 1987.

2.842. **An integrated procedure for hull design and production.**
R. Di Luca.
"Journal of Ship Production". Agosto 1987.

2.843. **The challenge of automation in shipbuilding.**
D. Waller.
"Transactions of the North East Coast Institution of Engineers & Shipbuilders". Septiembre 1987.

2.844. **Approval of quality assurance system of shipyards for the construction of hulls of steel ships.**
"Bureau Veritas". Marzo 1986.

2.845. **Modular method of arrangement of ship spaces V. Tkachenco y V. Voloshko.**
"Sudostroenie". Noviembre 1988.

2.846. **Prerequisites for the development of automated preproduction system for repair** (en ruso).
V. Belov y F. Repin.
"Sudostroenie". Noviembre 1988.

2.847. **Ways of providing ship hull construction accuracy on the building berth** (en ruso).
L. Adlerstein.
"Sudostroenie". Diciembre 1988.

2.848. **Integrated mechanisation of piping and machinery installation in shipbuilding** (en ruso).
A. Khaustov.
"Sudostroenie". Diciembre 1988.

2.849. **U.S. maritime assistance in perspective.**
J. Zeien.
"Marine Technology". Julio 1988.

2.850. **Polish shipyards emerging from troubles.**
A. Golebiowski.
"Schiff und Hafen". Septiembre 1988.