

LA TECNOLOGÍA DE LA MADERA PARA LA ARQUITECTURA NAVAL EN LA ÉPOCA DE JORGE JUAN

Gaspar de ARANDA y ANTÓN
Doctor Ingeniero de Montes

Jorge Juan, científico y técnico de la Ilustración

Sobre la figura de Jorge Juan existe una extensa bibliografía, debido a la importancia de su figura tanto en la ciencia como en la técnica española del siglo XVIII. Por tanto, este trabajo sólo tratará de la labor que como oficial de Marina llevó a cabo en la industria naval relacionada con la tecnología de la madera para su empleo en la construcción de navíos, tanto en lo tocante a las características físicas de las mismas para el diseño de la arquitectura naval como en lo referente a su puesta en obra y tratamiento para su mejor comportamiento en el medio marino.

Menéndez Pelayo, en *La ciencia española*, dice analizando la obra de Jorge Juan, y en especial el *Examen marítimo*: «Aunque es libro de matemáticas aplicadas, ofrece también mucho de interés par las matemáticas puras» (1).

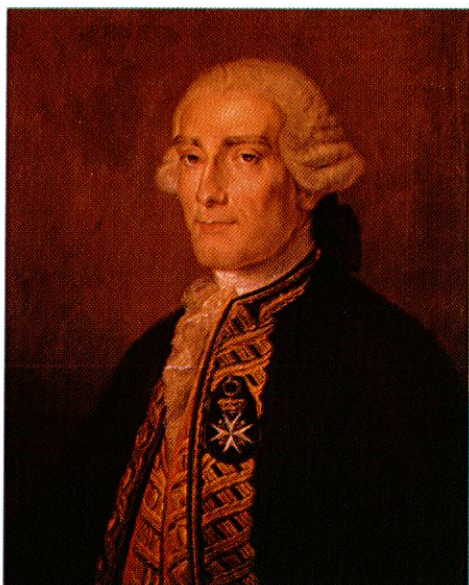
Jorge Juan interviene en la organización de la industria naval y en la puesta en servicio de diferentes navíos, supervisando la selección de los árboles, las cortas, los despiecees, la conservación y puesta en obra de las maderas...

(1) El *Examen marítimo* está dividido en dos tomos; el primero es un tratado de geometría y mecánica, en que se hace especial referencia a los principios que determinan el movimiento en los fluidos; el segundo es la parte práctica de lo explicado en el primero. En los distintos libros de que se compone estudia la construcción de la nave, el examen del cuerpo del navío, de su centros, fuerzas, resistencias y de los momentos que padece, de las máquinas que mueven y gobiernan la velocidad, balance en el andar y de su fortaleza estructural.

García Frías, en el prólogo de la edición facsímil del Instituto de España, editada en el año 1968, entre otras muchas cosas recogidas en este trabajo dice: «El EXAMEN MARÍTIMO es el primer libro que trata de la construcción naval con fundamentos racionales, armonizando la teoría con la práctica, pues hasta su aparición, en el año 1771, en todas las naciones se trabajaba siguiendo meras reglas empíricas (también mediante coeficientes dimensionales según rangos) ignorando los más elementales principios de la geometría y la mecánica».

La obra tuvo una amplia difusión entre los constructores navales europeos. Se publicó en Londres, en el año 1774, y en Francia (1783), para reeditarse posteriormente en España en 1793, en edición de Gabriel de Ciscar, y en 1804, en edición aumentada y corregida.

Jerónimo Lalande, en su obra *Abregé de Navigation, Historique, Theorique et Pratique*, publicada en París en 1773, dice respecto al *Examen marítimo*: «Contiene la mejor teoría de la resistencia de fluidos, de la construcción y de la maniobra de los navíos; es uno de los mejores libros de mecánica aplicada a la Marina; y no es exagerado recomendar su uso a los que son amantes de la ciencia».



Jorge Juan Santacilia. Museo Naval, Madrid

Además, da por primera vez en España tratamiento científico al diseño y comportamiento náutico del buque, mediante los experimentos que lleva a cabo en la bahía de Cádiz.

Vive entre los años 1713 y 1773, en una actividad plena de inquietudes y de creatividad intelectual, unidas a un estricto sentido del deber y de su responsabilidad como oficial de la Armada y, por tanto, como servidor de la Corona.

Entre los años 1746 y 1759 colabora con la Administración durante el próspero reinado de Fernando VI. En 1748 es enviado por el marqués de la Ensenada en misión secreta a Inglaterra, para conocer la industria naval de aquel país, los métodos constructivos en arquitectura naval y las formas de

gestión industrial, a fin de aplicar esos conocimientos al ambicioso Plan de Fomento de la Marina, que se inicia en el año 1752 (2).

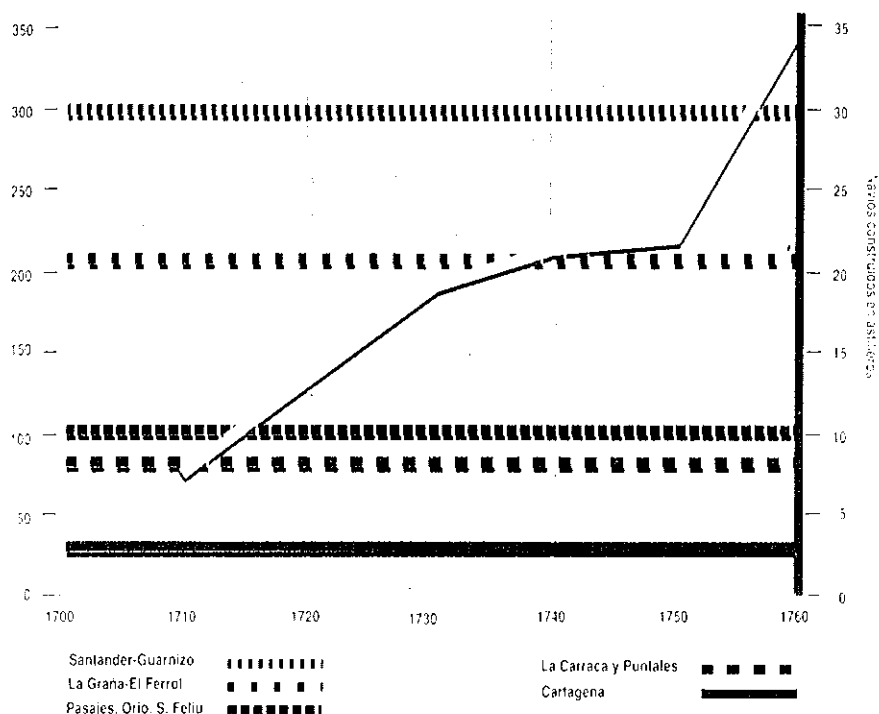
La formación científica y técnica de Jorge Juan es la propia de un ilustrado del siglo XVIII, época cuyo espíritu se recopila en el saber contenido en *La Encyclopédie ou Dictionnaire des Sciences, des Arts et des Métiers*, de Diderot y D'Alambert, que ve la luz entre 1752 y 1772. Nuestro protagonista se interesa vivamente por la obra de Euclides, Galileo, Copérnico y, muy especialmente, por la *Philosophiae Naturalis, Principia Mathematica*, publicada por Newton en 1687.

También llega a conocer el empirismo, la corriente epistemológica encarnada por filósofos como Locke y Hume, que preconizaba la observación como única fuente del conocimiento. El empirismo, con su exaltación del saber científico basado en el ensayo práctico, origina una nueva concepción del cosmos.

(2) El marqués de la Ensenada, en *Idea de lo que aparece en el proceso*, afirmaba: «No hay potencia en el mundo que necesite más de las fuerzas marítimas que España, pues es península, y tiene que guardar los vastísimos dominios de América que le pertenecen».

La duración del viaje a Inglaterra fue de quince meses (noviembre de 1748 a junio de 1750), siendo embajador ante la corte de San Jaime Ricardo Wall. Los cometidos de ese viaje de «espionaje» fueron diversos: llegar a conocer el desarrollo naval inglés, el movimiento de sus puertos, el régimen de los aranceles portuarios, las exenciones fiscales para la industria naval, la actividad de las fábricas de velas y jarcias..., además de facetas de la construcción naval tales como técnicas de diseño, funcionamiento y organización de arsenales, empleo de «bombas de fuego» para agotamiento de diques de carenas, organización de las fábricas de géneros textiles y el método de enseñanza para los marinos.

LA TECNOLOGÍA DE LA MADERA PARA LA ARQUITECTURA NAVAL EN LA ÉPOCA...



Navíos construidos en astilleros en el período 1710-1760 y consumo acumulado de madera de roble por la Marina (G. de Aranda).

Su amplia formación científica le hace destacar junto con Antonio de Ulloa, Orfila, Bails, Tofiño, Alcalá Galiano y Agustín de Betancourt, trasladando la enseñanza de las matemáticas y de las ciencias naturales, hasta entonces lideradas por los jesuitas, a ambientes más laicos, con la inapreciable ayuda de las políticas públicas de corte masónico impulsadas por las tendencias ilustradas más extremas. Como consecuencia de esa explosión de saberes e iniciativas, en el reinado de Carlos III nacen instituciones artesanales y agrarias como las Reales Fábricas y las Sociedades Económicas de Amigos del País y, cómo no, se crean y organizan racionalmente astilleros y arsenales, lo que permitió que floreciese una industria española de la construcción naval, tanto en la Península como en Ultramar. Benito Jerónimo de Feijoo, en su *Teatro crítico*, caracterizaba el saber ilustrado como un eclecticismo donde se aúnan el pensamiento práctico inglés con la claridad expositiva de la racionalidad de Descartes, proponiendo soluciones equilibradas alejadas de todo radicalismo.

Fue Jorge Juan, además de un gran matemático, un apasionado investigador y estudioso de la ciencia que perteneció a las Reales Sociedades Científicas de Londres y París y a la Academia Real de Berlín. Creador del

Real Gabinete de Máquinas junto con Agustín de Betancourt, supervisó la construcción de los arsenales y diques de carenas de Ferrol y Cartagena. En este último, junto a Julián Sánchez Bort, desarrolló e instaló máquinas de vapor (la «máquina de fuego»), para agotar el agua del gran dique. Habiendo alcanzado el grado de jefe de escuadara de la Real Armada, dirigió el Seminario de Nobles en Madrid y el Centro Astronómico de la Marina de Puerto Real (1753) y fue capitán de la Compañía de Guardias Marinas de San Fernando (1751). En 1771 publica obras como *Examen marítimo, teórico práctico o tratado de mecánica aplicado a la construcción, conocimiento y manejo de los navíos y demás embarcaciones* y *Del saber de la Astronomía*. Participó en su juventud en expediciones científicas ultramarinas, como la de La Condamine (donde conoció a Pierre Bouguer) para la medición del arco del meridiano terrestre en el ecuador, expedición cuyas vicisitudes dio a conocer en *Relación histórica del viaje a la América Meridional de Jorge Juan y Antonio de Ulloa y Observaciones astronómicas y físicas*. El apéndice que publicó años después, *Estado de la Astronomía en la Europa de 1765*, le llevó a enfrentamientos con los censores de la Inquisición por su fundamentación en la astronomía y física de Newton y el reconocimiento del sistema heliocéntrico de Copérnico (3). Por último publicó *Noticias secretas de América*. Escrita entre los años 1735 y 1745 en

(3) FISAS, Carlos: *Historias de la Historia*, 1984. Hasta muy entrados en el siglo XVIII, las «ciencias» astrológicas ejercieron una notable influencia en todas las ramas del saber en España; por ello se daba la regla siguiente:

*Nos dio sangría galeno
en conjunción cuarto lleno
ni estando luna en León
ni en el signo de Escorpión.
Los médicos prohibieron
el purgar cuando está en Aries
o en Virgo o León la luna,
enfrió o caniculares*

Al respecto se cuenta que en el siglo XVI, Francisco Vallés, médico de Felipe II, habiendo propuesto a la Junta del Protomedicato purgar al Monarca, vio cómo esta sugerencia era rechazada por estar la Luna en fase inadecuada, a lo que respondió Vallés con sorna: «¡Cerrad la ventana!, ya se la dará sin que la luna se entere».

La expedición a Perú se realizó entre los años 1735 y 1745, organizada por la Academia de Ciencias de París. A su mando se hallaba el matemático Louis Godin, aunque se la conoce con el nombre de otro de sus integrantes: el naturalista La Condamine.

Además de matemático, fue Jorge Juan astrónomo, cosmógrafo y diplomático, y en el campo específico de la actividad de la industria naval intervino en la modernización de los astilleros de La Habana y Guarnizo y, muy directamente, en la construcción de los arsenales de Cartagena y Ferrol (sustituyendo al anticuado de La Graña). Fue asimismo visitador de las minas de Almadén y de la fábrica de artillería de La Cavada.

Miguel Sanz, secretario que fue del ilustre marino, en su *Breve historia*, editada en 1774, dice: «A su ingenio sutil, perspicaz viveza y pronta penetración, acompañaba un laboriosísimo genio con que, cultivando sus talentos, supo enriquecer las ciencias e ilustrar la nación».

forma de ensayo por encargo del marqués de la Ensenada, en ella se criticaban los abusos y desmanes cometidos contra los indígenas por la Administración colonial española en América. Su divulgación fue impedida por la Corona, y sólo gracias a la sustracción de un ejemplar de la biblioteca del Palacio Real de Madrid, el editor londinense David Barny pudo publicarla en el año 1826.

Guillén Tato, en su libro *Los tenientes de navío don Jorge Juan y Santacilia y don Antonio de Ulloa de la Torre-Guiral y la medición del meridiano*, pone de manifiesto la contribución científica de Jorge Juan a la arquitectura naval de su siglo, tan necesitada de un impulso teórico en los campos de la mecánica y de la geometría, con las siguientes palabras: «Existía ya, sin embargo, en el siglo XVII, el cálculo y la mecánica, y era preciso que el buque se sometiera a sus leyes para sacar consecuencias precisas que muchos años de culta ignorancia no habían podido alcanzar ni prever; porque ninguna materia necesitaba más de la luz de las matemáticas (...) es cierto que ninguna había estado tan privada de ésta como la fábrica de navíos».

Resumiendo en lo posible la figura de Jorge Juan como arquitecto naval, se puede decir que las fuentes en que bebió fueron las concepciones teóricas francesas, a las que tuvo acceso en los múltiples tratados de la ciencia naval publicados en el siglo XVIII, y las técnicas observadas el poco tiempo que estuvo en Inglaterra (1748-1749), para cuya aplicación en España se trajo maestros constructores británicos. De esta amalgama resultó una concepción ecléctica, atenta siempre a los sistemas en boga y presidida por la experimentación continua.

La arquitectura naval del navío de línea en el siglo XVIII

El escritor francés Víctor Hugo, en su novela *Los miserables*, hace una descripción literaria del navío de línea:

«El navío de línea es una de las combinaciones más magníficas del genio del hombre con el poder de la naturaleza, pues el navío de línea está compuesto a la vez de lo más pesado y de lo más ligero, porque tiene que habérselas al mismo tiempo con las tres formas de sustancia, la sólida, la líquida y la gaseosa, y porque debe luchar con las tres. Tiene once garras de hierro para asir el granito en el fondo del mar, y más alas y más antenas que los insectos para tomar el viento entre las nubes. Su respiración sale por sus 120 cañones como por enormes clarines, y responde al rayo con firmeza. El océano trata de extraviarlo en la horrible similitud de sus olas, pero el navío tiene alma, su brújula, que le aconseja y le señala el norte. En las noches negras, sus fanales suplen a las estrellas. Así pues, contra el viento tiene la cuerda y la lona; contra el agua, la madera; contra la roca, el hierro, el cobre y el plomo; contra la sombra, la luz; contra la inmensidad, una aguja».

El diseño español

El diseño naval en España antes de Jorge Juan lleva la impronta de Antonio Gaztañeta (4), quien desarrolló su labor en el astillero de Guarnizo en 1732. A su sistema se le achacaba falta de solidez en las ligazones, además de adolecer los navíos de una eslora exagerada en relación con la manga y peso de la artillería, lo cual derivaba en continuas carenas y reparaciones y, en consecuencia, en un escaso tiempo de vida útil para la embarcación. En contraste con estas críticas, nuestros competidores ingleses llenaron de elogios este diseño e incluso construyeron algunos buques inspirados en él (5). Con su patrón se construyeron varios buques en el astillero de La Habana en el año 1748, entre ellos el navío *El Rayo*, hundido en la batalla de Trafalgar después de cincuenta y seis años de servicio, y los también navíos *Real Felipe*, *Princesa* y *Glorioso*, cuyos maestros constructores fueron los franceses Ciprián Autrán y Juan Pedro Boyer.

Respecto a este diseño dice Jorge Juan: «En nuestros navíos españoles contruidos por Gaztañeta, las cuadernas iban tan unidas como a la inglesa; pero las uniones ó empalmes de unas piezas con otras eran menores; lo que disminuía cada pieza de pie y medio u (*sic*) dos pies en su largo, que importaba en todo alrededor de 1.000 quintales de peso que se le quitaban al navío; siempre era un alivio; pero obra falsa, como saben los buenos constructores».

El diseño francés

Los trabajos de Fournier en el año 1643 y los de Bouguer en el año 1746, en su *Traité du navire*, son el arranque y el cenit del diseño del navío de línea francés. En éste, para su estudio morfológico e hidrodinámico, se descompone la carena en volúmenes elementales que sirven de base para calcular el volumen total de desplazamiento, la eslora y la manga, la composición de los puentes de baterías y el tipo de calibres; de esta manera se determina con fiabilidad suficiente la teórica línea de agua y se da al buque la estabilidad conveniente. Todo este estudio entraña un cuidadoso tratamiento de la forma de las piezas de madera constituyentes de la estructura, para su ensamblaje y ajuste, y de las labores previas de carácter selvícola, como guías y podas, para obtener del árbol las formas más convenientes.

Se consiguen buques más grandes y mejor artillados adoptando el sistema estructural de la doble cuaderna, que confiere al navío mayor consistencia, y del doble armazón, que incrementa el grosor de los costados hasta espesores

(4) GAZTAÑETA ITURRIVALAZAGA, A. de: *Proporciones más esenciales para la fábrica de navíos y fragatas de guerra que pueden montar desde 60 hasta 100 cañones, con la explicación de la construcción de la varenga maestra, plano y perfil particular de un navío de 70 cañones con los largos, gruesos y anchos de los materiales escritos de orden del Rey*, 1721

(5) ARANDA, G. de: *La influencia de Duhamel du Monceau en la arquitectura naval del siglo XVII*, 2002.

próximos a los 60 centímetros; en cuanto a las piezas, se construyen de mayores dimensiones mediante las técnicas de los ensambles tanto en *cola de milano* como en *rayo de Júpiter*. Se generaliza el timón de rueda, que sustituye a la barra horizontal, más complicada en su manejo a la vez que más endeble como medio de gobierno en el navío, y se incrementa el empleo de las bombas de achique y mejora el complejo sistema vélico creando velas nuevas como la estay. En este período se llega a desplazamientos que oscilan entre las 1.200 toneladas en los navíos de tercera clase hasta las 4.000 o más de los de alto porte. Es en Francia donde se desarrolla durante el siglo XVIII el navío de dos puentes y de 74 cañones, que se convierte en el más característico de su época por sus excelentes características para la maniobra y para una óptima utilización de toda la potencia de fuego (6).

Respecto a este diseño, que reduce el peso de navío al utilizar menor cantidad de madera y herrajes, apuntaba Jorge Juan: «Los franceses dan mayor distancia entre las cuadernas, no ponen tampoco tanta curbería (*sic*), de suerte que un navío de 70 cañones con 46 pies ingleses de manga sólo ocupó 90.260, que equivalen a 57.522 quintales de peso».

El diseño inglés

El diseño inglés genuino es el más empírico de los existentes en el siglo XVIII en Europa; prueba de ello son las maquetas y modelos en escala reducida que se hacían de los buques antes de su construcción en el astillero, para así probar y modificar los comportamientos marineros de la embarcación.

Los ingleses Phineas y Peter Pett construyeron el navío *Sovereign of the Seas* en el año 1637, durante el reinado de Jacobo I y de Carlos Estuardo. El buque pasó por múltiples modificaciones en su diseño y carenas, fruto de los continuos ensayos y pruebas que experimentó tanto en los astilleros de Woolwich como en Chatham (7).

Constructores afamados de la época fueron Anthony Deane, al cual se deben numerosos buques de «third rate», además de ser el autor del libro *Doctrine of Naval Architecture*, y Thomas Slade, que diseñó el navío *Victory* (8), el cual se

(6) *Ibidem*.

(7) Era inicialmente el *Sovereign of the Seas* un navío de tres puentes de primera clase con más de 100 cañones. Presentaba problemas de estabilidad, por lo que fue sometido a amplias reformas y transformaciones, coronadas las cuales pasó a llamarse *Royal Sovereign* en 1654, con un desplazamiento de 1.637 toneladas y una eslora de 71 metros. Intervino en la batalla de Beachy Head contra la Flota francesa y se perdió en un incendio en el año 1696.

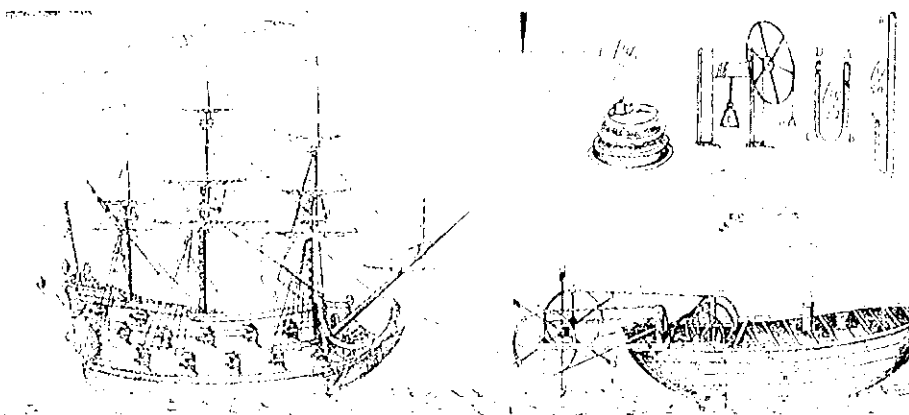
(8) Navío de tres puentes, artillado con 106 cañones, y con un desplazamiento de 3.225 toneladas y una eslora de 69. Fue construido de manera similar al *San Felipe*, diseñado por Gaztañeta. Para la construcción de su quilla se utilizó madera de olmo de medio metro de espesor, y para el armazón, madera de encina. La tablazón interna y la externa eran de encina del Báltico y ambas estaban formadas por tres estratos de 12 cm de espesor. En el año 1780 se forró su carena con 3.923 placas de cobre, para evitar la acción destructora de los moluscos marinos, en especial del *Teredo navalis* o broma. Dicho forro tenía un peso de 17 toneladas.



Arquitectos navales en el Almirantazgo. Museo Nacional de la Marina, Greenwich (Inglaterra).

botó en el año 1765 (copiando las proporciones de Gaztañeta, de resultas de la captura del navío *Princesa*) y participó en la batalla de Trafalgar al mando del almirante Nelson.

Según Pujante, en el siglo XVIII, los ingleses desarrollaron un navío más pequeño usando como método de construcción un ensamblaje de tipo modu-



Primer buque propulsado a vapor, 1730. Musco Naval de la Marina, Greenwich (Inglaterra).

lar, haciendo más rápido el armazón estructural del buque. Este sistema recibió en España la denominación de «construcción a la inglesa» (9).

La ciencia náutica en los siglos XVII y XVIII

Evolución histórica

El desarrollo de la arquitectura naval en los siglos XVII y XVIII va unido íntimamente a la evolución de la ciencia náutica, sobre todo en Francia, como demuestra la extensa bibliografía allí publicada. Varios eran los retos pendientes de resolver respecto al comportamiento estructural del navío en la maniobra. Una manera de sistematizar y simplificar la evolución histórica de los conocimientos náuticos es descomponer las distintas etapas según el grado de conocimiento que se tiene del comportamiento del buque ante las solicitaciones a que está sometido.

Los carpinteros de ribera y maestros carpinteros (siglo XVII)

La determinación del centro de gravedad como punto de concentración de las fuerzas gravitatorias se efectuó por Pére Fournier en el año 1643 en su obra *Hydrographie*, donde se hacen consideraciones respecto al cálculo de momentos estabilizantes, se aplica el principio de Arquímedes a los empujes por desplazamiento y se incluye el dibujo de planos elementales mediante el trazado de secciones transversales por medio, a su vez, del trazado de círculos. Más tarde, Dessié, en el año 1677, dibuja en *Architecture navale* planos elementales más completos, como los de François Coulomb; el Chevalier Renau, en el año 1689, en la *Théorie de la manoeuvre des vaisseaux* publica planos para distintos portes de buques; en fin, Pére Hoste, en el año 1697, en la *Théorie de la construction des vaisseaux*, determina correctamente el centro de gravedad y el centro de carena, éste sobre la vertical del anterior, e inicia los estudios sobre la resistencia al avance del buque, capítulo donde determina la posición y comportamiento del metacentro y se extiende en justificaciones teóricas sobre la estabilidad al vuelco y la existencia y consecuencias de la energía cinética en la maniobra.

El Consejo de Construcciones nace en Francia en el año 1671, y el primer nombramiento de maestro carpintero data de 1674; por último, diez años después se nombra un inspector de construcciones.

(9) JUAN SANTACILIA, Jorge: *Examen marítimo, theórico práctico o tratado de mecánica aplicado a la construcción, conocimiento y manejo de los navíos y demás embarcaciones*, 1771.

Los maestros constructores (período de 1701 a 1770)

Antes de la aparición de Pierre Bouguer, la ciencia náutica había conseguido ciertos logros, como la determinación en 1729 de la capacidad de las carenas y el cálculo del armamento en función del desplazamiento. Bemouilli, en su *Traité d'Hydrodynamique* (1748), se había planteado teóricamente la resistencia del navío al avance en la maniobra y el equilibrio entre masas y volúmenes en el diseño de la arquitectura naval. La organización de la industria naval militar había creado en Francia en el año 1717, en los diferentes arsenales (Brest, Tolón y La Rochelle), el cargo de jefe de construcciones, con competencias administrativas y técnicas, figura que más tarde sería importada por España.

Con Pierre Bouguer y su *Traité du navire* (1746) se produce un avance significativo en la ciencia y la tecnología de la construcción naval, de la que Jorge Juan sería un alumno aventajado. Bouguer sienta las bases para los cálculos de los centros de carena y de gravedad, del volumen de carena y del desplazamiento; se descubre el balance náutico, el metacentro y el desarrollo metacéntrico y la estabilidad al viento, mediante el estudio de la posición del punto vélico y del gobierno del buque considerando el concepto de energía cinética.

En 1740 se inicia en Francia la etapa más fructífera de fomento de la Marina. Ese año se crea la Escuela de Constructores de París, cuya versión española, la llamada Junta de Construcciones (creada para poner en marcha el Plan del marqués de la Ensenada), presidiría Jorge Juan en 1752. La figura de Duhamel du Monceau destaca como impulsor de esta corriente racionalizadora de la construcción naval, con su vademécum *Elements d'Architecture Navale, ou traité pratique de la construction des vaisseaux*, publicado en el año 1752 y que compete con los tratados de construcción naval de Blaise Ollivier, Pierre Morineau y Vials de Chairbois. La obra de Du Monceau servirá de texto a los marinos españoles encargados de la industria naval del siglo XVIII y coincide con la fundación de la Academia de Marina de París y las posteriores Ordenanzas francesas de 1765, que crearon la Escuela de Ingenieros Navales de Francia.

Se habían revelado los secretos de la construcción naval, celosamente guardados por los distintos gremios y cofradías de los maestros constructores y carpinteros de ribera, y difundido la teoría y la técnica navales; el secretismo empírico de los ingleses tocaba así a su fin.

En España, la organización naval en el ámbito institucional empieza con el nombramiento de Patiño, en 1717, como intendente general de Marina, a imitación de la Administración gala. Años más tarde aparecen las Ordenanzas de Arsenales y la institución del Almirantazgo (1737) y un año después se fija el número de embarcaciones que debería tener la Armada, así como su distribución entre los distintos departamentos: Cádiz, Ferrol y Cartagena, que nacen en el año 1726 junto a sus anexos, los arsenales. Aquéllos pertenecen a la jurisdicción militar, cuyo ejercicio correspondía al capitán general; éstos, a la civil, bajo la dirección del intendente del departamento.

LA TECNOLOGÍA DE LA MADERA PARA LA ARQUITECTURA NAVAL EN LA ÉPOCA...

La puesta en marcha en el reinado de Carlos III de las últimas iniciativas organizativas de la Administración de Marina relegaron el modelo constructivo de Jorge Juan en provecho del de Jean-François Gautier, discípulo de Pierre Bouguer, para poner en marcha la construcción del navío de 74 cañones (1765). Más tarde, en 1770, se aprueba la creación del Cuerpo de Ingenieros de Marina, siendo Gautier el primer ingeniero general.

Los ingenieros constructores (período de 1771 a 1800)

La *Architectura Navalis Mercatoria*, de Fredrik Chapman, publicada en el año 1768, es otro hito en el conocimiento científico de la maniobra del navío. Chapman determina y calcula el centro de carena y explica la utilización precisa del metacentro y la aclaración posicional del punto vélico, hasta entonces errónea. Respecto a los esquemas constructivos, éstos pasan a ser planos ya completos y detallados.

La aparición de la *Encyclopédie Methodique*, publicada por Panckoucke en el año 1786, y del *Traité elementaire*, de Vials du Clairbois, un año después permite calcular las curvas de desplazamiento y establecer la imposibilidad del cálculo del punto vélico. Se completaba así la teoría de la construcción en madera del navío de línea, construcción que se alargaría hasta el primer cuarto del siglo XIX (10), para dar paso al buque de estructura de hierro e impulsado por vapor.

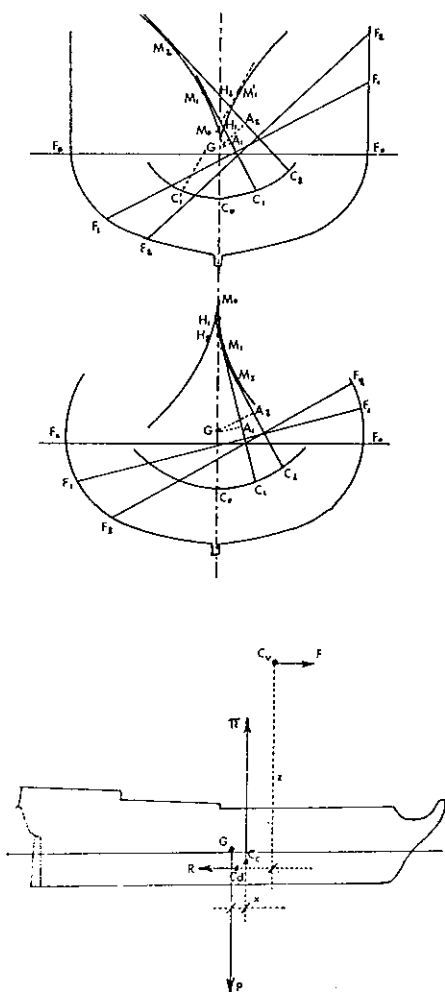
En España aparecen en 1776 las Ordenanzas de Arsenales, deudoras de las francesas de 1765. En 1793 se promulgan las Ordenanzas Generales, completadas en el año 1797, cuando el Cuerpo de Ingenieros Navales queda subordinado a la autoridad militar, bajo cuya jurisdicción quedan también los arsenales.

Es en el año 1788 cuando Julián Martín de Retamosa aúna en su diseño ecléctico de arquitectura naval las aportaciones de los métodos inglés y francés de Jorge Juan, Gautier y Romero Fernández de Landa, para navíos del porte de 80 cañones y fragatas del de 34.

Estado de la teoría de la maniobra en el navío en el siglo XVIII

Hasta finales del siglo XVIII las dimensiones y construcción del buque se basan en reglas prácticas fruto de una larga experiencia transmitida de padres a hijos. Las modificaciones se hacen mediante tanteo, siendo estos cambios ajenos a un razonamiento preciso y menos aún resultado de un cálculo. El principio de Arquímedes, que determina el desplazamiento en peso de la

(10) El *Alexander Nevsky* fue uno de los últimos navíos de línea construidos (1824). Tenía un desplazamiento de 3.200 toneladas y una eslora de 70 metros. Iba armado con 116 cañones en tres puentes, con piezas de 32 a 9 libras.



Equilibrio del navío por la acción del viento (esfuerzo longitudinal).

permite desarrollar la teoría de la estabilidad del buque, avance teórico mayor que el de la mera flotabilidad, por cuanto se puede determinar con precisión la seguridad de equilibrio de la nave.

La estabilidad del navío

La estabilidad inicial o en reposo es el primer desafío que plantea la incipiente ciencia de la maniobra, siendo las sollicitaciones el peso hacia abajo y aplicado en el centro de gravedad, y la presión hidrostática, dirigida hacia arri-

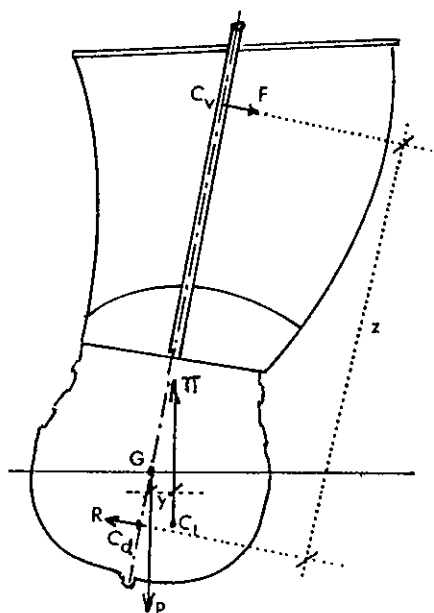
embarcación, es el elemento esencial a tener en cuenta, y la carena se supedita al mismo, siendo por su forma un obstáculo insalvable para el cálculo del volumen. Se necesita tiempo para que los principales parámetros que determinan las cualidades náuticas de los buques sean descritos y dominados.

Composición vectorial de las sollicitaciones en el navío

El mayor conocimiento de la estática y la composición vectorial de las sollicitaciones o fuerzas permiten el tratamiento geométrico de las mismas. La aplicación de los campos vectoriales de fuerzas, con un módulo, dirección y punto de aplicación tanto del peso como del desplazamiento, permite determinar las condiciones de equilibrio del buque; cuando estas sollicitaciones dejan de estar en la misma dirección debido al balanceo, se forma el correspondiente par de fuerzas, que imprimen un movimiento de rotación de intensidad proporcional al par formado; además, la hidrostática introduce el término de «desplazamiento en dirección», opuesto a la gravedad según el principio de Arquímedes. Por ello, el concepto vectorial de las sollicitaciones y la identificación de las mismas en gravitatorias y de desplazamiento

ba y aplicada en el centro de gravedad de la parte sumergida o centro de carena del buque. Para que exista equilibrio, las fuerzas han de ser iguales y opuestas, y ambos centros, el de gravedad y el de carena, estar sobre la misma vertical; el peso del navío se llama *desplazamiento*, y resulta evidente que el volumen desplazado varía con la densidad, que resulta diferente en el agua dulce y en el mar.

Para una inclinación determinada del buque (balanceo) se modifica el centro de carena, pero no el de gravedad. El punto de corte de la vertical que pasa por el centro de empuje, con la dirección que toma en tal caso la línea que pasaba por los centros de gravedad y de presión, define al metacentro, y cuando éste está más alto que el centro de gravedad, el equilibrio es estable. Para cada ángulo de inclinación se define un metacentro, y para que el equilibrio sea estable es condición necesaria que el centro de gravedad esté por debajo de los puntos metacéntricos. Cuando el navío se inclina de una manera continua, el centro de carena se desplaza según una curva, y para un ángulo determinado el metacentro es el centro del círculo, definiéndose el radio metacéntrico, por tanto, cuando el buque se inclina, el centro de carena se desplaza y le corresponden radios metacéntricos diferentes. El lugar geométrico de los metacentros es una curva llamada *desarrollo metacéntrico*, con dos brazos simétricos respecto al eje del navío que convergen en el primer metacentro, correspondiente a la posición derecha del mismo. Los puntos metacéntricos se elevan y la curva opone una resistencia al balanceo; esta forma de carena es la más favorable respecto a la estabilidad. El valor de la superficie de flotación está ligado al radio metacéntrico, por lo que toda disminución de la primera entraña una reducción del segundo.



Equilibrio del navío por la acción del viento (esfuerzo longitudinal).

El equilibrio dinámico del navío

El navío se mueve en el límite de dos fluidos: el viento y el agua. Mediante la disposición de las velas o de los remos se le imprime energía cinética y por tanto velocidad de desplazamiento. Viento y agua oponen resistencia al avance, que depende de la velocidad de desplazamiento del buque y está íntima-

mente relacionado con la forma hidrodinámica de éste (longitud y sección de la carena) y con el régimen del fluido (laminar o turbulento). La velocidad aumenta hasta que la fuerza propulsora del viento se iguala a la resistencia que opone el agua; estas fuerzas separadas tienden a hacer bascular el buque hacia adelante, lo que hace avanzar el centro de carena. La fuerza proporcional a la fuerza del viento se aplica al centro del velamen, punto situado en el centro de gravedad de las velas mayores, orientadas en el plano longitudinal a una altura sobre el centro de deriva. Por otro lado, la resistencia transversal del agua se aplica al propio centro de deriva; estas dos fuerzas forman un par que tiende a inclinar el buque. El segundo par está formado por el peso y el desplazamiento. Las solicitaciones a que está sometida la estructura producen en el navío la deformación de la carena o quebranto; además, la acción simultánea de ambos pares de fuerzas determina la estabilidad dinámica de la embarcación.

El conocimiento teórico de la ciencia náutica del navío en los siglos xvii y xviii

Es en el año 1643 cuando Fournier, en su obra *L'Hydrographie*, define el peso de los cuerpos como característica de los mismos fruto del efecto gravitatorio (11); más tarde, Pére Hoste, en su *Théorie de la construction des vaisseaux*, del año 1697, hace un primer intento para posicionar el centro de gravedad que se resuelve con Pierre Bouguer en su *Traité du navire, de sa construction et de ses mouvements*, del año 1746. Bouguer prevé la estabilidad del navío, el cálculo de la posición del centro de carena, imagina la teoría metacéntrica y el lugar geométrico en cada caso y los desplazamientos de pesos en razón del artillado, así como el desplazamiento del centro de gravedad; la obra en su conjunto es un completo tratado de la ciencia náutica del siglo xviii, dividiéndose en una primera parte dedicada a la construcción del buque y a la elaboración de los planos, una segunda que describe el equilibrio en reposo, y una tercera y última centrada en el buque en movimiento (12). Expone, además, el método para determinar el centro de gravedad de la carena: mediante la descomposición de volúmenes elementales, los cuales determinan un punto que denomina *hypomocion*. Dividiendo los momentos aplicados a cada volumen elemental, conoce la distancia que separa ese punto, arbitrariamente determinado, del centro de gravedad. Si la carena es un cilindro, el metacentro estará situado en su centro (13).

(11) FOURNIER: *L'Hydrographie*, 1643. Para Fournier, el centro de gravedad del navío era el punto «dans lequel se ramasse et unit toute son impétuosité et pesanteur». Y continúa: «es parties demeurantes en la même situation en laquelle elles est ont, se trouveront avoir moments égaux».

(12) BOUGUER: *Traité du navire...*, 1746. El libro segundo se titula *Des vaisseaux considérés à flot mais lorsqu'il ne single pas*.

(13) *Ibidem*. Define el centro de gravedad de la carena como «dans lequel se réunit la opuse verticale de l'eau».

A su vez, Duhamel du Monceau muestra la importancia de la superficie de flotación de un navío para su estabilidad (14).

Años más tarde, Chapman determina el cálculo del volumen de carena y el emplazamiento de su centro, la estabilidad lateral del navío y los cálculos relativos al metacentro (15). Es a finales del siglo XVIII cuando se plantea la determinación del punto vélico (16).

Al final se consigue la determinación de los centros de aplicación de las fuerzas que intervienen en la maniobra, como los de gravedad, de carena, de deriva, de voladura y el metacentro, así como el trazado de las curvas de agua y la variación de la superficie de flotación en función de la inclinación (17).

La arquitectura naval en madera llega a su perfección cuando se consigue representar en proyecciones las diversas partes del navío, mediante secciones longitudinales según la quilla, transversales a ella según la varenga maestra y sobre las líneas de agua.

La evolución de la organización administrativa de la industria naval en los siglos XVII y XVIII

La complejidad que va tomando la arquitectura naval, unida al fomento de los planes de construcción de la Marina de los diferentes países, obliga a que la gestión de la industria de la construcción naval experimente desde un punto de vista administrativo y técnico un desarrollo en consonancia con los retos que impone la política militar estratégica.

De meros astilleros y atarazanas regidos por pequeños armadores y asentistas asesorados por carpinteros de ribera se pasa a la gestión integral, que se realiza en los arsenales a través de las Juntas de Constructores, con la colaboración técnica de los ingenieros navales.

Los comentarios a Jorge Juan y su obra

Aunque Pierre Bouguer fue su maestro (en unión de otras figuras de la ciencia como Isaac Newton y Edme Mariotte, que junto al inglés Robert

(14) DU MONCEAU, Duhamel: *Les éléments de L'Architecture Navale, ou traité pratique de la construction des vaisseaux*; ARANDA, G. de: *op. cit.*

(15) CHAMPAN, F.: *Traité de la construction des vaisseaux*, 1779. Respecto al cálculo del metacentro, dice en la edición francesa: «point au-dessus de la section moyenne du vaisseau sous lequel le centre de gravité doit être nécessairement, si le vaisseau peut parvenir à se tenir droit».

(16) PANCKOCKE (dir.): *L'Encyclopédie Méthodique de Marine*, 1783. «Le centre de voileure s'obtient par un calcul de moments effectué sur la surface des voiles principaux.»

(17) DU CHARBOIS, Vials: *Traité élémentaire de la construction des vaisseaux*, 1787. «On voit qu'on ne pourra faire usage de cette théorie que lorsque l'on connoitra mieux ce qui concerne la résistance ou l'impulsion des fluides: mais eu attendant, elle nous sert à connaitre que la position du métacentre et du centre de gravité de systeme, ne suffisent pas pour déterminer la stabilité sous voiles».

Boyle definió la ley de comprensibilidad de los gases), no por eso dejó Jorge Juan de corregir algunos desarrollos teóricos realizados por el francés, por no estar de conformidad sus fórmulas con los resultados de sus múltiples experimentos en la bahía de Cádiz —que merecieron en el año 1753 el elogio del almirante inglés Howe— respecto a la resistencia de los fluidos. Efectuados tanto en el mar, con modelos de navíos construidos *ex profeso*, como en el aire, por medio de cometas, le permitieron desmontar la conclusión errónea de que la resistencia de un objeto en su avance en un fluido era proporcional a la superficie de choque, al cuadrado del seno del ángulo de incidencia y al cuadrado de la velocidad, dándole Jorge Juan una fórmula más conforme con los resultados empíricos. Por ello, nos dice: «... no es menos maestra [la experiencia], particularmente si, después de bien examinada y despejada de los accidentes que puedan hacerla variar, no se conforma con la teoría».

En el prólogo de su *Examen marítimo* descubre su pensamiento de compaginar la práctica con la teoría: «El especial orden y sublime geometría con que trata todos los asuntos tan gran maestro [refiriéndose a Leonardo Euler y su *Sciencia Navalis...*, publicada el año 1716] es digno de admiración: hubiera sido un tesoro de la ciencia y particularmente de la Marina si a semejante destreza hubiera acompañado la práctica que igualmente deseamos en M. Bouguer [refiriéndose a Pierre Bouguer y su *Traité du navire...*, publicado el año 1746]». Esta crítica fue reconocida por el propio Bouguer en el año 1752, al decir: «Tengo bastantes fundamentos de la teoría; pero confieso que aunque tengo alguna práctica, no es toda la que se necesita; ¡si yo hubiera construido una docena de navíos y tuviera la que es menester!... ».

Años más tarde (1783), Eveque, el traductor en Francia de la obra de Jorge Juan por encargo de la Academia de Ciencias de París, decía al respecto: «El concurso de la teoría y la experiencia es absolutamente necesario para la perfección de la Marina, pero esta concurrencia presentó hasta ahora enormes dificultades»; y continúa: «Don Jorge Juan gozaba de esta rara ventaja en el más alto grado y por ello descubrió leyes muy importantes y ha refutado gran número de ellas que habrán sido aceptadas, sin embargo, sin la menor repugnancia por los hombres más esclarecidos».

Guillén hace un panegírico de la figura de Jorge Juan con las siguientes palabras: «Era pues preciso que un geometra, un físico de la talla de los anteriores, conocidísimo de todos, un verdadero sabio, en fin, compareciese en el palenque científico; pero adornado, a su vez, con todos esos conocimientos y espíritu crítico de las cosas de la mar, que sólo un marino inteligente en su profesión puede adquirir al cabo de dilatada carrera. Su mucha y delicada ciencia, su estudio continuo de la construcción y sus conocimientos prácticos de la maniobra y de la mar, lo guiaron con seguridad en este golfo poco conocido y lleno de peligros, en que habían dado al través tantos grandes ingenios».

Tecnología de la madera en el diseño a la inglesa

La tecnología constructiva importada de Inglaterra por Jorge Juan no fue ajena del todo a los distintos procedimientos constructivos llevados por entonces a cabo en los astilleros españoles, pues una y otros se influyeron mutuamente, de lo que resultó un diseño ecléctico; no obstante, lo que evidentemente cambió en la arquitectura naval fue el más alto contenido teórico del comportamiento de la estructura del buque en la maniobra, y las formas de ensamblaje, para conseguir piezas más ligeras sin menoscabo de su resistencia.

La elección de las maderas

Los señalamientos de los árboles a talar se efectuaban generalmente el año previo a la corta, realizándose ésta a partir del mes de octubre. La tala se prolongaba hasta finales de marzo o mediados de abril, según los años, dependiendo de la actividad de la savia en el árbol.

Una práctica muy corriente era realizar, después de la elección del árbol, su marcado mediante el *hierro* de la Marina y el *chaspé* de señalamiento en su tronco mediante hachuela. A continuación se procedía al descortezado de dos zonas anulares, una próxima al futuro tocón y la otra en el inicio de la cruz de la ramificación, evitando así los problemas de pudrición que se podían presentar si se hacía un descortezado completo del árbol; en el descortezado parcial se profundizaba hasta llegar al *cambium* (estrato celular de las plantas leñosas, responsable del engrosamiento de tallos y raíces, es decir, tejido meristémico de crecimiento), con objeto de evitar la acumulación de almidón en los radios medulares y, a veces, en la albura (capa blanquecina situada detrás de la corteza de las gimnospermas y angiospermas dicotiledóneas de poca dureza, por lo que se rechazaba para la confección de piezas, utilizándose sólo la capa más interna o duramen), siendo la época más apropiada para ejecutarla la prima-vera.

Además del señalamiento y corta de árboles con fustes rectos, se cortaban otros retorcidos y deformados, muy valiosos para «maderas de vuelta» tales como rodas, cuadernas y codastes, entre otras importantes piezas estructurales.

Cortados los árboles, se descortezaban al completo en el astillero antes de que los carpinteros procedieran al aserrado —mediante la sierra de doble mano— y a la primera labra. La maderas se colocaban en pilas cruzadas en tinglados dispuestos al efecto, para su posterior secado al aire; así se evitaba el problema de la formación de *fendas* (rajas al hilo de la madera que suelen producirse cuando se hace un secado irregular), que podían romper las futuras piezas.

En cuanto a las maderas más indicadas para la construcción de un navío, el marino Jorge Juan se extiende con los siguientes comentarios prácticos: «De esto se concluye claramente las grandes ventajas que resultarán de hacer el navío de pino; pues aunque para conservar el aguante de la vela, se deberán

poner 2.955 quintales de lastre más, siempre quedará levantado sobre el agua de 9 pulgadas; por consiguiente, tuviera de esta cantidad más elevada la batería, y sería mucho más velero. O si la batería se considerase suficientemente elevada, se podrá disminuir el puntal de aquella en 9 pulgadas; lo que fuera mucho más ventajoso, no sólo para aguantar más la vela, sino también para andar».

Otras veces hace hincapié sobre el grueso y naturaleza que han de tener las maderas: «Que haciendo un navío de 60 cañones de pino, puede dejarse de la misma fortaleza que otro de roble, y con ello pesar 7.000 quintales menos, con las ventajas que de esto resultan».

Herramientas en la labra y materiales

Las herramientas empleadas para la labra y preparado de las piezas eran muy variadas: el *barreno*, utilizado para perforar la madera; la *azueta*, especie de hacha en forma de azada que adoptaba dos tamaños: una grande para usar con las dos manos, y otra pequeña, para una sola mano (de aquí la división de los operarios en maestros y oficiales de azuela, según su mayor o menor conocimiento en el oficio); la *maceta*, o martillo pequeño; los *hierros de calafate*, parecidos a un escopio y que sirven para ensanchar las costuras y colocar la estopa embreada, a su vez empujada con el hierro de embromar; la *mandarria*, o martillo de hierro de uso a dos manos; la *mordaza de atracar*, que sirve para asentar los maderos entre sí para luego *empernar* (operación de fijación del maderamen con clavos o pernos).

En cuanto a los otros adobios y tintes que entran a formar parte del navío, tenemos: el *almagre* o *tiza roja*, para el marcado y posicionado en la estructura de las piezas de madera; el *alquitrán* o *resina*, que se extrae de la destilación de la madera de pino y se utiliza para proteger la madera de la intemperie; la *brea*, que se compone de alquitrán y sebo y que se usa para rellenar las costuras entre piezas y dar estanquidad a la estructura; el *galipote*, especie de resina en segunda destilación de la madera de pino; la *estopa*, que se obtenía de cabo viejos descolchados de cáñamo o esparto que, estirados en la fibra, se unta con la brea para calafatear las costuras de los forros exteriores del casco e impermeabilizar éste.

Los *clavazones* se componen de una gran gama de formas y tamaños; como los clavos, tanto de fundición de hierro como de bronce y latón, con o sin cabeza, y los arponados, siempre de metal, trabajados a mano con rebabas.

Construcción y ensamblaje

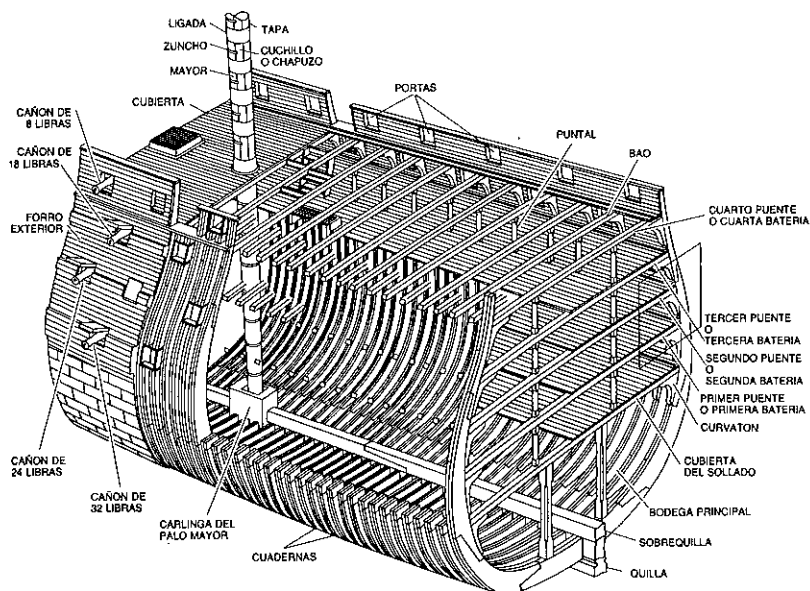
Una de las características que define a cada diseño de arquitectura naval es el acoplamiento de las diferentes piezas y su composición mediante ensamblajes, pues una y otra operación permiten no sólo construir la estructura (por la

dificultad de encontrar los árboles apropiados), sino dar solidez a la misma y de este modo optimizar el comportamiento mecánico del buque.

Este estudio se puede llevar hoy a efecto examinando los pecios que se extraen del fondo de los mares y los navíos del siglo XVIII que aún se conservan; como el *Victory*, del almirante Horacio Nelson, que se encuentra atracado en los muelles de Londres, y el *San Juan Nepomuceno*, de Cosme Churruga, en Portsmouth; el primero, de diseño inglés con anexiones del modelo español de Gaztañeta, y el segundo inspirado en el diseño francés de Gautier. Los suecos, a su vez, rescataron el *Vasas* de la bahía de Estocolmo.

Las piezas de madera que no tienen las longitudes o dimensiones que se demandan en las estructuras del diseño de arquitectura naval, como ocurre generalmente con las quillas, necesitan ser formadas mediante empalmes bien hechos capaces resistir los empujes y presiones que tiene que soportar el buque. Este tipo de empalmes se han conservado hasta hoy por los carpinteros de ribera, y aún se puede ver en las gradas la confección de piezas con empalmes *a tope*, *a media madera*, *en ángulo*, *en mortaja*, y ensambles en sus diversas formas, como *a diente de perro*, *a pico de flauta*, *a rayo de Júpiter*, *a cola de milano*, *a caja y espiga*, entre otros.

Pero tan importante como el diseño es el encastre de ciertas piezas estructurales, para conseguir optimizar su mutuo acoplamiento; entre ellos tenemos el *alefriz* (palabra de origen árabe que alude a una ranura o canal de sección triangular que se abre a lo largo de la quilla, roda y codaste, para que en ella encajen los cantos horizontales de los tablones de traca o hiladas de la cubierta o forro inmediatas al trancañil, y las cabezas de las



Perspectiva. HEBRÓN, J.: *El navío español de línea*, 1985.

hiladas de los demás), o los *tapines*, taquitos de madera con que se cubre la cabeza de los pernos o clavos que sujetan a los baos las tablas de las cubiertas, después de bien embutidos en ellas para proteger las cabezas metálicas y evitar su corrosión.

Las maderas con empalmes, ensambles y encastres dan lugar a piezas como la *zapata*, falsa quilla de madera de pino generalmente empernada en la cara inferior de la quilla para protegerla en caso de varada, siendo los ensambles entre los tablones que la constituyen a tope simple y sujetos a la quilla con cabillas de madera, alternadas con clavos arponados y todos remetidos, tapando los huecos con brea. Las quillas, debido a su longitud, se conforman mediante la unión de varias piezas ensambladas con escarpes a pico de flauta, fijadas con una *chaveta* o pasador de hierro y empernadas; todas estas composiciones dan mayor solidez a la pieza haciéndole mejor cumplir su misión de sollicitación a los esfuerzos mecánico, de tracción y compresión.

La cuaderna requiere también un despiezado, y las varengas, rebajas para su perfecto ensamble, afinando su escantillón hacia el extremo, por lo que se continúan con la primera ligazón, la segunda ligazón, el revés de cuaderna y, por último, el barraganete, que se eleva sobre la cubierta del navío y sirve de antepecho o amurada y a la vez sostiene a la regala; por cuestión de seguridad en la solidez, en casi todos los diseños son piezas dobles, salvo los barraganetes, que son simples, mientras que los empalmes van al tresbolillo, para evitar el quebranto estructural, reforzados con ensambles parejos y clavos arponados, disminuyendo hacia arriba progresivamente de escantillón. Para reforzar las cuadernas se colocan las *bulárcamas*, vigas rectas que unen los forros interiores a la altura de la varenga y de la primera ligazón.

La sobrequilla, sobrepuesta a la quilla, y la varenga de la cuaderna en su parte inferior tienen rebajes para ensamblarse con la varenga, empernándose para lograr más resistencia a las grandes presiones que recibe el casco del buque, presiones tanto estáticas, por su propia estructura, como dinámicas en la maniobra. Como una prolongación de la quilla está la pieza de vuelta denominada *durmiente*, que está acoplada a la contrarroda y a la curva de proel o sobrequilla, con el fin de aumentar la solidez estructural de la viga maestra o quilla, y de bajar el centro de gravedad a fin de garantizar la estabilidad de la embarcación.

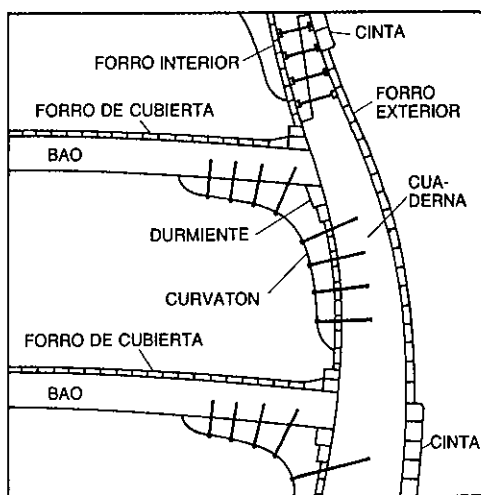
La roda, arrancando de la quilla, recibe en su primer tramo el nombre de *pie de roda*; la contrarroda prolonga la quilla como apoyo del bauprés y en su parte superior sirve de apoyo al tajamar, compuesto por piezas *amadrinadas* (unión pareada de dos piezas para que ambas ofrezcan mayor resistencia) al exterior, formando una curva hacia arriba cuya misión es separar las aguas en el avance del navío. Debido al desgaste de esa pieza por las continuas sollicitaciones mecánicas a que está sometida, para su construcción se empleaba generalmente madera de pino, por razones de facilidad y economía.

La otra pieza estructural que cierra la popa del navío es el *codaste*, que arrancando de la quilla se articula con el timón y donde se apoyan los durmientes de popa, el contracodaste y la curva coral.

Los *baos* son las piezas de curva ensambladas mediante el trancañil a las cuadernas. Su función es de sostén de las cubiertas y junto a la quilla y las cuadernas (que presentan por su aligerado estructural cierta semejanza con las vigas metálicas de diseño Vierendel, que se colocan en naves industriales y puentes) configuran la morfología de viga hueca de la embarcación; estas piezas se refuerzan con las curvas de eslora y las de baos.

Los forros recubren las estructura formando el casco; la tablazón se atraca a tope sobre las cuadernas con clavos y pernos de cobre, más resistentes que el hierro a la corrosión del medio marino.

Arrancando del alefrez de la quilla o aparadura, subiendo con las tablas se llega a la altura de los baos, donde aquéllas aumentan de grosor para así reforzar el casco del buque, recibiendo esas piezas la denominación de *cintas*; en el interior de la cuaderna se coloca otra tablazón que da lugar a los pañoles; por último, se forma la cubierta, de proa a popa y de estribor a babor, apoyándose sobre los baos mediante la fijación con clavos y pernos protegidos por tapines, y todo mediante adobio de calafateado de las juntas tanto del casco como de las cubiertas. Para la construcción de cascos y cubiertas se utilizaba madera de coníferas, especialmente de pino; más tarde, principalmente en los astilleros ultramarinos, se utilizó la madera de teca (18).



Sección transversal por la varenga maestra.
HEBRÓN, J.: *El navío español de línea*, 1985.

Los aparejos, palos y vergas

Los aparejos comprenden la arboladura y el velamen. En el navío le corresponden sobre los tres palos y vergas las velas cuadradas, un bauprés y botalón de foque, foques y estáis y una vela en el palo de mesana llamada *cangreja de popa*.

El navío de línea del siglo XVIII establece como arboladura la disposición de proa a popa de los palos bauprés, trinquete, mayor y mesana; su estructura es de vela cuadrada o cuadra, la cual, según su disposición de proa a popa, se denomina del palo trinquete, de la mayor y del palo mesana, las cuales a su vez se subdividen según su distribución a lo largo de los mástiles, además de las correspondientes al palo bauprés.

(18) CONDE, L.: *La tecnología de la madera en la construcción naval*, 2001.

Respecto a su disposición en los palos, las velas a cuchillo de que disponen cuentan con su verga respectiva; además, hay puntas de cangrejo o botavaras, para orientar la cangreja, así como berlinas y perchas, para orientar el avance del buque según la dirección del viento, por lo que las jarcias, según su empleo, se dividen en aparejo fijo y móvil, siendo las primeras las que mantienen en posición los palos y las vergas. En las segundas figuran estáis, obenques y burdas; los estáis, para sujetar el tope de los mástiles a la mesa de guarnición o a la cofa, y los obenques y burdas, para asegurar los masteleros a la cubierta. Para tales maniobras de posicionamiento de la resistencia vélica ante el impulso del viento se utilizan cabos de cáñamo, de abacá o de fibra de coco, e incluso cadenas de hierro.

La ciencia náutica del siglo XVIII trajo como consecuencia, para mayor rentabilidad, facilidad y velocidad en la maniobra del navío de línea, una complicada disposición de aparejos, jarcias y cabos. De ello resultó una mayor rapidez de crucero y el poder de navegar de bolina, de manera que la dirección del viento y el sentido de la quilla formaran el menor ángulo posible.

El comportamiento de las maderas

La complejidad de las maderas estructurales que forman parte del navío atiende principalmente a cuatro motivos: las características hidrodinámicas de las propias maderas; las diferentes formas que requieren las piezas; el peso propio de las estructuras y la energía cinética en la maniobra, que producen reacciones tanto estáticas como dinámicas que tienen que soportar y absorber las estructuras y, por último, la agresividad del medio marino.

Características mecánicas e hidrodinámicas de las maderas

No todas las maderas guardan la misma configuración estructural, como se desprende del estudio y análisis de las correspondientes secciones: transversales, longitudinales y radiales. Por tanto, es necesario un estudio del comportamiento de la madera según la disposición de sus radios medulares, conformación de sus vasos (angiospermas) o traqueidas (gimnospermas), composición y relación de celulosa y lignina y de las proporciones de albura y duramen, para destinar una madera u otra para la confección de una determinada pieza y que ésta responda favorablemente, mediante su elasticidad, a las sollicitaciones, tanto estáticas como dinámicas a que ha de estar sometida formando parte de la estructura del navío sin que se produzca el quebranto.

Las maderas de los robles, tanto el pedunculado *Quercus robur* como el dentado *Quercus petrae*, reúnen entre los árboles europeos las mejores características para su empleo como piezas estructurales de arquitectura naval, tanto por su dureza y densidad (0,769-0,991) como por su duramen, amplio y

resistente no sólo a las sollicitaciones mecánicas, sino también a los agentes xilófagos (chancros y pudriciones). En cuanto a su resistencia a la humedad y a la inmersión permanente o alternante, es idónea para la construcción naval, por cuanto varía poco sus dimensiones y no presenta por tanto modificaciones en su comportamiento formando parte de un todo estructural, sin olvidar tampoco su resistencia a la intemperie, a los golpes y a las vibraciones, característica ésta de suma importancia en el navío.

Otras maderas, como la del olmo (*Ulmus minor*), haya (*Fagus silvatica*), quejigo (*Quercus faginea*), encina (*Quercus ilex*), ciprés (*Cupressus sempervivens*), plátano de sombra (*Platanus sp*), cedro (*Cedrus libani*), teca (*Teutona grandis*), palo María (*Callophilum sp*), lauan (*Diptorecarpus turifera*), cedro cubano (*Cedrela odorata*), caoba (*Swietenia mahogani*), se han aplicado con prodigalidad en la construcción naval.

Formación de las piezas para uso naval

Se configuran las tablas de proporciones, que establecen para cada diseño de arquitectura naval la forma de las diferentes piezas, el número de las mismas con su correspondiente numeración para posicionarlas en la estructura del navío, y los diferentes ensambles y uniones necesarias para su conformación.

La formación de dichas piezas se hace a partir de la madera «en blanco», previamente secada de manera natural, llevándose a cabo la operación mediante la sierra y la labra en sus distintas etapas según los reglamentos *ad hoc* para su tarifado y cubicación.

Sollicitaciones estructurales de las piezas del navío

Se ha de tener en cuenta que las piezas correspondientes a la estructura del buque están sometidas a esfuerzos de carácter estático, como el propio peso de las mismas y el empuje producido por el desplazamiento, y a otros de carácter dinámico de resultas de la maniobra, como la acción del viento y la resistencia que se produce al desplazamiento del mismo.

La robustez, unida a la elasticidad de las piezas y de sus ligazones, son parte determinante del comportamiento de la estructura del navío. La conjunción de una y otra característica en la composición del diseño de arquitectura naval da lugar a que una solución sea mejor o peor en cuanto a sus condiciones marineras y tácticas.

La agresividad del medio marino

Las maderas reciben del medio marino acciones que condicionan la durabilidad del navío. Unas son abióticas, como variaciones y alternancias higró-

métricas, que producen hinchazones en las distintas piezas y en sus ensamblajes; otras, bióticas, como el ataque de los agentes xilófagos marinos (moluscos y crustáceos) y las propias del agua de mar, portadora de disoluciones salinas, principalmente cloruros y carbonatos.

Por tanto no sólo es necesario un señalamiento del árbol para su corta, de carácter dendromórfico, en razón de su destino como pieza de la estructura del buque, sino un posterior tratamiento de las maderas, para resistir con éxito y durante un tiempo suficiente los ataques hostiles del medio marino.

Tratamientos y protección de las maderas

Variados han sido los métodos de protección de las maderas para uso naval, siendo los tratamientos naturales de las mismas las impregnaciones mediante alquitranes, carbones y desinfectantes con sebo y azufre, las más utilizadas durante el siglo XVIII. Las operaciones de calafateado y carenado eran propias de la terminación y del mantenimiento.

Respecto a la protección del casco, fue el recubrimiento mediante forrado con planchas de cobre y plomo el que les dio más garantías de perdurabilidad.

Conclusiones sobre la arquitectura naval del siglo XVIII

De carácter teórico

Respecto a la flotabilidad, se conoce la mecánica de fluidos principalmente por Mariotte y su trabajo *Traité du mouvement des eaux*, en que se tiene en cuenta la relación de densidades del sólido depositado en un fluido —en nuestro caso en el agua—, que depende de la forma volumétrica del diseño como consecuencia directa del principio de Arquímedes, al experimentarse una fuerza de empuje contraria a la gravitatoria, que tiene como módulo el peso del fluido desalojado en el volumen considerado. Respecto a la estabilidad, se conocía que estaba relacionada con la capacidad de un cuerpo que flota para recuperar la verticalidad cuando se ha desplazado de ella; para ello, el centro de gravedad del buque y el centro de empuje deben ejercer un par de fuerzas que tiendan a recuperar la verticalidad de su sistema vélico; a fuertes empujes, han de contrapesarse con el peso de la quilla, para situar la componente del centro de gravedad en una posición inferior al centro de flotación; de este modo se asegura la estabilidad en todas las sollicitaciones posibles.

De carácter práctico

Jorge Juan dice: «El arte de construir ha tenido la desgracia de caer siempre en manos de un mero practi- ción que por no tener luces de Geome- tría y Mecánica, no conoce las propie- dades de las líneas de fuerza, o entre las de un gran teórico que no sabe lo que son las fuerzas de la mar».

Sin embargo, la coincidencia en el tiempo de diferentes diseños de archi- tectura naval produjo un sistema ecléctico que aprovechaba las ventajas que cada uno reportaba.

Los ensayos y pruebas después de la botadura y antes de comenzar su andadura marinera se llevaban a cabo en todos los astilleros, aunque los resultados negativos de los ensayos a veces no se tuvieron en cuenta. Así lo demuestra, por sus desgraciados resul- tados, la botadura y puesta en servicio en el año 1625 del navío sueco *Vasas*, de 64 cañones, que el primer día de su andadura, cuando sus cañones dispara-aban las salvas de salutación, se escoró al salir del puerto de Estocolmo, hundiéndose a continuación con «su velamen, sus grímpolas y gallardetes y todo lo que llevaba encima».

El diseño constructivo del *Vasas* consistía en ensamblar las maderas con un doble sistema de pernos de hierro y cuñas de madera que hacían un juego complementario entre la rigidez del metal de las uniones y la elasticidad que producían las cuñas; de esta manera se conseguía una estructura de madera menos proclive a la desarticulación.

Según el testimonio del embajador danés Erik Krabbe, en el naufragio perecieron más de 50 personas. El constructor del navío fue Hein Jacobson, quien parece cometió errores en la estabilidad que no se pusieron de manifiesto en las pruebas previas, como se ha mencionado anteriormente (19).

A continuación se realizaban las pruebas de mar, que comprendían las de navegación y aguante de la vela, definitivas de la capacidad artillera del buque; las pruebas de carga equilibrada, para reducir el quebranto estructural; las de gobierno en la maniobra y, por último, las de la solidez de la estructura y quebranto de cubiertas y carenas, que Bouguer en 1746 y Jorge Juan en 1771 habían puesto de manifiesto.

(19) ARANDA, G. de: *op. cit.*; KVARNING, Lars: *La recuperación del Vasas*, 1993.

EXAMEN MARITIMO

Teórico 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.

De carácter constructivo

La experiencia demostraba en el siglo XVIII que los navíos alcanzaban mayor velocidad cuando aumentaban su calado hacia proa, pues de esta manera la acercaban al centro de gravedad.

Los ingleses habían construido buques más rápidos y operativos que los de diseño español o francés aumentando la manga, y con esloras que no sobrepasaban cuatro veces la longitud del palo mayor. Ganando en solidez y capacidad, se disminuyó el lanzamiento en aras de una mayor resistencia entre las piezas estructurales por el mejor ensamblaje de sus elementos, disminuyendo de esta manera en la viga ideal de la configuración del buque la posibilidad de quebranto. Sin embargo, el comportamiento marino de estos buques era muy balanceado a viento largo o de popa, lo que inutilizaba la primera línea de baterías, al entrar el agua por las portillas, disminuyendo por ello la capacidad de fuego en las piezas de mayor calibre. Además, en la navegación a bolina no salían bien a barlovento, sobre todo aquellos navíos en que se acortaba la eslora y se aumentaba la manga (20).

La Junta de Constructores, que presidía Jorge Juan, en el año 1752 redactó los reglamentos necesarios, como el «Estado de maderas de roble necesarias para fabricar un navío de 68 cañones» (21), sobre las características de las piezas de madera de roble y de tablazón de pino, las correspondientes a los pernos y ensambles, y los diseños más convenientes para las ligazones.

Además, para este diseño se contó con la inestimable obra de Pierre Bouguer *Traité du navire, de sa construction et de ses mouvements* (1746), que recogía todo el saber empírico y teórico de la navegación y de la construcción naval del siglo XVIII, como los trabajos de Henri Pitot en *La Théorie de la manoeuvre des vaisseaux reduite en pratique*, de 1731; de Pére Hoste, en *Théorie de la construction des vaisseaux, qui contient plusieurs traités de mathématique sur des matières nouvelles & curieuses*, de 1697, y de Jean Bernoulli, en *Essays d'une nouvelle théorie de la manoeuvre des vaisseaux*, de 1714, junto a la *Sciencia Navalis* de Leonardo Euler. El resultado de esas prolíficas publicaciones sobre el comportamiento hidrodinámico del buque fue que otros países europeos con menor desarrollo científico en esas disciplinas presentaron unos avances notables, como el *Examen marítimo*, de Jorge Juan, en España, y la *Architectura Navalis Mercatoria*, de Fredrik Chapman, en Suecia.

Otros aspectos que contemplaba la construcción era la concepción del navío de línea como plataforma portadora de artillería que presentaba un límite constructivo a la longitud de la eslora hasta el quebranto estructural admisible; los buques construidos con el diseño a la inglesa eran menos pesados que

(20) TORREJÓN, J.: *La construcción naval militar española en el siglo XVIII: tendencias, programas y constructores*, 2002.

(21) En la construcción de los seis navíos de 68 cañones de David Howel y Thomas William se consumió un 50 por 100 más de madera que en los basados en el sistema de Gaztañeta.

los basados en los diseños de Gaztañeta y Gautier y, por ello, más vulnerables a las sollicitaciones de la maniobra.

La apertura de las portas de baterías menguaba la resistencia del diseño, al tener que espaciar más las varengas, y el modelo de Jorge Juan, al ser más ligero, acrecentaba la debilidad de la estructura.

La disposición de las piezas de artillería ocasionaba sollicitaciones estáticas y dinámicas concentradas y semejantes a las de un tren de cargas. La solución para soportar esos esfuerzos era aumentar el número de baos, unido al reforzamiento de las bulárcamas; pero, si se espaciaban las varengas, la dificultad se multiplicaba, por lo que los calibres artilleros debían disminuirse, así como el número de piezas, con lo que el navío perdía potencia artillera.

Otros inconvenientes se deben a la relación entre la apertura de las portas y el calibre de la artillería de la primera cubierta sobre la línea de flotación, que suponía la inutilización de las baterías en caso de mala mar o de un combate con el enemigo a sotavento. Ambas eventualidades obligaban al cierre de las portas de la banda de combate, dejando inutilizadas las baterías de mayor calibre como antes se ha puesto de manifiesto, pues si se alzaban esta cubierta, se elevaba el centro de gravedad y, por lo tanto, disminuía la estabilidad del buque en la maniobra (*).

(*) «Cuando ya al palo trinquete / se lo trague la marea. / Cuando en el fondo del mar / seas sirena.» (Alberti y Jorge Juan compartieron, cada uno en su tiempo y circunstancia, la bahía de Cádiz. Uno con los esteros de blanca sal, dunas y pinos con olor a resina; el otro, con los vientos de poniente y levante, las corrientes marinas y los bajos ocultos. Uno contó de los colores y sonidos de la costa; el otro, de las maniobras de la práctica marinera.)