UN LIBRO QUE HAY QUE LEER

Víctor SAN JUAN SÁNCHEZ

Introducción

OR muy hostiles que seamos a la lectura, pocos son los profesionales o simples aficionados a la mar que no hayan oído hablar de obras universales como *Trafalgar* de Benito Pérez Galdós, *Moby Dick* de Herman Melville o *El Corazón de las Tinieblas* de Joseph Conrad que, siendo literatura de evasión, resultan relativamente fáciles de difundir, cosechando altos grados de aceptación entre el público, especialmente del sector náutico. Otro cantar, sin embargo, son los libros técnicos, que «repelen» de forma natural a un cierto número de lectores, los cuales se muestran incapaces de concederles ni la más mínima oportunidad, dejándolos para los eruditos o profesionales cualificados. Puede, sin embargo, que esto sea un error y que, al evitar difundir determinado tipo de obras, lo que estemos haciendo sea ocultar al gran público con ganas e interés los méritos de nuestros mejores marinos, que forman parte intrínseca de una historia conocida, pero cuya obra no sabemos apreciar.

Lo cierto es que ellos, lejos de pretender ser populares por sus actos, seguramente hubieran preferido ser apreciados por su obra. Es posible que con ningún personaje sea esto más cierto que con el jefe de escuadra, técnico, científico, profesor, embajador, espía y aventurero don Jorge Juan y Santacilia, al que la mayor parte de los madrileños únicamente identifican por la céntrica calle de su nombre; su obra, el *Examen Marítimo,* resulta sorprendentemente desconocida dentro del mundillo náutico en general, cuando, en mi modesta opinión, debería ser de conocimiento obligado no solamente en la Escuela de Ingenieros Navales y en la Escuela Naval, sino también para cual-

quiera que pretenda obtener el título de capitán de la Marina Mercante, capitán de yate e incluso de una embarcación pesquera.

Jorge Juan, en su día, demostró con su talento inquisitivo ser capaz de desentrañar los más íntimos secretos de un barco de vela; así, cualquier profesional de la construcción naval, o afecto a ella, tendría por sí mismo que mostrar interés en seguir sus pasos, como el discípulo sigue, silencioso y humilde, las explicaciones del maestro.

Un compendio del saber

El *Examen Marítimo* no es la única obra, pero sí la *magnum opus* de Jorge Juan, aquella que, tras la experiencia constructiva, científica y docente de toda una vida, significa un compendio que generosamente, sin considerarse propietario de tanta sabiduría ni dueño alguno de «derechos», el autor lega a la posteridad. El *Examen Marítimo Teórico Práctico o Tratado de Mecánica aplicado a la construcción, conocimiento y manejo de los navíos y demás embarcaciones* se publicó solamente dos años antes de la muerte de Santacilia, en 1771, a cargo del editor Francisco Manuel de Mena. De forma sorprendente, únicamente tardó diez años en publicarse en Francia, pues, según el traductor Levêque, «Aun se han visto demasiado a menudo navíos muy malos salir de las manos de ingenieros de los que deberían esperarse obras de la mayor perfección, y eso por haberlos ejecutado según la sola especulación, sin someter sus planos a un cálculo riguroso». Presenta al autor como «Jorge Juan, uno de los más célebres geómetras y de los más grandes hombres de mar de Europa», lo cual, viniendo de donde viene, no podía ser sino justa valoración.

Dentro de su género, la obra no es original. Existen tratados precedentes que tratan de aplicar principios físicos, mecánicos y científicos a la construcción naval, teoría del buque, maniobra y forma de conducir el navío velero sobre la mar, entre los que destacan el *Doctrine of Naval Architecture,* de Anthony Deane, publicado en 1670*; L'Architecture Navale,* de Dassié (1677), o el *Shipbuilders Assistant,* de William Sutherland (1711). En 1720, Antonio Gaztañeta Iturribalzaga, asentador, constructor real y almirante, publica *Proporciones de las Medidas más Esenciales para la Fábrica de Navíos y Fragatas de Guerra*. Pero los tres textos avanzados técnico-científicos del siglo XVIII son la obra de Johann Bernoulli *Essay d'une nouvelle Théorie de la Manoeuvre del Vaisseaux (Ensayo de una nueva Teoría de la Maniobra de los Bajeles)* de 1727, el libro del físico Leonardo Eulero *Scientia Navalis, Tractatus de Construendis ac Dirigiendis Navibus,* de 1746*,* que se tradujo del latín en 1773 en Francia como *Theorie Complete de la Construction et la Manoeuvre des Vaisseaux (Teoría Completa de la Construcción y la Maniobra de los Bajeles)*, aunque siempre conocida dentro del gremio como el *Scientia Nava-*

lis, y por último, Pierre Bouguer, científico y geómetra francés en cuya expedición al Perú participó Jorge Juan, editaba en 1749 el *Traité du Navire, de sa Construction et de ses Mouvements,* en París, a cargo de Jombert. Estas tres últimas obras son los apoyos que Jorge Juan usa para construir su *Examen Marítimo* que, coherente con el significado del título —examen significa averiguar la verdad—, racionaliza y critica sin ambages cuanto debe para aportar con sus hallazgos una nueva y deslumbrante forma de entender la construcción naval moderna, contrastando con todo lo anterior.

El contenido

Desgraciadamente, en nuestros tiempos, el título de *Examen Marítimo* ya suena a algo plúmbeo; la portada del siglo XVIII —solamente apta para bibliófilos—, reconozcámoslo, no ayuda, siendo su contenido lo único que puede reivindicarlo; únicamente queda, pues, profundizar en él, compatibilizando admiración con la sana intención divulgativa. Tratemos de acercar al lector un texto que, renovado, en el futuro debería servir para entretenimiento de alumnos náuticos, como es *El Examen Marítimo para Megatorpes* o *Jorge Juan para Nautas no iniciados*. El tomo primero de los dos que componen el *Examen Marítimo* intimida si decimos que contiene 162 proposiciones, 59 definiciones, 586 corolarios, 110 escolios y seis lemas; sin embargo, con un poco de paciencia, comprobaremos que el contenido es conclusión de muy enjundiosos trabajos previos del autor, ahorrados al lector para ofrecerle un resultado final simple y sin complicaciones. Jorge Juan nos enseña que la

EXAMEN MARITIMO
Theórico Práctico,
ó
TRATADO DE MECHANICA
aplicado á la
CONSTRUCCION,
CONOCIMIENTO Y MANEJO DE LOS NAVIOS
y demas Embarcaciones.

Por D. JORGE JUAN,
Comendador de Aliaga en la Orden de San Juan, Xefe de Esquadra de la Real Armada, Capitan de la Compañia de Guardias Marinas, de la Real Sociedad de Londres, y de la Academia Real de Berlin.

TOMO PRIMERO.

EN MADRID:
En la Imprenta de D. Francisco Manuel de Mena, Calle de las Carretas.

M.DCC.LXXI.
Con permiso Superior.

Examen Marítimo. (Archivo RGM).

profunda preparación teórica debe ser imprescindible compañera de viaje de todo el que pretenda un sólido conocimiento práctico.

En el *Examen,* revisa primero la Teoría de las Resistencias, vinculadas estas por Bouguer y Euler al cuadrado de las velocidades. Luego rebate el argumento considerándolas dependientes de las velocidades simples y senos de incidencia, en línea con Isaac Newton, puesto que el fluido, agua de mar, está afectado por la gravedad. En segundo lugar, profundiza en la Teoría de las Velocidades viento-barco, ya que Bouguer asegura en el *Traité du Navire* que un navío no puede andar más que la cuarta parte (100/356) de la velocidad del viento que lo impulsa, con todo el velamen a popa o a un largo; Jorge Juan discute ampliamente esta afirmación, concluyendo, como veremos, que no existe nada que impida a la embarcación navegar a la misma velocidad del viento, convirtiéndose, con ello, en precursor de la Teoría del Viento Aparente y las grandes superficies vélicas de los modernos veleros en nuestros días. Un velero potente y aerodinámico es capaz de crear su propio viento, navegando así más rápido que la velocidad del viento. El marino español asevera, apoyándose en su experiencia, que no es lo mismo navegar en popa, con viento aparente y sin presión en el velamen, que a un largo, cuando aparecen ambas circunstancias. Si se parte de una velocidad errónea, dice, ninguno de los cálculos de ángulos formados entre las velas y el viento, el timón o la deriva pueden ser correctos.

Los temas de estudio del *Examen Marítimo* son: «Fuerza del Viento en las Velas, Curvatura de las Velas, Fuerza del Agua sobre el Casco, Deriva, Escora, Acción del Timón, Balance y Cabezada, Maniobra de las Velas, Aguante de Vela, Efecto de las Olas y los Golpes de Mar y el Quebranto». Tenemos así un tratado completo de toda la problemática que afecta al buque de vela, respaldado por el sólido conocimiento físico y científico expuesto en forma previa y certificado por experiencia empírica y realidad. El propio autor confiesa en un párrafo, tantas veces reproducido y que emociona, hablando de su obra: «Era menester empezar por seguras experiencias que acreditasen la duda de las resistencias; buscar después por vías diversas, o por las mismas con que actúa la naturaleza, otra teórica de ellas; y últimamente, examinar si esta convenía no solamente con la marcha de los navíos, sino con todas sus acciones y asimismo con todos los efectos o movimientos que en la Naturaleza se observan. El empeño, aunque arduo, produjo aún mucho más de lo que yo mismo esperaba».

El *Examen Marítimo* se estructura en dos tomos: el primero, dividido en dos libros («Mecánica, Hidrostática»), y el segundo, compuesto de cinco («La Nave, Centros y Momentos, Machinas, Arquitectura Naval y Aplicación Práctica»), a su vez subdivididos en capítulos. Las machinas, en la época de Jorge Juan, son las velas, el timón y el remo, pues estamos, no lo olvidemos, en época en que galeras, chalupas y demás embarcaciones de remo aún constan en servicio en las armadas mediterráneas, y el interés del científico naval no

podía olvidarlas. En pro de una divulgación comprensible, se suele denominar «Arquitectura Naval» a un libro que Jorge Juan titula *Del andar o movimiento progresivo que da al navío el impulso del viento en las velas y el rumbo que le obliga a seguir,* es decir, la aplicación de la Teoría de Velas al buque determinando los efectos de aquellas sobre este (velocidad directa y lateral, deriva o abatimiento y trepada a barlovento, escora y asiento), lo cual viene a ser base de supuestos para planificar y materializar una embarcación de vela, o sea, la Arquitectura o Diseño Naval, término que el autor no emplea pero sí materializa mejor que nadie en su tiempo.

Profundizando en detalles

El tomo primero constituye un aporte de principios físicos en los que va a descansar toda su teoría; el libro primero es un tratado de Mecánica general, que comienza corrigiendo a Bouguer en la generalización de fuerzas no iguales ni perpendiculares; también a Bernoulli en la situación del eje de rotación, definiendo las llamadas fuerzas *vivas* y *muertas*. Se exponen los experimentos de Gravesande en greda, Bilfinger y Amontons sobre fricción, cuyas teorías de Euler discuten. Por último, se interna en la Teoría de la Cuña sobre un plano inclinado, efectuando diferentes observaciones acerca de la palanca. Todo este desarrollo científico incomprensible para el profano no es sino proveerse del aparato físico y matemático teórico para lo que vendrá después. Existe una poderosa razón histórica para ello: cuando el marqués de la Ensenada envía a Jorge Juan y Ulloa a Inglaterra para su célebre operación de «espionaje», lo hace consciente de la escasez de bagaje científico, en lo referente a Mecánica, que padecen los grandes proyectos navales españoles. Adquirirlo es, pues, prioridad estratégica para nuestros astilleros, quedando finalmente lo aprendido plasmado en el *Examen*.

En el libro segundo del tomo primero entra de lleno en la Hidrostática, titulándolo *Del Equilibrio de los Fluidos y la Fuerza con que actúan en Reposo*. Aparece la fórmula para hallar la resistencia de un diferencial de superficie en movimiento, entrando también al debate de este cálculo en comparación con el de Wallis, que lo hace depender únicamente de la velocidad, y el de Euler, al que critica, pues obtiene un peso de líquido disparatado. De nuevo se decanta por los enunciados de Newton, con resistencias en razón duplicada de las velocidades, aun cuando no esté de acuerdo con sus experimentos. La conclusión es que «las resistencias no siguen ni la ley de las simples velocidade, ni la de los cuadrados, sino que varían según las circunstancias y disposición de las superficies impelidas por los fluidos». Podría parecer curioso que empelucados caballeros del siglo XVIII se dedicaran a arrastrar por el agua plaquitas de metal en diferentes posiciones buscando una formulación para la resistencia encontrada; detrás de ello subyace la necesidad de determinar con

Retrato de Jorge Juan (grabado). Real Observatorio de la Armada. (Archivo RGM).

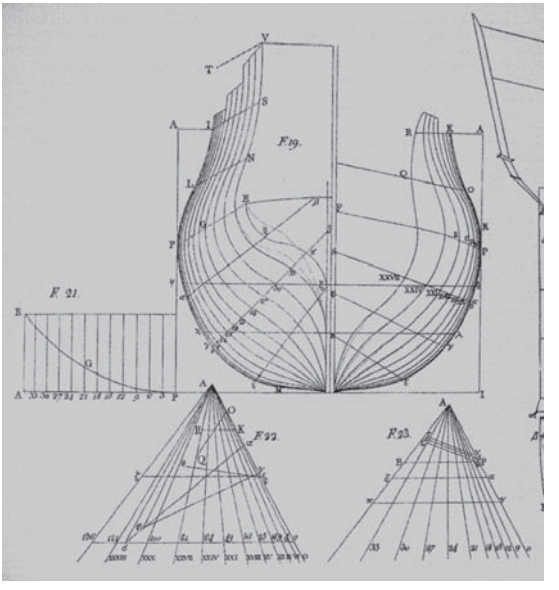
exactitud cuál era, por el agua, la resistencia total del casco de un navío, parámetro imprescindible para definir las mejores formas de la obra viva de forma científica y no intuitiva, como venían haciendo desde tiempos inmemoriales los carpinteros de ribera tallando sus maquetas desmontables de medio casco con la navaja.

El hecho es de tal importancia que nos traslada, en pleno siglo XVIII, a los albores de los canales de pruebas y experimentación, donde se optimizan maquetas del casco llenas de sensores para detectar las fricciones. Jorge Juan culmina calculando dos diferentes fuerzas para las resistencias según se mueva la superficie (la plaquita) o el fluido (el agua). Termina discrepando con Newton al caer el fluido por gravedad, comparando luego sus resultados con los realizados en el Sena por Mariotte , cuya interpretación rebate. Elabora finalmente una Teoría de la Ola propia, hallando la velocidad de las olas supuestas cicloidales; calcula los momentos de un paralelepípedo (el casco) en movimiento a través de un fluido, en lo que rebate a Bouguer y Euler por hacer este cálculo en reposo y estudiar solamente escoras pequeñas, invalidando así el resultado cuando la arista del paralelepípedo sale del agua con mayor escora. Otro error es considerar el área de la flotación escorada constante cuando va variando con la escora. Estamos aquí en la antesala de un dato fundamental para el moderno diseñador naval, el coeficiente prismático, que Jorge Juan posiblemente intuyó sin llegar a su definición matemática.

Concluido el denso tomo primero, entremos en el segundo, en el que el «navío virtual» que existe en la mente de Jorge Juan va a ir tomando forma. El libro primero se titula *De la Construcción de la Nave*; en él, Jorge Juan intro-

duce nomenclatura y términos marineros, como timón, cubierta, velas y sus tipos, eslora, manga, roda, codaste, cuadernas, línea del fuerte, obra viva y muerta, etc. Siempre expresará las medidas en pies ingleses, nunca de Burgos, y en pro de la compatibilización más absoluta llama, como Bouguer y Euler, «profundidad» al calado, «fondos» a la carena, «derecha» a estribor y así un largo etcétera, destinado a integrar su obra dentro del contexto europeo, a cuyas asociaciones pertenecía. El capítulo 1 de este libro primero define la nave en general, mientras el capítulo 2 trata «De la infinita variedad de buques que pueden resultar y la fábrica del cuerpo de la nave», introduciendo el catálogo con una vasta tipología ajena a las clasificaciones típicas de cada país. En el capítulo 3 expone qué son los planos y las normas a emplear en ellos, con la quilla del buque horizontal y la «caja de cuadernas» con la popa hacia la izquierda; finaliza criticando los hábitos franceses de dar excesiva astilla muerta y corregir planos «alisando» las formas.

En el capítulo 4 Jorge Juan se «remanga», manos a la obra, para «dibujar», determinando la mejor forma de ejecutar planos de navíos «según practican los constructores más especulativos y prácticos», es decir, los ingleses, por cuyo trazado muestra preferencia. El capítulo 5 define el cuerpo de la nave mediante las cuadernas: se acabaron los «artistas», y entran en juego los geómetras. El «programa de diseño» del *Examen Marítimo* exige definir cada cuaderna con arcos de círculo por métodos geométricos. Parte de un sólido en revolución como elipsoide con eje paralelo a la quilla, curvando el eje en los planos vertical y horizontal hasta llegar a las formas, certificando así la suavidad y continuidad de la carena. Igualmente —capítulo 6— se define la obra muerta: Jorge Juan evalúa los métodos francés e inglés que tan bien conoce, concluyendo que es posible determinar formas de las obras muertas con criterios geométricos propios a partir de la deformación de un sólido en revolución, el mismo sistema empleado en la obra viva. Las cubiertas se especifican en el capítulo 7 con la crítica cues-



Grabado del *Examen Maritimo Theórico Práctico* de Jorge Juan Santacilia. (Archivo RGM).

tión de lograr el francobordo necesario para las portas de la batería baja, de forma que no entre el agua por ellas cuando escore el navío: se propone para ello dar arrufo interior a las cubiertas como forma de prevenir la caída de los extremos cuando se produce el inevitable quebranto, no con objeto de evitarlo. Esta sugerencia representa un avance abismal con respecto al procedimiento de los carpinteros de ribera, que únicamente compensan el quebranto, mientras Jorge Juan mira más allá, dándolo por hecho y aprovechando el arrufo para mantener las portas secas. Disponemos así de los elementos para «crear» nuestro barco sobre el papel; pero antes hemos de considerar otras cuestiones de gran importancia.

El libro segundo es la moderna Teoría del Buque: *Examen del Cuerpo del Navío, sus Centros, Fuerzas, Resistencias y Momentos que padece*. El capítulo 1 trata del crítico asunto del peso del casco y total del buque y la línea de flotación. Como el constructor experimentado sabe cómo ha de flotar su navío, aconseja emplear los principios de la Hidrostática (tratados en el tomo primero) para determinar la línea de flotación. En el plano experimental, aparecen datos reales de tres ejemplos, una fragata de 22 cañones, un navío de 60 y otro de 70 cañones, calculando el volumen que desalojan por el método de descomponer en prismas la parte sumergida, cuya suma da el volumen total. Para el cálculo hidrostático se usan trapecios, haciendo integrales como Bouguer. Resta entonces acoplar el volumen del navío con su peso, para lo que sugiere llenar menos las cuadernas —¿y qué pasa con los métodos geométricos?— o retocar las medidas del barco. Obtiene que una fragata de 25.170 pies cúbicos pesaría 16,04 quintales (de 1.600 onzas castellanas), el navío de 60 cañones de 68.650 pies cúbicos pesaría 43,75 quintales y el de 70 cañones y 96.500 pies cúbicos, 61,499 quintales. Comparando este último con un navío francés similar, que con 90.260 pies cúbicos pesa 57,522 quintales, resulta más ligero y de formas menos llenas que con su sistema, lo que viene a ser una generosa presentación de los navíos de Gautier, jefe de las construcciones navales españolas en aquel momento.

Disponiendo del peso, en el capítulo 2 nos internamos en parámetros básicos de diseño como el *Centro de Volumen,* es decir, el Centro de Carena, o centro de gravedad de la superficie sumergida (CC). De nuevo usa prismas integrados para determinar la posición del CC sobre la cuaderna maestra y cómo cambia al modificar el volumen, calado o formas del fondo, llegando a la conclusión de que si se le «llena» más, flotará sobre el agua un volumen igual al añadido. El capítulo 3 obtiene el metacentro M, es decir, con el barco escorado, la intersección de la vertical que pasa por CC con el plano longitudinal de simetría; se ve obligado a ampliar el estudio de Bouguer para grandes escoras, lo que hace subir al metacentro. Calcula radios metacéntricos (CC-M) y compara los transversales con los longitudinales en navíos de porte semejante; una vez más, estamos en puertas de las curvas de estabilidad, imprescindibles hoy día. Por fin, el capítulo 4 muestra una forma de hallar el centro de

gravedad (CG), demostrándonos Jorge Juan su conocimiento práctico de métodos clásicos, como el «dar pendoles», es decir, el empleado en barcos para limpiar una faja de la obra viva trasladando todos los pesos, cañones, toneles, etc., a una banda para que el barco escore. Conocidos los pesos y el sitio que ocuparon, calcula los momentos como suma de productos de los pesos por las distancias horizontales que se han trasladado. Otra vez lo determina para cuatro categorías de buques, fragata y navíos de 60, 70 y 80 cañones.

El capítulo 5 se titula «De las Resistencias Horizontales que padece la Nave»: son dos, la resistencia al avance, calculada dividiendo el forro en cuadrículas, y las llamadas «desnivelaciones» causadas por el oleaje, que estima pequeñas e incluso despreciables para navíos de gran porte. El capítulo 6, «De los Momentos que padece el Navío en su movimiento Horizontal, con respecto a un eje horizontal, que llaman los marineros Aguante de Vela», se complementa con el 7, donde se halla lo mismo «Con respecto a un eje vertical que pasa por el Centro de Gravedad». En el primer caso realiza el cálculo de los momentos producidos por la deriva y la escora, rebatiendo una vez más a Bouguer, que solamente considera la sección de flotación para el aguante de vela. Jorge Juan estima la magnitud del momento adrizante del CG y llega a que un centro de gravedad bajo permite aguantar mucha vela, pero es perjudicial para el balance; el buque, en esto como en otras muchas cosas, resulta compromiso en el que hay que incrementar los parámetros potenciando las cualidades que se esperan de él según el plan de uso al que esté destinado.

Los dos capítulos finales (8 y 9) tratan del «Balance y Cabezada», o sea, los momentos que afectan al navío al rotar sobre un eje horizontal, y el último, del «Quebranto», por el que el navío cede transversalmente. Bouguer de nuevo es puesto en solfa para el balance, pues Jorge Juan cree que este y la cabezada deben estudiarse sin distinguir cabezada de arfada; procede al cálculo en consecuencia. Asimilando el casco con una viga sometida a flexión para hallar el quebranto, puede aplicar principios de Mecánica del tomo 1, afirmando que la curva de pesos es constante a lo largo de la eslora, y que el quebranto únicamente puede ser soportado por las propias fibras de la madera y la unión, enlace, trabazón y fuerza de los herrajes y elementos de cierre entre las diferentes piezas del casco. Cualquier debilidad o juego provocado por mala construcción, esfuerzos o simple vejez lo incrementará, llegándose así al desmantelamiento del casco.

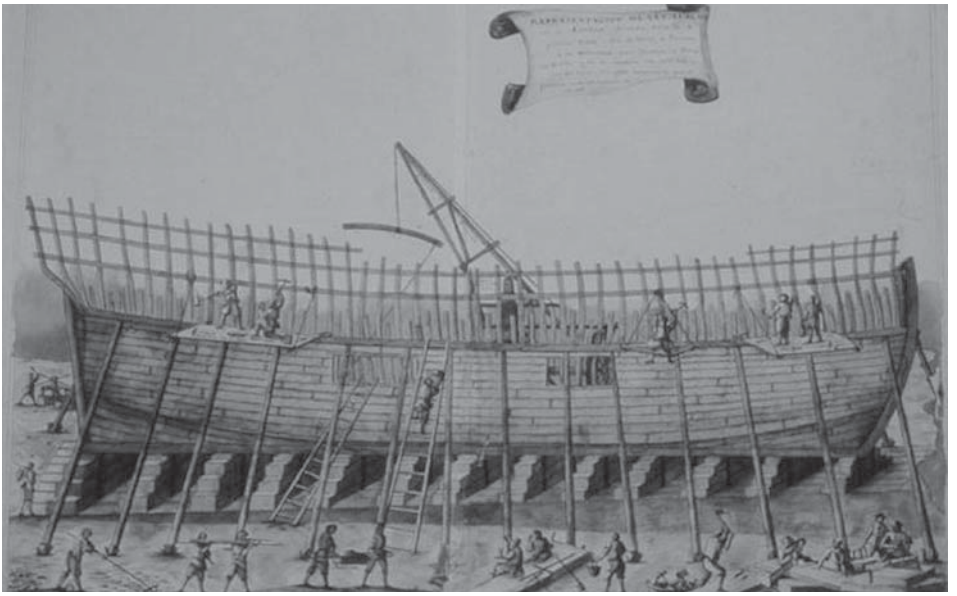
Geniales intuiciones

A continuación, encontramos un apasionante análisis sobre las conclusiones de Bouguer en su *Traité du Navire*: el científico francés propone la discusión de si las baterías alta y baja de un navío de 70 cañones deben llevar piezas homogéneas (de 24 libras) o si es mejor que la baja lleve piezas de 36 y

la alta de a 18 libras; en función de los momentos que soporta la estructura del navío, Bouguer declara más favorable el último caso. Pero Jorge Juan resulta insobornable: se aviene a la conclusión, pero no por los mismos motivos, pues considera que Bouguer olvida los momentos de inercia. Con cañones tan grandes en la batería baja puede que el navío sea estable y no pierda los palos con temporal, pero corre riesgo de ser desmantelado, ya que la batería alta, a pesar de los cañones más ligeros, soporta tres veces más esfuerzos que la baja. Esta agudeza es característica en la obra de Jorge Juan, y podemos imaginar la animosidad que produciría en los autores consagrados en la materia que se vieran corregidos de forma muy precisa.

En el libro tercero pasamos al viento y las velas: *De las Machinas que mueven y gobiernan el Navío, velas, timón y remos*. El capítulo «De las Velas y la Fuerza que hace el Viento sobre ellas» comienza discutiendo las tesis de Bernoulli sobre curvatura de las velas, cuya vigencia incluso alcanza nuestros días; Jorge Juan afirma que la fuerza no es proporcional al cuadrado de la velocidad, y, para demostrarlo, elabora la fórmula de fuerza del aire inelástico sobre una vela, deduciendo la altura de la capa de aire en función de la presión atmosférica (medida por el barómetro, instrumento revolucionario en ese momento). Concluye que la fuerza en el seno de la vela depende de la curvatura exacta del lienzo, disminuyendo con la excesiva concavidad, superficie demasiado ancha o deformidad de la tela; son certezas con las que podría estar de acuerdo cualquier fabricante de velas actual, formuladas hace ¡dos siglos y medio! Las velas han de ser poco extensas, estrechas, fuertes y escasamente deformables. Busca el respaldo de la experiencia, pues en ceñida son superiores los navíos con velas sólidas y bien aplanadas. Nos quedamos, estupefactos, a un paso del plano aerodinámico del siglo XXI (como las alas de los aviones dispuestas verticalmente) en esta parte del *Examen Marítimo,* que deslumbra por su brillantez. No podía menos que divertirse a continuación efectuando experiencias con ello, para mostrar la forma de hallar el centro vélico de cada vela, del barco y la disposición de los palos para óptimo comportamiento del velero.

El timón, como no podía ser de otra manera, crea problemas específicos en los que entra Jorge Juan a debate, incansable. Halla cuál es la mejor forma de la pala, trapezoidal pero estrecha por la parte superior, analizando su efecto en navegación con factores como densidad del agua, velocidad del buque, base de la pala, altura mojada de la misma, ángulo que forma con la quilla con cada metida de timón y el ángulo de deriva. El resultado del cálculo coincide plenamente con la experiencia, lo que le permite discrepar abiertamente con geómetras que pretenden resolver este problema basándose en que la resistencia son cuadrados de las velocidades o senos de ángulos de incidencia. Con claridad meridiana, Jorge Juan demuestra que la causa de la virada es el par que se forma entre el centro de gravedad del barco por la distancia horizontal al centro de resistencia en el agua de la pala; experimentalmente, en un velero



(Archivo RGM).

se debe hacer más fuerza en la pala al arribar a sotavento que orzando a barlovento; resulta más difícil arribar que orzar (sobre todo con viento fresco) a causa de la diferencia de pares.

Por último, no perderse el peculiar capítulo del remo, apasionante y muy indicativo de la ambición y escrupulosidad del autor; involucra, evidentemente, a las galeras, todavía prestando servicio en armadas mediterráneas, embarcaciones menores de servicio, tren naval e industrias civiles, pesca y cabotaje. Manifiesta su desacuerdo con Bouguer, pero no con Euler, hallando la fórmula de la velocidad a remo en función de fuerzas, momentos y fatigas de los remeros. Bouguer prefiere el remo corto por la parte exterior, aumentando superficie de la pala para una mayor velocidad, lo que es interpretación de momentos simples y no de inercia, por la que llega a que una pala infinita debería dar velocidad infinita. Avisado de la equivocación, Euler hace hincapié en que la resistencia del fluido será el cuadrado de las velocidades. Jorge Juan llega con su fórmula como aire fresco al relacionar la velocidad con la longitud del guión (del tolete a la mano del remero), velocidad de las manos, cantidad de fuerza ejercida por los remeros, densidad del fluido, resistencia de la proa, distancia de la borda al tolete, distancia de la borda al centro de fuerzas de la pala y velocidad de este centro, resistencia de las palas, número de remos, tiempo de palada, tiempo de retorno a palear, peso del remo y espacio que ocupa la pala en el agua, sin quedar exhausto en el proceso.

La justificación de un sistema

El libro cuarto del segundo tomo es puerto final de arribada que de por sí justifica todo el *Examen Marítimo*. Nos internamos en un auténtico curso de arquitectura naval para veleros del siglo XVIII, que sintetiza toda la teoría previa de acción de las velas para aplicarla al buque, determinando velocidades directa y lateral, la deriva o abatimiento y la trepada o subida a barlovento, como también el efecto de escora y el asiento en el gobierno del buque y las viradas. Se desentrañan así todas las claves del comportamiento en la mar de la embarcación a vela, de modo que, con un cálculo completo y escrupuloso, se puedan predecir y determinar las mejores cualidades de un buque a vela desde la mesa de diseño. La revolución es total, e implica la llegada al mundo moderno del diseño y construcción de barcos.

El capítulo 1 trata «Del andar o movimiento progresivo que da al Navío el Impulso del Viento en las Velas y el Rumbo que le obliga a seguir». Jorge Juan invalida toda teoría precedente cuando afirma que la velocidad del buque y la del viento son equiparables: «El navío puede, bien dispuestas sus velas, tomar una velocidad casi igual a la del viento que le impele». Calcula para la demostración cuatro velocidades: directa, lateral, oblicua y de trepada y, a través del área de las velas, velocidad del viento, velocidad del buque, velocidad lateral, velocidad oblicua y velocidad de trepada a barlovento para concluir cuáles son los óptimos ángulos respectivos entre el viento y las vergas que sostienen las velas, estas y la quilla y el ángulo viento-quilla. Luego determina de nuevo que la vela óptima es aplanada y no flexible, pues aumenta las respectivas velocidades, deduciendo así el mínimo de área de velamen que necesita un velero para navegar a más velocidad que el viento en función del coeficiente de resistencia lateral y de resistencia directa. Concluye de esta forma que un navío de 80 cañones difícilmente llegará a este punto, pero una galera lo supera con facilidad. Pasa entonces a analizar todos estos resultados en función de sus experiencias en Cádiz y, para finalizar, añade la curvatura de las velas a los cálculos de Bernoulli, hallando distintas velocidades de los navíos a vela sobre la mar con distintas velas y aparejos.

La aportación a la teoría de navegación del velero es muy notable; con su método, Jorge Juan explica, predice, justifica y va corrigiendo todo lo precedente. Obtiene, por ejemplo, que la capacidad de trepada de un navío a barlovento navegando de ceñida, con 17.765 pies cuadrados de velamen y viento de 20 pies por segundo, es de 0,76 millas por hora; luego, en cinco horas lograría remontar 3,8 millas a barlovento. ¿Quién aseguró que un navío de combate no era capaz de ceñir al viento? Jorge Juan lo demuestra matemáticamente: al reducir trapo para un viento de 40 pies por segundo, el navío queda solamente con 11.900 pies cuadrados de velamen, logrando remontar escasas 3,22 millas, suponiendo que no hay golpes de mar y considerando la llamada *ventola* (acción del viento sobre el casco y el aparejo) prácticamente nula.

Aunque toda esta experiencia se traduce, en la realidad, en bordos chinos o planos (sin remontar), la teoría es útil para encontrar las dimensiones del buque óptimas para el máximo rendimiento. Con viento flojo, los buques más pequeños tienen ventaja y son más rápidos por no existir desnivelaciones del fluido; con condiciones de mar gruesa y vientos fuertes los más grandes aguantan mejor, justificándose así su presencia en las armadas más poderosas. Un navío no nivelado verá alteradas sus resistencias y no podrá conservar su velocidad prevista; si la proa es aguda, dará más cabezadas que si la proa es llena. La agitación afecta en este último caso más superficie con ángulos casi rectos, pudiendo andar más, lo que contradice la teoría geométrica de proas agudas para menor resistencia.

El capítulo 2 se titula «De los Angulos que deben formar las Velas y el Viento con la Quilla para conseguir el máximo Andar». No sin demostrar satisfacción por todo lo hallado anteriormente, Jorge Juan calcula el ángulo entre la verga y la quilla despejando de la fórmula de la velocidad directa, llegando así a discrepar con Müller y convenir con Bernoulli «a pesar del error de ambos en las resistencias». El ángulo, dice, no permanece constante, sino que depende de la relación de resistencias en la proa y el costado, la cantidad de trapo y la curvatura de este. Para menor resistencia a proa respecto del costado, menor curvatura y mayor superficie vélica, aumentará la velocidad. La escora, es decir, «la inclinación que toma el navío obligado por la fuerza que hace el viento en las velas», ocupa el capítulo 3, siguiendo a Bouguer en la determinación del centro vélico, imposible de bajar más de un cierto punto. Para un navío de 60 cañones, aferradas las juanetes y demás velas pequeñas, con un rizo en las gavias, calcula una escora de 12º 40´ para un viento de 20 pies/segundo. Con 25 pies/segundo, sería de casi 16º, excesiva, pues se sumergirían en el agua casi un pie las portas de la batería baja, con lo que iría pasado de trapo; así, no resultan válidos los supuestos de Bouguer y Mariotte aplicando más viento para mayor velocidad. Si el barco va pasado de escora se correrán graves peligros, como pasar por la lúa —quedar en facha— con las orzadas producidas por un desmesurado asiento a proa. Es lo que sucedía en los navíos e incluso en los veleros de nuestros días.

El capítulo 4 sienta principios del gobierno del navío con autoridad tras lo anterior; el timón, se afirma, solamente es uno de los resortes de gobierno del buque, y no siempre el más efectivo. Al escorar, el centro vélico cae a sotavento, desplazándose de la vertical del CG, con lo que se inducen momentos de orzada u arribada si no están en el mismo plano, los cuales pueden afectar al gobierno de la embarcación. La precaución del constructor de buques debe ser que los respectivos centros (gravedad, carena, vélico y metacentro) queden correctamente ubicados, o se puedan corregir con facilidad para obtener la correcta ecuación de gobierno. Algunos de los métodos clásicos pueden ser variar los lanzamientos, mover los palos o dividir y reubicar el aparejo. Por último, este libro magistral remata con el «Balance y Cabezada», capítulo 5;

Jorge Juan (British Museum). (Archivo RGM).

Jorge Juan concluye que no se pueden evitar, pero sí atenuarse al máximo sus nocivos efectos, profundizando en la explicación física de ambos, no con soluciones como las propuestas por Euler o Bouguer, que podrían traer pérdidas de aparejo o fallos de la estructura, pues únicamente atienden a la configuración del navío y no a la mar que navega.

Jorge Juan encuentra necesario definir la Fórmula del Período de Balance en función del peso del buque, distancia del CG al metacentro, momentos de inercia de las partes del buque, momentos resistentes del fluido sobre el costado y longitud del péndulo asimilable que debe vibrar esos segundos. Ello le permite aseverar que la fragata *Tritón* no podía hacer balances de 4,5 segundos, como afirma Bouguer. Analizando la fatiga que padecen las fibras del buque y los palos con la inercia, aporta estudios como el del Golpe de Mar, con enorme momento, y el momento resistente representado por la acción amortiguadora de las velas. Tras examinar en profundidad el encuentro del barco con la ola, precisa tres formas de atenuar el balance: que el navío sea isócrono con la ola para no desarbolar; que la altura metacéntrica sea compromiso entre la seguridad de los palos y el embarque de agua, y haber ensanchado las proas y extremos sobre el agua para que hagan de amortiguadores. En una mar llana ha de ser más veloz un navío largo y de proa aguda, pero para mar agitada, son mejores los navíos cortos y de extremidades llenas. La solución podría estar en mover la cuaderna maestra ligeramente a proa de la sección media de la embarcación, lo que, curiosamente, nos lleva a los veleros con «cabeza de bacalao y cola de caballa» de mediados del siglo XIX que corrieron, por ejemplo, la famosa Copa América.

En el quinto y último libro de su obra, Jorge Juan se da cuenta de que es preciso crear un «manual» para todo lo anterior, es decir, recopilar las normas

para que constructores y marinos puedan aprovechar el *Examen* sin sumergirse en sus cálculos. La diferencia de este con otros compendios precedentes es que todo lo que aquí se afirma y aconseja ha pasado previamente por el tamiz crítico, la demostración matemática y la experiencia física del autor, dándole un peso específico incomparable. El capítulo 1 trata de la fortaleza de los navíos, grueso de sus maderas y óptima relación manga-eslora; se decanta por el pino como material constructivo frente al cedro y el roble, pues es un 25 por 100 más ligero que el último. Desgraciadamente, resulta mucho menos duradero, lo que sería causa de la pudrición y retirada prematura de al menos un 10 por 100 de los barcos de su Sistema. El capítulo 2, «De la Magnitud de los Navíos», revisa obras vetustas como las de Fournier, Dassié, Sutherland y Gaztañeta; propone un proyecto comparativo de dos navíos de 60 cañones, el uno dos pies más ancho que el otro, analizando fortaleza, calados, aguante de vela, escoras y costes. En el capítulo 3, «Del aguante de Vela», se trata a fondo la orientación de las vergas; el capítulo 4, «Del andar y rumbo que siguen los Navíos», incorpora todo lo dicho de forma práctica y geométrica, y en el 5, «Del Gobierno del Navío», discute el ángulo óptimo entre el timón y la quilla para lograr el máximo efecto y también la colocación de palos y velas, que reconoce en conocimiento —por la experiencia— de los propios marinos. Por último, y como remate, en el capítulo 6, «Balance y Cabezada», recuerda que nadie ha tenido antes en cuenta la ola, incurriendo en errores de balances y tiempos. Con ello damos por finalizado este somero repaso, casi un sobrevuelo orientativo, por las páginas del *Examen Marítimo* y por la impresión de aquellos eruditos cualificados que lo han analizado; la necesidad de un divulgador práctico que se meta en harina es evidente.

Conclusiones

Un análisis simplista, por desgracia tan frecuente, llevaría a concluir que el *Examen Marítimo* es un denso y profundo tratado de ingeniería naval publicado medio siglo antes de que la navegación a vapor lo dejara completamente atrasado y desfasado, sin utilidad alguna salvo la pericia histórica. No es trabajo sin defectos, entre los que se suelen citar la fijación de Jorge Juan por el navío de entre 60 y 70 cañones, cuando ya en otras armadas se trabajaba con el 74 cañones para la línea de batalla y el de 100 cañones para las insignias; pero este y otros que se hallaran palidecen realmente ante la enorme aportación a la construcción naval de buques de vela del trabajo, que no fue el primero de su siglo, pero sí, probablemente, el más perfeccionado, avanzado, exhaustivo y de mejor contenido.

En la centuria decimonónica, presa de la última moda y avances de la Revolución Industrial, alguien se atrevería a tildarlo de papel mojado, arcaica muestra bibliográfica solamente apta para conservar en museos. Estaban equi-

vocados; si se repasa la construcción naval de veleros durante el siglo XIX, y en concreto la de yates, que perdura hasta nuestros días confundiéndose con la ingeniería aeronaútica, vemos que el *Examen Marítimo* entronca directamente con la construcción de estos buques de vela al predecir el adelantamiento de la cuaderna maestra para prevenir la cabezada, el cálculo de resistencias y los canales de pruebas y, en el punto más brillante, ya con respecto al siglo XX, presagiar el Coeficiente Prismático y la Teoría del Viento Aparente, conceptos que Jorge Juan maneja catapultándose casi al siglo XXI. Cuando Douglas Phillips Birt, en su cursillo *Sailing Yacht Design,* pone sobre la mesa todos estos temas, ignora que su antecedente no es un sesudo científico británico, sino un marino y erudito español de nombre Jorge Juan.

Todo ello nos permite verle como un pionero sagaz y acertado, que intuyó el compromiso de diseño entre las diferentes cualidades de un buque, lo que supone desentrañar el más íntimo secreto de la construcción de veleros, pues no existe el barco perfecto, sino el que es optimizado para el uso que se le va a dar, lo que supone para los diseñadores modernos disponer en sus ordenadores de un cúmulo infinito de coeficientes de afinamiento y optimización, cuyos primeros números, de forma matemática y completamente científica e intuitiva, trazó un caballero español de mediados del siglo XVIII, sin calculadora ni PC a su disposición. Si Jorge Juan hubiera podido navegar en nuestros veleros de hoy día, remontando el viento a 26º a velocidades próximas a él, tal vez una profunda emoción hubiera embargado su ánimo al tener la certeza de que el viaje a través del tiempo le otorgaba toda la razón.

BIBLIOGRAFÍA

CERVERA PERY, José: *La Marina de La Ilustración*, Editorial San Martín, Madrid, 1986.

VV. AA.: *El Buque en La Armada Española*, Sílex ediciones, Madrid, 1981.

FERNÁNDEZ GONZÁLEZ, Francisco: *La Arquitectura Naval en el «Examen Marítimo»,* Cádiz, 2010.

JUAN Y SANTACILIA, Jorge: *Examen Marítimo; Tratado Práctico o Tratado de Mechanica aplicado á la Construcción, Conocimiento y Manejo de los Navíos y demás Embarcaciones,* Imprenta de Francisco Manuel de Mena, calle Carretas, Madrid, 1771.

SAN JUAN SÁNCHEZ, Víctor: *La Armada Desconocida de Jorge Juan*, Ediciones Nowtilus, Madrid, 2015.

SIMÓN CALERO, Julián: *La Mecánica de Fluidos en Jorge Juan,* INTA, Madrid, 1996.

SOLER PASCUAL, Emilio: *Viajes de Jorge Juan y Santacilia*, Ediciones B, Barcelona, 2002.