LA PÉRDIDA DEL SUBMARINO ARA *SAN JUAN*

Ricardo GÓMEZ ENRÍQUEZ

(retirado)

En recuerdo de las dotaciones de los cinco submarinos que cito en este artículo.

Antecedentes

El día 15 de noviembre de 2017 a las 08:36 se recibió la última comunicación desde el submarino argentino *San Juan*, que navegaba a cota periscópica cuando realizaba tránsito por el Atlántico Sur. A las 10:51 se registraron explosiones en dos de los tres grupos de hidrófonos de las estaciones hidroacústicas H10N, en la isla de Ascensión, de la Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBT) y la H04S en las islas Crozet, en el sur del océano Índico. Al cabo de un año fue localizado gracias al corte de las dos demoras que proporcionaron.

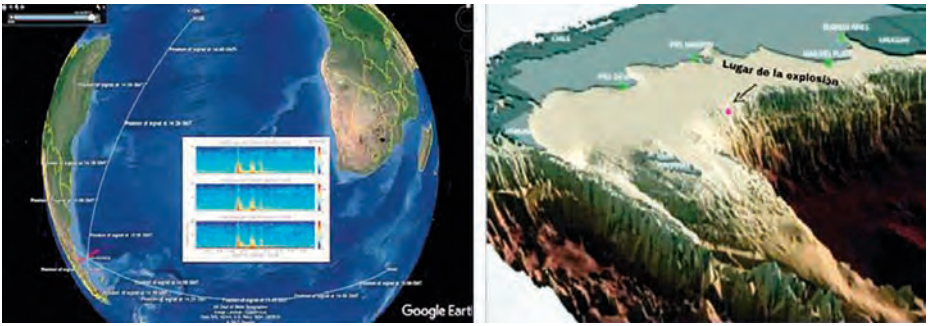
El origen de la catástrofe se achacó en su día a una posible explosión de hidrógeno (H_2) en el cajón n.º 3 de la batería. No es mi intención polemizar sobre si ésta se produjo ni sobre sus antecedentes; sólo pretendo en las líneas que siguen esbozar una causa alternativa basándome en otros casos de submarinos perdidos y en sus lecciones aprendidas.

Sin haberse publicado, que yo sepa, en los últimos años información que pudiera ser de interés para conocer con más detalle las causas de su pérdida, no tengo más remedio que continuar trabajando en el terreno de la especulación a partir de los datos divulgados y de las pesquisas que he realizado por internet. Trataré de explicar en los párrafos siguientes dicha alternativa.

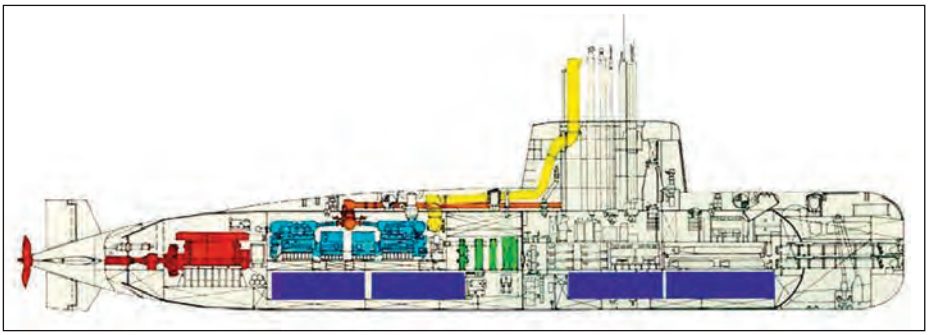
ARA *San Juan*. (Fotografía facilitada por el autor)

Los hechos

La entrada de agua en el cajón de baterías n.º 3, que sólo pudo producirse a través del ventilador de las baterías de proa, causó un conato de incendio en su cabeza de batería, que fue informado por mensaje. Se desconectaron las



Corte de las dos demoras, registro de los tres hidrófonos y posición final del submarino. (Fuente: Google Earth)



Esquema del interior del ARA *San Juan*. En color añil, se muestran los cuatro cajones de las baterías. El n.º 3, de popa a proa, fue el incendiado.
(Fuente: *desarrollodefensaytecnologiabelica.blogspot.com*)

baterías 3 y 4 de proa, quedando el submarino propulsado por las de popa 1 y 2. El conato le había obligado, como es preceptivo, a subir a superficie, hasta que quedó controlado y no ofrecía peligro, de lo que también se informó por mensaje, volviendo a hacer inmersión

La entrada de agua tuvo que producirse a través de la válvula Eco-19 del circuito de ventilación. Existía, por lo tanto, una anomalía en el circuito esnórquel y/o en el de ventilación ya conocida antes de hacer de nuevo inmersión.

El agua salada condujo la electricidad, produciendo un cortocircuito en la cabeza de batería con principio de incendio, pero no una explosión, a pesar de estar en carga; para ello se habría necesitado una concentración de más del 4 por 100 de H_2. El *San Juan* tenía además duplicado y en buen funcionamiento su sistema de medición de H_2, así que presumiblemente lo mantenía bajo control. El verdadero peligro del agua salada es cuando entra en contacto con el electrolito de los elementos (por rotura del vaso o rebose), lo que genera gas cloro tóxico.

Fecha	Hora	Desde	Hacia
15/11/2017	06:00	SUSJ	COFS

Armada Argentina	Vía	Capitán de Navío Claudio Villamide	Vía	Especialista	Vía	Capitán de Fragata Hugo Miguel Correa	Vía
"...Ingreso de agua de mar por sistema de ventilación al tanque de baterías N° 3. Ocasionó cortocircuito y principio de incendio en el balcón de barras de baterías. Baterías de proa fuera de servicio. Al momento en inmersión propulsando con circuito dividido. Sin novedades de personal Mantendré informado".	S/D	"INGRESO DE AGUA DE MAR POR SISTEMA DE VENTILACIÓN AL TANQUE DE BATERÍAS Nº3 OCASIONÓ CORTOCIRCUITO Y PRINCIPIO DE INCENDIO EN EL BALCÓN DE BARRAS DE BATERÍAS. BATERÍAS DE PROA FUERA DE SERVICIO. AL MOMENTO EN INMERSIÓN PROPULSANDO CON CIRCUITO DIVIDIDO. SIN NOVEDADES DE PERSONAL".	HF	Mensaje del SUSJ al comandante del COFS "INGRESO DE AGUA DE MAR POR SISTEMA DE VENTILACIÓN AL TANQUE DE BATERÍAS N° 3 OCACIONÓ CORTOCIRCUITO Y PRINCIPIO DE INCENDIO EN EL BALCÓN DE BARRAS DE BATERÍAS. BATERÍAS DE PROA FUERA DE SERVICIO. AL MOMENTO EN INMERSIÓN PROPULSANDO CON CIRCUITO DIVIDO SIN NOVEDAD DE PERSONAL"	Datos	Mensaje Naval, SITREP "INGRESO DE AGUA DE MAR POR SISTEMA DE VENTILACIÓN AL TANQUE DE BATERÍAS Nº 3 OCASIONÓ CORTOCIRCUITO Y PRINCIPIO DE INCENDIO EN EL BALCÓN DE BARRAS DE BATERÍAS. BATERÍAS DE PROA FUERA DE SERVICIO. AL MOMENTO EN INMERSIÓN PROPULSANDO CON CIRCUITO DIVIDIDO. SIN NOVEDADES DE PERSONAL"	HF - TONI NAS

Mensajes intercambiados por el ARA *San Juan* antes de su pérdida

Borne de batería tras un cortocircuito y sin explosión en la misma. (Fotografía del autor)

Navegar con media batería y con mala mar, tanto en superficie con la escotilla de la vela cerrada como en inmersión, exige un control minucioso de las revoluciones del motor de propulsión eléctrico para no sobrepasar las intensidades a través de sus inducidos, lo que no es un procedimiento estándar, pues afecta a las reacciones ante situaciones de emergencia, que deben determinarse caso por caso.

Los submarinos *TR-1700* (sólo fueron construidos dos para Argentina) tenían 960 elementos de batería de 500 kg distribuidos en cuatro cajones de 240, una considerable autonomía de 100 horas a cinco nudos para una descarga del 80 por 100 y un notable coeficiente de indiscreción (CI) del 6 por 100 a dicha velocidad. Navegar con la mitad de batería obligaría a aumentar el CI del 6 al 9 por 100, lo que correspondería aproximadamente a una hora y media como mínimo, seguida de 10 en inmersión. Y digo mínimo porque también es preciso cargar la batería a más del 80 por 100 tras cada período esnórquel para poder navegar después con margen de seguridad en inmersión frente a posibles emergencias por vías de agua y fallos de timones. Cuando se navega en inmersión con muy mal tiempo, incluso en cota 40, los bandazos en función de la dirección de la mar y de la sonda pueden ser considerables, por lo que para controlar el submarino en cota se suele trimar pesado varias toneladas y tener suficiente velocidad para que actúen los timones. El submarino navegaría pesado y con varios grados de inclinación al subir.

Las dos horas críticas

El *San Juan* habría cargado, supuestamente, la batería de popa antes de las 23:59 del 14 de noviembre y navegó en cota periscópica hasta las 08:36 del día 15 con la de proa aislada y controlada.

A partir de las 08:36, momento de su última comunicación antes de dejar la cota periscópica, es probable que decidiese dar un último esnórquel antes de bajar a cota 40. La anterior carga habría sido unas ocho o diez horas antes, por lo que, con buen criterio, cargó de nuevo para asegurar al menos otras ocho o diez horas en cota 40 para inspeccionar la cabeza de batería, desmontando la tapa atornillada de unos 30 kilos, y también para darle un merecido

descanso a su dotación. En realidad, no sabemos si se produjo o no este último esnórquel o si, por el contrario, se mantuvo todo el tiempo a esnórquel desde las 23:59 del día 14. Pero dudo que permaneciera en tampón (situación de navegación sin cargar la batería; el diésel suministra sólo la potencia para propulsión más auxiliares) porque navegar a cinco nudos, con unos 300 kW de carga de propulsión más auxiliares a esnórquel es agotador y, además, no es aconsejable por la seguridad del propio diésel hacerlo con un único motor en tampón.

Si hubiera sido así —es decir, navegando a esnórquel en tampón— habría dejado la cota periscópica poco después, a las 08:36, para bajar a cota 40, donde habría permanecido dos horas, de 08:36 hasta media hora antes de la implosión, que fue a las 10:52. Es posible también que durante este período de dos horas en cota 40 sufriese algún incidente eléctrico (bajo aislamiento) que inutilizase su batería de popa o el MEP (Motor Eléctrico Principal) reaccionando entonces con los soplados y que, sin ser capaz de reparar la avería en propulsión y encontrándose pesado, iniciase su fatídico descenso de cota. Hablo de un incidente eléctrico, no de una vía de agua, pues si se hubiese inundado el casco resistente no se habría producido con posterioridad la burbuja de implosión de 4,65 Hz a los 465 metros en la profundidad de colapso.

Pero, con todo, para mí lo más plausible es que o bien cuando se encontraba en cota 40 y pesado unas siete toneladas para el control de cota mientras trabajaba personal dentro de la batería de proa o antes de llegar a cota 40, tras finalizar la carga en esnórquel pero aún más pesado, del orden de 14 toneladas (siete por esnórquel húmedo y siete más por trimado con mala mar) y con velocidad, se hubiera producido la supuesta avería en la propulsión mientras bajaba de cota.

Entiendo que cualquier emergencia surgida mientras se encontraba anteriormente en cota periscópica, a esnórquel o no, la habría solucionado con los soplados y subido a superficie.

¿Qué otras cosas pudieron suceder?

Pérdida de propulsión y soplado de lastres

Tal vez alcanzada ya la cota 40 y pesado entre siete y catorce toneladas dependiendo de si se habían achicado o no los conductos del esnórquel, se comienza el achique de los tanques de regulación (capacidad de achique de 40 t/h) con bomba e inician en algún momento también el soplado de los lastres, tímidamente al principio para observar su efecto sobre la flotabilidad pero continúa el descenso, se soplan de nuevo pero ya cerca de los 100 metros de cota sin que se aprecie una reducción franca de velocidad a bajar que ya no cesaría hasta la implosión.

A modo de guía y para apreciar el efecto de los soplados de los lastres con la cota, he calculado los aligeramientos que se pueden conseguir tras soplarlos suponiendo una capacidad de 200 m^3 durante 30 segundos.

PROFUNDIDAD EN METROS	ALIGERAMIENTO EN TONELADAS EN BASE A UN CAUDAL DE 6,6 KG/S
14 m	108 t
50 m	29,7 t
100 m	14,5 t
200 m	7,5 t
300 m	5 t

Si consideramos, por ejemplo, un cambio de cota con una velocidad de siete nudos y una inclinación de 10/15 grados, se obtendría una velocidad de descenso de 0,6/1 m/s. Significo esto porque desde cota periscópica hasta los 50 metros sólo se tardarían 40 segundos, y de aquí la importancia que supone para el aligeramiento rápido tanto el comienzo del soplado de 30 segundos como hacerlo continuado en el tiempo y no en períodos de corta duración (ver más adelante el caso del *Galerna*).

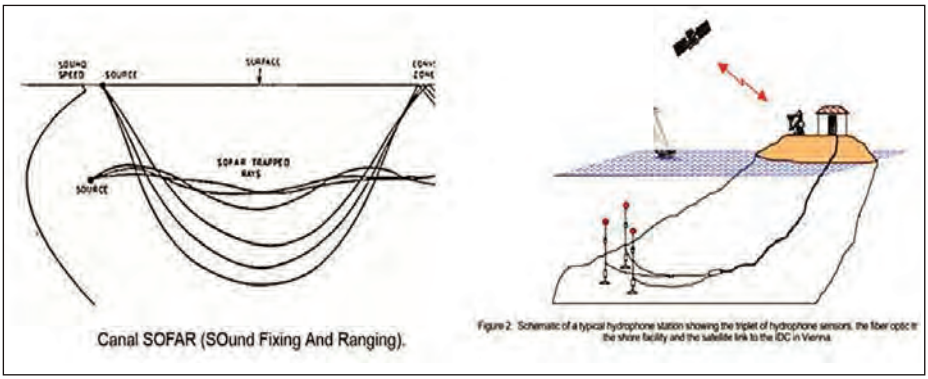
Si se retrasan los soplados o se hace únicamente con parte de los grupos de aire o sólo a ciertos lastres, el caudal de aire se reduciría a unos 3 kg/s y los aligeramientos del cuadro anterior a menos de la mitad de su valor.

Otra posibilidad es que los soplados tuvieran el efecto deseado sobre la flotabilidad, y el submarino, al quedar sin arrancada, comenzara el ascenso en algún momento posterior o antes de los 100 metros de cota, en que iniciaría una escora progresiva (se conoce como efecto vela, algo similar a soltar una hoja de papel sobre el suelo); ésta puede llegar a crear, en función de la cota de inicio de los soplados, unas escoras finales entre 60 y 75 grados (según testimonios reales de otros submarinos monocasco) y provocar que la nave llegue incluso a dar la vuelta antes de emerger o al emerger, especialmente con muy mal tiempo.

La supuesta explosión de la batería en cota 40

No es probable que se produjese una explosión por H_2 en la batería de proa del cajón número 3 porque estaba controlada, incomunicada en circuito abierto y sin descarga.

No existe, que yo sepa, evidencia de explosiones en los registros hidrofónicos. Una detonación por H_2 dentro del casco resistente es posible que genere la energía acústica suficiente para propagarse por el canal SOFAR (*SOund*



(Fuente: *CTBT.org)*

Fixing And Ranging) a distancias de entre 3.000 y 4.000 millas y ser detectada en el CTBT como un evento sísmico al estar dichos hidrófonos fondeados en el eje del canal.

Los hidrófonos se colocan en el eje del canal SOFAR o cerca de él, utilizando boyas de gran profundidad y anclados en el fondo del océano. Para dotar a la estación de capacidades direccionales, los tres hidrófonos se sitúan en una configuración triangular y cada sensor está separado horizontalmente unos dos kilómetros. La banda de frecuencias de la estación de hidrófonos es de 1 a 100 Hz.

Bruce Rule, analista acústico de la Oficina de Inteligencia Naval de Estados Unidos, cree que la hubo y lo cita en su web, pero no aporta datos que lo respalden. Sólo dice que se produjo 98 minutos después de dejar la cota periscópica, lo que supondría según él que la explosión de H_2 ocurrió a las 10:30, veintiún minutos antes de las 10:51, hora de la implosión, o justo 20 minutos después de la supuesta explosión de H_2; muy similar a lo que le sucedió al USS *Scorpion,* como después veremos. Solamente afirma que fue una explosión de H_2 de 10 kg de trinitrotolueno (TNT) (otra coincidencia con el USS *Scorpion*), pero no indica qué tipo de señal ni en qué estación en tierra se registró, sólo que fue en un hidrófono «lejano». Esto es extraño en él, pues siempre fue muy preciso en los análisis acústicos sobre las pérdidas del *Thresher* y el *Scorpion* (Johnson, 2005; Rule, 2011; Polmar & White, 2010). Lo hizo público en su citada web como un comentario y en retrospectiva sobre cómo deben hacerse los informes de pérdidas de submarinos para que los familiares de las víctimas se sientan moralmente apoyados por el resultado de la investigación del accidente en el sentido de que la dotación no sufrió.

La presunción mantenida hasta hoy sobre que la pérdida del *San Juan* se produjo por una explosión de H_2 en el cajón de baterías número 3 de proa se basa en que es la única manera, en mi opinión, de justificar que la dotación

no pudo reaccionar ante una pérdida de cota soplando los lastres por encontrarse incapacitada por dicha explosión, tal y como también se dijo —qué coincidencia— que le ocurrió al USS *Scorpion*.

Las baterías de plomo ácido siguen siendo peligrosas durante las cargas, y por eso se controla su evolución, junto con la temperatura y tensión de gaseo, a través de los elementos piloto, que suelen ser los que están en peor estado. Los medidores de control pueden averiarse (o descalibrarse), lo mismo que el sistema de ventilación, y es preciso estar muy atentos a la presión parcial en sus medidas para evitar sorpresas de concentraciones elevadas de H_2 por sobrepresión.

Para que se produzca una explosión es necesario que se desprenda suficiente H_2 como para alcanzar al menos un 4 por 100 y quizás hasta un 8 por 100, para lo que se necesitaría una presión parcial elevada de 3-4 kg/cm^2 dentro del submarino y parece difícil que la dotación no lo hubiese advertido y controlado. Esto provocó en el USS *Scorpion*, según parece, una o dos explosiones consecutivas muy violentas del equivalente a 10 o 20 kg de TNT dentro del cajón. Este accidente, en mi opinión, se replicó de forma sospechosamente casual en el *San Juan*, sin que existan pruebas que lo corroboren.

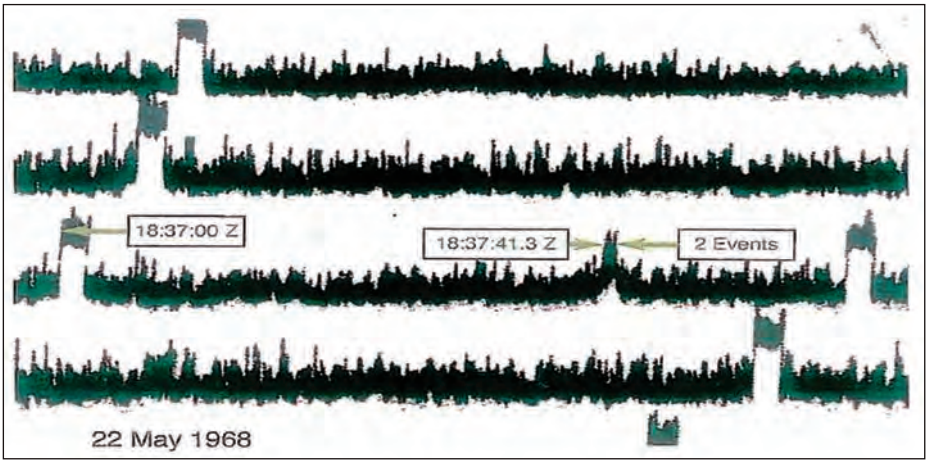
La posible explosión de la batería del USS Scorpion *(Johnson, 2005; Polmar & White, 2010)*

Aunque respecto al accidente del *Scorpion* la US Navy sigue sin desclasificar ciertos documentos de la investigación, está claro que tras la supuesta explosión de su batería perdió su propulsión, aunque según parece alguien de la dotación permaneció con vida en el compartimento de propulsión hasta su cota de colapso.

En opinión de Bruce Rule, se detectaron dos explosiones precursoras y consecutivas por H_2, según demostraron los análisis de los restos de material específico incrustados en algunos trozos de elementos de batería recuperados del fondo del mar por el submarino de exploración *Triestre,* que provienen sin lugar a duda de las tapas de su batería de 126 elementos.

La potencia de las dos explosiones citadas de H_2 en su batería, según Bruce, fueron muy violentas, sucedieron mientras el submarino se encontraba a cota periscópica y no rompieron el casco resistente. Fueron detectadas por los sismógrafos/hidrófonos de la estación de vigilancia hidroacústica no integrada en la red SOSUS en la isla de La Palma, en Puerto Naos (supuestamente era un centro privado para estudios de cetáceos), y se produjeron justo 22 minutos antes de la implosión final (lo mismo dice Bruce que pasó en el *San Juan*; qué coincidencia). Esta comprobación de recepción y correlación en el tiempo de las señales sísmicas —que no proporcionan frecuencia, sino sólo nivel y tiempo del evento— con la posterior señal acústica detectada por

USS *Scorpion*. (Fuente: US Navy)



Detección del evento acústico precursor del *Scorpion* por el hidrófono A de la isla de La Palma en Puerto de Naos. Para marcar el tiempo en el trazado, la impresión de la grabación realizada registra un breve desplazamiento vertical cada minuto. Uno de estos desplazamientos está señalado como 18:37:00 Z. Los dos eventos precursores, que se cree que son explosiones de la batería principal, están marcados

los hidrófonos de la burbuja por implosión (4,68 Hz) le permitió realizar un análisis *a posteriori* (en 2009), tras recoger del fondo del mar y analizar los restos de los elementos de batería citados y dictaminar que hubo dos explosiones internas en el interior del casco resistente del *Scorpion* antes de la ocurrida por implosión.

La narrativa de su pérdida especula con que el submarino se encontraba a cota periscópica, al aparecer en las fotos de sus restos con varias antenas izadas, pero no con el mástil de inducción, y realizando un mantenimiento de la batería, posiblemente una carga igualadora. Es probable que se hubiese alcanzado por causas desconocidas una concentración de H_2 en la batería de más del 8 por 100 durante la carga. Tal concentración se podría lograr con una sobrepresión interior en el submarino de 4 kg/cm^2 (imposible de conocer, esto figura en el informe del análisis de los restos de la batería recogidos en el fondo del mar).

Pero, insisto, esto es pura especulación. La violencia de la explosión, de un 8 por 100 de H_2, habría provocado una onda de presión mortal del orden de 10 kg/cm^2 dentro de la atmósfera del submarino.

Podrían existir aún restos de la batería del *San Juan* que confirmasen o desmintiesen este extremo, es decir, si existió o no explosión anterior a la implosión. Pero esto no creo que se produzca porque, en primer lugar, no es un submarino nuclear que suscite interés de si existe o no radioactividad en el reactor y en sus torpedos, y segundo, porque pueden todavía quedar botellas de aire u otros tanques resistentes que, según Bruce, podrían implosionar.

Submarino francés *Euridyce* (S-644). (Fuente: *www. netmarine.net*)

Otras pérdidas de submarinos por supuestas averías en propulsión

La Minerve *y el* Eurydice

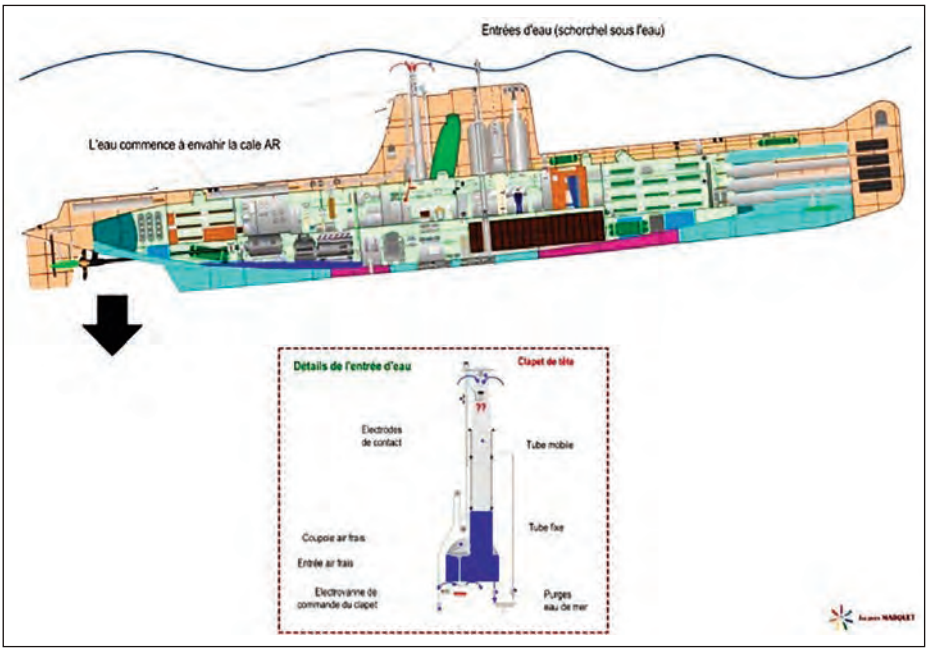
En mi opinión, la pérdida de submarinos por fallo de propulsión navegando pesados podría atribuirse también a los casos del USS *Thresher* y de los franceses *Minerve* (enero 1968) y *Eurydice* (marzo de 1970), de la clase *Daphné,* estos últimos tras finalizar esnórquel con muy mala mar y encontrándose presumiblemente muy pesados en cota de 50 metros o superior y fallar sus motores eléctricos de propulsión por entrada de agua en la sentina de popa a través del circuito esnórquel. Repito, ésta es mi opinión, ya que la Marina francesa baraja otras posibles causas, pero sin llegar a darlas por definitivas.

Submarino *Minerve*. (Fuente: Hervé Fauv)

Lo mismo les ocurrió, aunque lograron contarlo, al *Flore* (S-645) en 1971 y al *Galerna* (S-71) en 1984 (testimonio del fallecido capitán de navío Manuel Taboada Moure, entonces su jefe de Máquinas, al autor), aunque llegaron a sobrepasar la cota máxima tras haber soplado todos los lastres.

El accidente del submarino Flore *(S-645)*

En febrero de 1971, el *Flore* tuvo una entrada de agua continua de poca cantidad, a través del esnórquel navegando con muy mala mar y pesado, que



(Fuente: Jacques Marquet)

se fue depositando en la cámara de propulsión (zona pintada de azul oscuro en el dibujo superior) y llegó a mojar los motores eléctricos, lo que provocó un incendio. Se reaccionó disparando los disyuntores de 4.000 amperios y se perdió la propulsión. A continuación, se soplaron todos los lastres (se alcanzaron inclinaciones al subir de 45 grados cerca de la cota periscópica y se largaron los plomos, logrando subir a la superficie).

A raíz de este accidente, la Marina francesa introdujo un programa de mejoras en el circuito esnórquel para incrementar su seguridad, en especial en la detección de entradas de agua por chorro continuo y por vena líquida que pudieran poner en riesgo la propulsión eléctrica, añadiendo gran cantidad de sensores (electrodos) en los lugares críticos por donde entra el agua del esnórquel de forma controlada. Estas mejoras en la seguridad fueron trasladadas a los submarinos *Agosta* con excelentes resultados.

El «susto» del Galerna *(S-71)*

El 16 de junio de 1984, el *Galerna* realizaba el ejercicio Jolly Roger, navegaba en esnórquel con mala mar, muy pesado (ocho toneladas) a siete nudos y

atravesado a la mar. En esas condiciones se mantenía muy bien la cota; pero surgió entonces un fallo de propulsión por avería en el cuadro local del MEP. Se dio la alerta y terminó el esnórquel sin problemas.

El comandante decidió continuar bajando hasta cota de seguridad, porque estaba preocupado con un barco de superficie próximo que podría presentar problemas en caso de una salida de emergencia. La intención era trimar en 45 metros y reparar la avería en el MEP navegando con el motor de crucero. Al pasar por 30 m, se soplaron las regulaciones para restablecer el trimado, pero saltó la seguridad y no se pudo trimar (las averías importantes nunca vienen solas, de lo contrario no nos acordaríamos de ellas). Se continuó descendiendo intentando trimar con la bomba de regulaciones, pero el proceso era muy lento. Al pasar por 50 m, se sopló el lastre 3 durante 10 segundos, pero a esa profundidad el efecto es muy pequeño y el barco continúa descendiendo de manera acelerada. Se repitieron los soplados a 100 y 150 m sin resultado significativo frente a las ocho toneladas de pesantez. Se mandó poner en marcha el motor de crucero, pero las seguridades eléctricas entre cuadros exigían que el mando a distancia coincidiera con el local y, al no hacerlo, el motor de crucero no arrancó. Cuando por fin coincidieron, ya estaba en 300 m y bajando. Arrancó el motor de crucero y a 310 m el barco se equilibró con cinco grados al subir y tres nudos. Poco a poco empezó a subir y salió a superficie con el motor de crucero.

La conclusión que se sacó de esta experiencia es que, navegando en esnórquel y muy pesado, un fallo de propulsión obliga a soplar y salir a superficie antes de perder cota.

Submarino *Galerna* (S-71). (Foto: Armada)

El *Thresher* (SSN-593). (Fotografía facilitada por el autor)

(Nota del autor).—Aún quedaba el largado de los dos plomos de seguridad (14 t), pero también un largo camino no exento de riesgos, con fuertes escoras hasta la superficie y después… no poder volver a hacer inmersión.

La pérdida del USS Thresher

La versión oficial de la pérdida del *Thresher* en abril 1963 sigue manteniendo aún hoy que fue debida a una vía de agua durante las pruebas de construcción en cota máxima, al parecer causada por un fallo en una junta mal soldada de una tubería en el local de propulsión (curiosamente la única que se logró recuperar del fondo del mar).

Pero cierta información acústica grabada por una estación SOSUS cercana y analizada por Bruce Rule y en base a documentos desclasificados (aunque permanecen clasificados muchos de ellos, quizás los más importantes y comprometedores) demuestra que el reactor fue parado, según el procedimiento, por una avería eléctrica, que obligó a parar ambas bombas de refrigeración, no por una emergencia, puesto que se comunicó por teléfono submarino al buque de control en superficie *Skylark*: *Experiencing minor difficulties. Have positive up angle. Am attempting to blow. Will keep you informed.*

Parece, por lo tanto, poco consecuente y arriesgado que fuese parado el reactor debido a una emergencia por vía de agua *flooding,* donde además la propulsión constituye su principal salvación. Esta parada del reactor selló el destino del submarino.

El *Thresher* (SSN-593)

El *Thresher* se encontraba bastante pesado para mantener la inclinación al subir, ya que éste era en la época un procedimiento estándar en los submarinos nucleares, al disponer de mucha potencia propulsora, con poca flotabilidad para poder así subir rápidamente en caso de vía de agua. Tras soplar (pruebas posteriores en superficie demostraron que se congelaban los difusores de las válvulas de soplado, haciéndolo ineficaz) no consiguieron detener su bajada de cota hasta el colapso y su implosión.

Casi todas las vicisitudes de esta tragedia quedaron grabadas por los hidrófonos de la estación SOSUS. Nunca fue citado en la investigación del accidente este extremo para no delatar la precisión de las grabaciones de las plantas propulsoras de submarinos de cualquier otra nacionalidad (en especial soviéticos). Y por ello, la responsabilidad final recayó en el astillero por las soldaduras defectuosas (que también las hubo) y no en una deficiencia menor o de procedimiento de la planta propulsora del submarino responsabilidad del almirante Rickover. Curiosamente el procedimiento fue modificado en consonancia con la no parada de ambas bombas de refrigeración en caso de sufrir un percance eléctrico similar. Con una sola podría haber mantenido ocho nudos y salvarse.

Los riesgos del soplado de lastres

Los soplados de lastres qué duda cabe que son una gran ayuda ante emergencias como vías de agua e inclinaciones por averías de timones y también ante escoras no deseadas (el citado efecto vela), pero su empleo en cota profunda y, en general, más allá de la periscópica es problemático para el control del submarino si no se tiene suficiente velocidad avante. La salida del agua de los lastres se ve dificultada por su estructura interior y la formación de bolsas con la inclinación y, al aumentar la cota e ir incrementando su pesantez el submarino por compresión, el efecto del soplado se ve también cada vez más disminuido/retardado.

Si se controla la bajada en cota y se inicia a continuación una subida, es además difícil mantener la inclinación y la escora sin tener suficiente velocidad avante. Y en esto se tiene alguna experiencia por casos ocurridos en unidades de nuestra Flotilla de Submarinos.

Conclusiones

La decisión del *San Juan* de continuar el tránsito en inmersión, a pesar del mal estado de la mar y con un esnórquel/sistema de ventilación defectuoso,

con media batería y tras haber sufrido un principio de incendio, fue arriesgada pero comprensible.

Entre las 08:36 se produjo la última comunicación con el *San Juan,* y a las 10:52 la implosión; el submarino muy posiblemente tuvo que recargar las baterías de popa y ventilar las de proa en un esnórquel antes de bajar a cota 40 a inspeccionar el cajón número 3. No olvidemos que con un CI del 9 por 100 a cinco nudos y con media batería le quedarían pocas horas en inmersión antes de la próxima carga.

Desde mi punto de vista, la pérdida del ARA *San Juan* se debió a una avería en su planta propulsora/batería cuando dejó la cota periscópica tras el esnórquel, encontrándose muy pesado, del orden de 14 t (se trata de una estimación personal) al bajar a cota 40 m para continuar el tránsito sólo con la batería de popa.

Por otra parte, navegar con media batería exige un cuidadoso control de los acopios de propulsión y estar prevenidos ante una posible sobreintensidad en los cambios de régimen de revoluciones del motor eléctrico, principalmente ante emergencias.

No existen pruebas acústicas/sísmicas de una explosión previa a la implosión de la batería por H_2. Una entrada de agua en el cajón unas 12 horas antes —como la informada en el mensaje como un principio de incendio— no tiene por qué posteriormente provocarla.

Una explosión suele producirse, a la vista de otros casos acaecidos, en submarinos —por ejemplo, en el *Doris* (S-643) francés— durante o inmediatamente después de una carga de batería y tras superar algunos elementos la tensión de gaseo normalmente por temperatura o durante descargas a grandes regímenes de la batería; pero ambas situaciones no parece que puedan aplicarse en el caso del *San Juan*.

Si existió una explosión interior previa a la implosión, ésta no fue detectada, al menos que se conozca, más allá de lo analizado por Bruce Rule en los hidrófonos/sismógrafos de las dos estaciones de tierra del CTBT. La explosión de la batería del USS *Scorpion* tampoco la admite aún hoy, la US Navy como causa principal de la pérdida del submarino.

A modo de epílogo

Un submarino trimado pesado sin propulsión navegando en cota profunda tiene posibilidades de no volver a subir o, si lo hace, sufrir fuertes escoras tras soplar todos sus lastres antes de alcanzar la superficie. La reacción de soplar todos los lastres para que sea efectiva debe ser inmediata a la pérdida de propulsión y continuada en el tiempo. Un submarino en inmersión pesado y sin propulsión ni arrancada es muy peligroso.

Navegar a más de siete nudos y trimado pesado con más de siete toneladas (ambas son apreciaciones mías si se navega en esnórquel) es una situación de riesgo que debe mantener alerta a la dotación para estar preparada para reaccionar soplando los lastres si se produjese un fallo de propulsión.

En general y siempre que se pueda, es preferible navegar trimado ligero en cota profunda. Por el contrario, en cota periscópica y con mala mar es necesaria una alta velocidad para mantener la cota. Pero es al abandonarla o al llegar a la profunda cuando pueden surgir problemas, especialmente después de navegar a esnórquel con mala mar.

Todo lo dicho en este artículo lo he deducido en base a mi experiencia e investigaciones y, que yo sepa, no se encuentra recogido en manuales por no ser considerado una emergencia, que desde luego no lo es; tan sólo pretendo que sirva de advertencia.

BIBLIOGRAFÍA

CTBTO (Organización del Tratado de Prohibición Completa de los Ensayos Nucleares), *https://www.ctbto.org/news-and-events/news/ctbto-hydroacoustic-data-used-aid-search-missing-submarine-ara-san-juan*

Comisión bicameral especial investigadora sobre la desaparición, búsqueda y operaciones de rescate del submarino ARA *San Juan*. Senado, Argentina, 18 julio 2019, *https://www.senado.gob.ar/prensa/17713/noticias*

JOHNSON, Stephen: *Silent Steel. The Mysterious Death of the Nuclear Attack Sub USS Scorpion,* 2005, p. 231. John Wiley & Sons Inc.

RULE, Bruce: *Why the USS Scorpion (SSN-589) was lost*. Nimble Books, 2011.

RULE, Bruce: *Record of Proceeding of a court of inquiry. To inquiry into the circumstances of the lost at sea of USS Thresher SS(N) 593 which occurred on 10 april 1963*.

BRYANT, James B., *et al*.: «USS *Thresher* (SSN-593) Disaster: Ten Questions Our FOIA Lawsuit Hopes to Answer». US Naval Institute. *Proceedings*, vol. 146/4/1.406, April 2020, *https://www.usni.org/magazines/proceedings/2020/april/uss-thresher-ssn-593-disaster-ten-questions-our-foia-lawsuit-hopes*

«Declassify the *Thresher* Data». Naval Historical Foundation, Agosto 2019, *https://navyhistory.org/2019/08/declassify-the-thresher-data/*

POLMAR, Norman; WHITE, Michael: *Project Azorian: The CIA and the Raising of the K-129*, 2010.

POLMAR, Norman*: The Death of the USS* Thresher*: The Story Behind History's Deadliest Submarine Disaster*. Lyons Press, 2017.

POLMAR, Norman; MATHERS, Lee: *Opening the Great Depths: The Bathyscaph Trieste and Pioneers of Undersea Exploration*. Naval Institute Press, 2021.

KÉVORKIAN, Georges: *Accidents des sous-marins francais, 1945-1983*. Marines Nantes, 2006.

https://www.minerve-1968.com/es/diaporama-minerve

MALLMANN SHOWELL, J. P.: *Hitler's 'Wonder' U-Boats: The Birth of the Cold War's Hunter-Killer Submarines*. Naval Institute Press, 2018.

HAMILTON, Aaron S.: *Total Undersea War: The Evolutionary Role of the Snorkel in Donitz's U-boat Fleet, 1944-1945*, «Battery Explosions», pp. 62-63. Naval Institute Press, 2020.

Maniobra de remolque de la corbeta saudí *Hail* y la fragata *Santa María* (F-81).
(Foto: Francisco García Flores)

PROYECTO DE DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN BUQUE DE GUERRA MODERNO

Raúl VILLA CARO
Ingeniero naval y oceánico
(ing.)

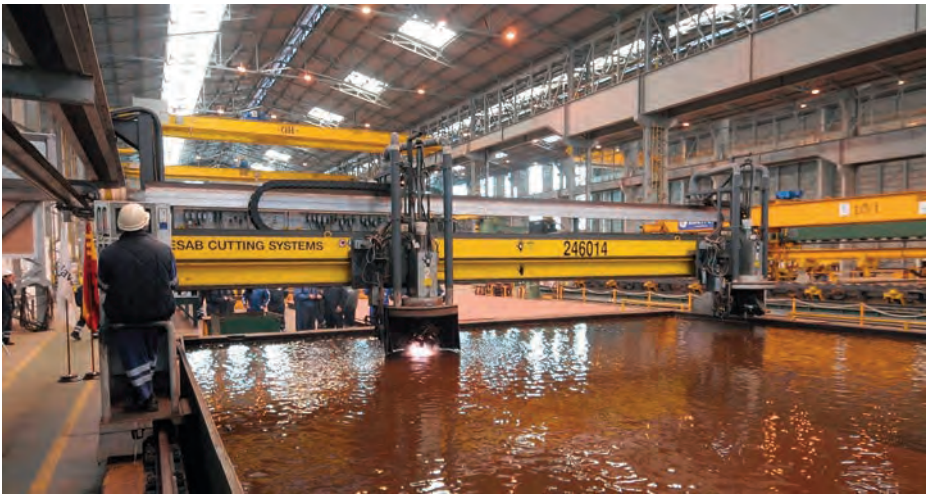
Nunca olvides: mejor navega el que tiene buen viento
que quien rema con mucho aliento.

Introducción

LOS buques de guerra se construyen para llevar a cabo diferentes operaciones en condiciones extremas; por ello, durante su construcción se deben tener en cuenta todas las condiciones a las que habrán de enfrentarse en el futuro. Los proyectos de estos barcos pueden organizarse de diversas formas, dependiendo del tipo de buque de que se trate, pero siempre incluyen unas fases generales.

La gestión del programa de construcción tendrá vital importancia para que el producto final cumpla con todas las expectativas creadas inicialmente y fijadas en las especificaciones del contrato. Se debe destacar que si ya de por sí el proyecto de construcción de cualquier buque es un proceso muy complejo, con muchos agentes involucrados en el mismo, en el caso de los barcos de guerra esta dificultad se agrava, ya que este tipo de naves deberá poseer una capacidad de supervivencia no exigible al resto de buques.

El buque de guerra representa un conjunto de requisitos enfocados a la búsqueda del éxito y de la eficacia en el combate contra una amenaza, por lo que para conseguir tal meta necesitaremos enfrentarnos a diferentes ramas de la ingeniería y la tecnología naval. Entre ellas, deberemos integrar y poner atención dentro del buque a su estructura, maquinaria, formas y sistemas de armas.



Comienzo de elaborado del proyecto de un buque de guerra.
(Fotografía facilitada por el autor)

El proyecto de un buque de guerra puede subdividirse en tres partes, siendo cada una de ellas el resultado de una fase laboriosa. Se inicia con la de viabilidad, cuyo producto es el proyecto conceptual, y continúa con la de definición, que incluye el proyecto de contrato. La fase final es la de detalle, cuyo producto principal es el proyecto de detalle, que se subdivide en el proyecto funcional y en el de construcción. Finalmente, es muy importante un programa de gestión de riesgos que trate los diferentes conflictos que puedan surgir durante el proyecto de diseño y construcción.

Fase de viabilidad

El proceso de diseño del buque de guerra se inicia con la fase de viabilidad, consistente en la toma de una serie de decisiones por un grupo pequeño de personas encaminadas a la búsqueda de la solución que presente la mejor relación entre las características del buque y su coste. Para ello será necesario conocer de antemano cuáles serán los requisitos operativos que deberá cumplir el buque, y además deberemos disponer de una base de datos de unidades similares contemporáneas que proporcionen información actualizada sobre las relaciones principales de las características de los buques referentes al desplazamiento, eslora, manga, puntal y calado, entre otras dimensiones.

Dentro de estos requisitos exigidos habrá algunos de obligado cumplimiento y otros que serán optativos y con diferentes alternativas posibles. También

tendremos que conocer cuáles serán los datos de mayor relevancia en el proceso de dimensionamiento del buque, entre los que se encontrarán la autonomía (millas navegables que podrá realizar sin necesidad de tener que entrar en puerto), la velocidad máxima, la velocidad económica (asociada al requisito de autonomía), la capacidad (tamaño mínimo del buque necesario para poder ubicar el sistema de combate y la dotación, cumpliendo con las características específicas impuestas en las especificaciones de contrato), los estándares de habitabilidad, las condiciones de supervivencia y vulnerabilidad, los márgenes de construcción y el *payload* (la carga de pago que exige la identificación de sistemas como los de comunicaciones, armas, munición, aeronaves, etcétera).

Junto con los requisitos anteriores se deberán definir, en caso de existir, las restricciones al diseño que se vayan a fijar en el proyecto, tales como un calado máximo del buque para acceso a determinados puertos o limitaciones en manga para el paso por canales.

Esta fase de proyecto conceptual incluye los objetivos establecidos por el Estado Mayor (o el cliente correspondiente), y su principal meta es el estudio de las alternativas existentes, valorando la viabilidad de los objetivos y el cumplimiento del coste pactado. Con los resultados obtenidos se podrán fijar los «objetivos», que a la postre se convertirán en «requisitos» en las fases posteriores.

Puesta de quilla de un buque de guerra.
(Fotografía facilitada por el autor)

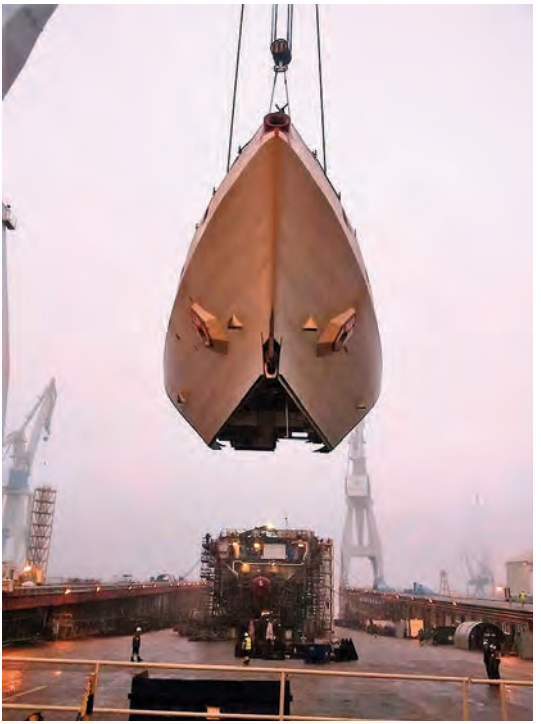
En esta primera fase, como ya se ha indicado, se deberá realizar un análisis de las posibles alternativas que puedan cumplir los objetivos y sus costes. Este proceso iterativo estará basado en:

— Las misiones asignadas.
— El estudio de las posibles soluciones.
— El estudio de sistemas de combate capaces de cumplir con las misiones asignadas.

— El estudio inicial del apoyo logístico y coste del ciclo de vida de los sistemas seleccionados.

El proceso del diseño del buque se inicia con la definición del conjunto de requisitos necesarios y se desarrolla a través de una serie de actividades sometidas a comprobaciones intercaladas en el proceso que confirmen la validez de la espiral del proyecto a través de los resultados obtenidos hasta ese momento. De esa manera, si se satisface el criterio de comprobación, el proceso continúa hasta la siguiente justificación. Pero si por el contrario el resultado de la comprobación fuera no satisfactorio, se procedería a la modificación y actualización de los datos.

Las comprobaciones se llevan a cabo en diferentes partidas, y una de las más importantes es la referente a la obtención de los coeficientes hidrodinámicos preliminares. Dentro de ellos, cobra vital importancia la comprobación del coeficiente prismático, ya que es el que presenta mayor influencia en la distribución de los volúmenes internos y en la potencia propulsora del buque. De la misma manera, las dimensiones principales de eslora, manga, puntal y calado deben calcularse de forma que se cumpla con el volumen requerido, pero al mismo tiempo ajustándose a los requisitos de desplazamiento, estabilidad, resistencia estructural y comportamiento hidrodinámico en la mar.



Puesta del bloque de proa del BAM *Furor*.
(Fotografía facilitada por el autor)

Para la determinación del peso del buque, es decir, de su desplazamiento, se necesitará la estimación del peso en rosca y del peso muerto. La localización del centro de gravedad también será un dato muy importante para poder justificar la viabilidad de la estabilidad del buque en esta fase del diseño mediante la estimación de la altura metacéntrica (GM). Finalmente, la estimación de la potencia propulsora necesaria para alcanzar la velocidad requerida y poder cumplir con el

BAM en construcción en grada. (Fotografía facilitada por el autor)

criterio de la autonomía podrá obtenerse a partir de programas de predicción de potencia.

Algunos de los documentos y planos característicos del proyecto conceptual son los siguientes:

— Informe de dimensionamiento y calidad del acero.
— Disposición general del buque (número de cubiertas, disposición de pasillos principales, etcétera).
— Disposición de la cámara de máquinas y de la distribución eléctrica.
— Planos de formas.
— Hidrostáticas y cálculos de estabilidad.
— Estimación de pesos por grupos de coste.
— Curva potencia-velocidad.
— Cálculos de autonomía.
— Plano de la cuaderna maestra.
— Lista de equipos del sistema de combate.
— Estudios de dotación.
— Estudios de apoyo logístico integrado (ALI).
— Estimación de costes.

— Ensayos iniciales en canal hidrodinámico (resistencia y propulsión).
— Estudios preliminares de supervivencia (detectabilidad y vulnerabilidad).

Los datos de entrada de esta fase los fijan los requisitos del programa y los documentos y planos resultantes de la fase anterior de viabilidad. En ella se desarrolla una única solución de proyecto del buque que cumpla con los requisitos y estándares establecidos por el cliente. En esta fase, a diferencia de la de viabilidad, los objetivos se plantean con la meta de ser cumplidos en su integridad, por lo que se debe huir de estudios de otras alternativas, a excepción de que el propio desarrollo del programa, de manera excepcional, así lo exija. No se debe olvidar que el producto característico de esta fase es el proyecto de contrato.

Los resultados obtenidos en esta fase deben permitir la firma de la orden de ejecución (el contrato de construcción) de una manera consistente. Para alcanzar este fin, las fases de viabilidad y definición suelen realizarse por un grupo de proyecto compuesto de hasta 30 ingenieros y durante un período de uno o dos años, en el que se elaboran entre 100 y 200 planos y documentos. Se trata de un grupo de carácter multidisciplinar e iterativo, que permite cubrir tanto las disciplinas típicas de diseño como las diferentes especialidades.

Algunos documentos tipo del proyecto de contrato son los siguientes:

— Especificaciones de contrato.
— Planos guía de contrato.

Colocación de un bloque a flote del BAM *Furor*. (Fotografía facilitada por el autor)

— Documentos de definición.
— Ensayos de canal.
— Especificaciones técnicas preliminares para petición de ofertas de los equipos principales.
— Presupuesto.

Básicamente, la relación de los documentos de la fase de definición coincide con la de la subfase funcional de la fase de detalle (que se verá en el siguiente apartado), con un grado de contenido más limitado, pero tan amplio como lo permita el presupuesto disponible.

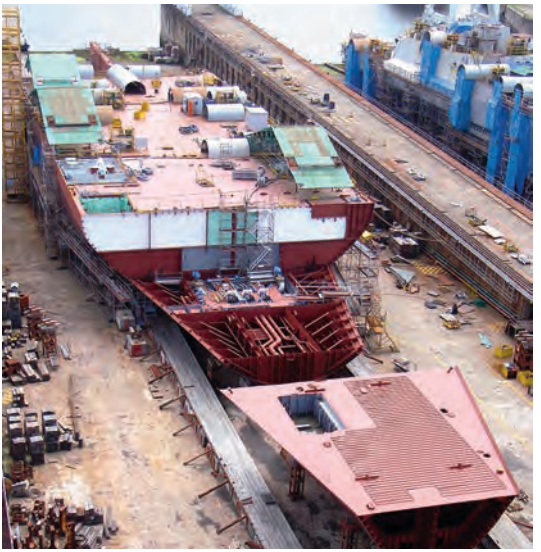
En esta fase conviene no extenderse en trabajos que dependan de la estrategia constructiva (EC) del astillero, pues al no disponerse de la información necesaria se corre el riesgo de tener que repetir dichos trabajos en el futuro. Es más efectivo concentrar los esfuerzos en los sistemas que presenten alguna novedad técnica y que, por tanto, requieran un plazo más amplio de definición.

Fase de detalle

Esta fase abarca la documentación de contrato, que incluye los documentos resultantes de la fase de definición y tiene como finalidad la preparación de ésta para hacer posible la adquisición de los materiales y equipos del buque. Se subdivide en subfase funcional y subfase de construcción, y sus productos característicos son el proyecto funcional y el proyecto de construcción, que en su conjunto constituyen el proyecto de detalle.

La subfase funcional tiene un alto contenido de ingeniería, y sus productos principales son los planos funcionales (esquemas), las especificaciones técnicas de compra (ETC) de los equipos, las estimaciones de material y los diferentes planes. En esta etapa se establecen los fundamentos de la EC, siendo los documentos de esta subfase imprescindibles para el desarrollo de la subfase siguiente. Asimismo, se organiza alrededor de un grupo de proyecto, que ejecuta la mayor parte de las tareas de ingeniería y está liderado por un jefe de ingeniería del proyecto, que es el responsable de la gestión de la ingeniería del buque. El grupo de proyecto incluye ingenieros y técnicos de los diferentes departamentos de ingeniería, así como de otros como compras, ingeniería de producción, calidad, etcétera.

La subfase de construcción tiene por finalidad la elaboración de los planos necesarios para la producción, incluyendo toda la información de detalle necesaria. Estos planos incorporan las listas de los materiales necesarios para el aprovisionamiento y, por su contenido, son una herramienta importante para la inspección durante la construcción. En general, esta subfase se organiza con grupos multidisciplinares para las diferentes zonas en las que se divide el



Ensamblaje de bloques del LHD *Juan Carlos I*.
(Fotografía facilitada por el autor)

buque. Habitualmente, cada uno de estos grupos cuenta con un jefe de zona que informa directamente al jefe de ingeniería del proyecto, e incluye personal de estructuras, tuberías, ventilación, electricidad, etcétera.

La duración de ambas subfases varía dependiendo de la complejidad del buque y del tipo de programa. Aproximadamente, en un programa típico de buques de superficie la subfase funcional puede tener una duración mínima de doce meses, instante en el cual se inicia la subfase de construcción.

Analogía con fases comerciales

Se definen como fases comerciales del proyecto a aquéllas que se desarrollan durante el proceso de la selección del contratista principal y la adjudicación del contrato (para el desarrollo del proyecto de detalle y la construcción del buque).

Buque en construcción con andamiaje.
(Fotografía facilitada por el autor)

La denominación de estas fases comerciales puede ser diferente, puesto que deberán seguir el procedimiento legalmente establecido en cada país para la adquisición de material para la defensa. En cualquier caso, la documentación de ingeniería a desarrollar en estas fases debe ser común con independencia del cliente final.

Una de las denominaciones más conocidas de esta documentación es la RFI (*Request for Information*). Estos documentos están relacionados con

el primer paso en un proceso estándar de adquisición, cuyo objetivo es recopilar información escrita de carácter general sobre el mercado de los productos demandados que puedan ser ofrecidos por diferentes suministradores. La RFI suele ser el primer paso en un proceso de adquisición.

Proceso general de dimensionamiento

Los requisitos operativos establecen los datos de entrada para desarrollar el dimensionamiento preliminar. Dentro de éstos, los de mayor relevancia en este proceso son los siguientes:

— Definición del *payload* (carga de pago): identificación y tipo de sensores, sistema de comunicaciones, armas, munición, aeronaves embarcadas para los buques de combate o tipo y cantidad de cargas a transportar a bordo para los buques auxiliares, junto con las ratios de carga, descarga, etcétera.
— Velocidad máxima y condiciones asociadas para alcanzar esa velocidad.
— Velocidad económica asociada al requisito de autonomía.
— Autonomía en millas.
— Alojamientos (máximo número de personas a bordo).
— Estándar de habitabilidad.
— Requisitos de supervivencia (vulnerabilidad y susceptibilidad).
— Pañoles y medios de aprovisionamiento.
— Márgenes de futuro.

Además de los datos anteriores, también se pueden proporcionar restricciones al diseño, tales como:

— Calado máximo limitado por la accesibilidad a algún puerto concreto.
— Altura máxima sobre la flotación en la condición de carga más ligera asociada (por ejemplo, para posibilitar el paso bajo algún puente).
— Limitaciones en manga.
— Tipo de maquinaria propulsora.

Portada de una cartilla de botadura.
(Fotografía facilitada por el autor)

Influencia de las firmas en la supervivencia del buque de guerra

En el momento de evaluar la capacidad de supervivencia de un buque de guerra durante el proceso de su diseño, se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

— Susceptibilidad: la probabilidad de recibir impactos, que dependerá del espectro de energía emitido y/o reflejado.
— Vulnerabilidad: grado de deterioro alcanzado tras un ataque, que dependerá del nivel de compartimentado, tipo de estructura, etcétera.
— Siniestralidad: probabilidad de destrucción después de recibir un impacto.

Los conceptos de susceptibilidad y vulnerabilidad contribuyen de manera directa a la siniestralidad y supervivencia del buque, de modo que la siniestralidad se obtiene del producto resultante de la susceptibilidad por la vulnerabilidad. Para conseguir una baja susceptibilidad o detectabilidad habrá que minimizar la cantidad de energía emitida y/o reflejada por el buque con el fin de reducir su influencia en el entorno, surgiendo de esta forma el concepto de firma.

Botadura del BAM *Furor*. (Fotografía facilitada por el autor)

Las firmas de un buque de guerra son las siguientes:

— Firma radar: relacionada con la energía de tipo electromagnético reflejada por la obra muerta y superestructura del buque.
— Firma acústica: relativa a la energía vibratoria de la maquinaria transmitida desde la obra viva al mar.
— Firma magnética: asociada a los campos magnéticos generados por la estructura del buque.
— Firma infrarroja: correspondiente a la radiación electromagnética emitida en la franja infrarroja del espectro.
— Firma eléctrica: generada por corrientes eléctricas producidas entre elementos metálicos unidos por un electrolito (agua de mar).
— Firma de presión: producida por el efecto Bernoulli del agua fluyendo desde su proa hacia su popa.

Control de pesos

El control de los pesos de un buque se compone de tres funciones sucesivas: la revisión de los cálculos y estimaciones de pesos, la detección de tendencias adversas y la aplicación de medidas correctoras en las partes aún no construidas.

En las fases del estudio de viabilidad y de definición del proyecto se realizan, en general, al menos dos estimaciones de pesos, en las que se irán consumiendo los márgenes definidos para cada fase. También se debe poner atención especial en determinar el centro de gravedad del buque en las tres coordenadas espaciales y de acuerdo con el sistema de referencia que se establezca al inicio del proyecto:

— Peso estimado: se consideran estimadas todas las partidas de pesos obtenidas con anterioridad al desarrollo y pesado de los planos de construcción. Cuando se trata de sistemas completos, el primer peso estimado se obtiene, en general, por comparación con buques similares, mientras que en el caso de equipos individuales su peso estimado suele obtenerse de catálogos. En el proceso de actualización de pesos se pretende que todos los pesos estimados se sustituyan progresivamente por pesos calculados y pesos de báscula.
— Peso calculado: es el resultado del pesado de los planos de construcción. Para que el control de pesos sea efectivo, todo plano debe pesarse inmediatamente después de su terminación para poder comparar el peso resultante con el peso estimado existente, de manera que se puedan tomar acciones correctoras en caso de que aparezcan desviaciones importantes.

Los pesos resultantes del cálculo efectuado sobre los planos, o procedentes de datos de materiales de catálogos de alta fiabilidad, se consideran pesos calculados. Los datos proporcionados por fabricantes no se estimarán calculados, sino estimados, hasta que puedan pesarse.

— Peso de báscula: es el obtenido por pesada real del elemento en báscula o con dinamómetro. Todos los pesos se deben sustituir por el peso de báscula, siempre que este último esté disponible, para mayor fiabilidad del proyecto.
— Margen de adquisición: este margen se establece para compensar un incremento del peso y la altura del centro de gravedad del buque en rosca desde los estudios conceptuales hasta el final de la vida del buque. Se subdivide en margen de la fase de anteproyecto (previabilidad y viabilidad), margen de la fase de definición del proyecto, margen del proyecto de detalle, margen de construcción, margen de modificaciones del contrato, margen del material suministrado por el cliente y margen de futuro crecimiento.

Al final de cada fase de diseño el margen de adquisición debe incluir los márgenes necesarios para todas las fases posteriores del diseño. Los valores deberán establecerse para cada buque y en cada fase dependerán de la documentación de que se disponga del proyecto base.

Durante la fase de definición del proyecto, los pesos estimados paramétricamente serán sustituidos gradualmente por los estimados de los planos, esquemas, ofertas y especificaciones. A partir de esta fase, la responsabilidad del sistema de control de pesos es del astillero, que realizará otra estimación de pesos al inicio de la fase de proyecto de detalle y construcción. Este cálculo, denominado estimación de pesos del contratista, es enviado al cliente y, una vez aprobado, se llamará estimación de pesos del contrato, que es uno de los hitos más importantes de todo el sistema de control de pesos. Esta estimación es el documento contractual que establece las características del buque y es la base para la preparación de los informes trimestrales (o cuatrimestrales) de pesos. Asimismo, constará de los mismos detalles y resúmenes que la estimación de pesos del contratista, incluyendo los valores acordados de los márgenes del proyecto de detalle y la construcción. Contendrá además una lista del material suministrado por el cliente con sus pesos y centros de gravedad estimados.

Durante el desarrollo del proyecto de detalle y la construcción del buque, el contratista preparará informes trimestrales (o cuatrimestrales) de pesos que permitan seguir la evolución del peso en rosca del buque y adoptar medidas correctoras, en caso necesario.

Finalmente, una vez llevada a cabo la experiencia de estabilidad del buque, el contratista preparará el informe final de pesos, que constituye una

evaluación completa de los pesos y momentos del buque tal como realmente ha sido construido. Este documento reflejará el margen residual existente de modificaciones al proyecto y el margen de construcción realmente consumido.

Como se ha mencionado anteriormente, para obtener una estimación de pesos fiable en las fases iniciales del diseño es fundamental disponer de información consolidada de un buque de referencia, al que llamaremos buque base. A partir de él es posible derivar de forma paramétrica una estimación del peso para alternativas con configuraciones similares en cubiertas, superestructura, etcétera, pero con diferentes dimensiones principales. Las coordenadas del centro de gravedad longitudinal y vertical de cada grupo de coste se pueden estimar a partir de la relación de eslora y puntal entre el nuevo buque y el buque base.

Prueba de cabestrante de un buque.
(Fotografía facilitada por el autor)

Márgenes de diseño

En el diseño de los buques de guerra es necesario considerar márgenes apropiados que cubran las consecuencias de posibles cambios en el diseño o errores que puedan aparecer durante el desarrollo del proyecto. Asimismo, se debe disponer de márgenes de futuro crecimiento que permitan absorber las actualizaciones que se puedan producir durante la vida operativa del buque. Por ello, entre otros, se tienen en cuenta márgenes en: peso, predicción potencia-velocidad, espacios de alojamientos, estimaciones del balance eléctrico y volumen interno.

Los márgenes de futuro indicados en el párrafo anterior se añaden a las estimaciones iniciales de pesos para cubrir tanto las modificaciones futuras como el incremento natural del peso del barco durante su vida en servicio. Los márgenes en peso deben ser considerados en: el cálculo de la estructura del

Prueba de las redes de vuelo de un buque. (Fotografía facilitada por el autor)

buque, cálculos de estabilidad, comportamiento en la mar, estimaciones de potencia y velocidad y para el dimensionamiento de los servicios del buque.

Las estimaciones de potencia y velocidad se deducen de los ensayos en canal y generalmente incorporan un 6 por 100 de margen en resistencia al avance, mientras que los espacios de alojamientos se suelen calcular reservando un pequeño margen sobre la dotación inicialmente estimada.

Los cálculos de balance eléctrico a menudo incorporan un margen de diseño y un margen de futuro para consumidores específicos; asimismo, los cuadros eléctricos suelen integrar un margen para posibles servicios adicionales.

Los márgenes de diseño y construcción se van consumiendo durante las fases de construcción del buque, pero no se mantienen una vez que éste es entregado. Los márgenes no consumidos generalmente pasan a formar parte del margen de crecimiento futuro. El margen de adquisición, que se establece para compensar un incremento del peso y KG (altura del centro de gravedad del buque) desde los estudios iniciales conceptuales hasta la entrega del buque, se subdivide en:

— Margen de la fase de definición del proyecto: es la reserva incluida para tener en cuenta los incrementos en peso y KG asociados a esta fase de definición.
— Margen del proyecto de detalle: es la reserva incluida con el fin de absorber las desviaciones que se presenten entre los pesos estimados al final de la fase de definición y los pesos finales que resulten de cálculos sobre planos de trabajo o de pesadas en báscula.
— Margen de construcción: es la reserva destinada a absorber las diferencias entre el peso calculado de los planos y el peso real del buque. Se consumirá tras la experiencia de estabilidad del buque.
— Margen de modificaciones de contrato: la misión de este margen consiste en poder absorber las variaciones de peso producidas por las modificaciones al contrato por parte del cliente.

Por otra parte, los márgenes usuales utilizados en un buque de guerra son los siguientes:

Buque	**Desarrollo del proyecto y construcción**		**Modificación del proyecto de contrato y equipo suministrado por el cliente**	
	(%) Peso	**(%) KG**	**(%) Peso**	**(%) KG**
Portaeronaves	6.4 %	5.4 %	0.55 %	0.5 %
Patrullero de altura	4.0 %	3.5 %	1.6 %	0.8 %
Petrolero auxiliar de flota	4.0 %	5.0 %	1.6 %	0.8 %
AOR	3.5 %	3.5 %	0.5 %	0.5 %
LPD	5.0 %	4.0 %	0.5 %	0.5 %
Fragata	4.0 %	3.3 %	1.0 %	0.7 %
Fragata moderna	0.7%	1.5 %	1.0 %	0.7 %

Tabla 1: Márgenes utilizados en la construcción de buques de guerra. (Elaboración propia)

Gestión de riesgos del programa de construcción

La gestión de riesgos de un programa es un procedimiento, generalmente muy detallado, para detectar y evaluar los riesgos que puedan ir apareciendo durante la construcción de un buque. En este documento algunos de los puntos más importantes serán los siguientes:

LHD *Juan Carlos I* entrando en dique.
(Fotografía facilitada por el autor)

— La definición específica de cómo gestionar los riesgos del programa durante todas las fases de éste, desde la oferta hasta la contractual.
— La dirección del programa, quién será el responsable de la gestión de riesgos y presidirá las reuniones del panel de riesgos que regularmente se lleven a cabo.
— El desarrollo del proceso, que incluirá actividades clave, tales como la planificación de la gestión de riesgos, la identificación de éstos, su análisis cualitativo o la planificación e implementación de respuestas a los mismos.
— El control y los informes de la gestión de riesgos.
— La categorización de riesgo del programa, estableciendo niveles de complejidad y asignando valoraciones numéricas para determinar la categoría del riesgo.
— La planificación de la gestión de riesgos, definiendo cómo, cuándo y quién realizará las actividades de gestión de riesgos. En este apartado se incluirá la elaboración de documentos tales como el plan de preparación de la oferta y el plan de gestión de riesgos.
— La identificación y análisis de riesgos, tanto individuales como generales del programa. Para llevar a cabo esta parte, se deben utilizar técnicas basadas en el juicio de expertos y en el análisis de datos para evaluar la probabilidad e impacto de los riesgos.
— La implementación y control de respuestas, ejecutando los planes de respuesta acordados y llevando a cabo el seguimiento de los riesgos identificados.
— Las comunicaciones de la gestión de riesgos, estableciendo niveles y frecuencias de éstas, incluyendo información al cliente y a los comités de dirección. Los informes comunicados deben reflejar el estado actualizado de los riesgos y el progreso de las acciones de mitigación.

Conclusiones

El diseño de un buque de guerra está muy influenciado por las exigencias de las misiones que deba llevar a cabo, por la capacidad de supervivencia y por su peso. Su proyecto puede subdividirse en tres partes, durante las cuales habrá que prestar atención especial al control del desplazamiento. El peso es un dato vital en el proyecto del buque de guerra, por lo que este valor va a estar muy presente durante todo el proceso de construcción.

En la construcción se deben ir analizando progresivamente todos los márgenes existentes mediante un control exhaustivo de la actualización del peso del buque. La elección de márgenes idóneos que cubran las consecuencias de posibles cambios o errores en el diseño será una tarea muy importante. Este control durante toda la construcción ayudará a que no se produzcan desagradables sorpresas al final de la misma, momento en que sería muy dificultosa y cara la marcha atrás para su corrección.

Finalmente, hoy en día la gestión de riesgos de un programa es un criterio fundamental, ya que será muy importante la rápida identificación y control de éstos.

BIBLIOGRAFÍA

DIC-JAL. *Instrucciones para el control de pesos en los buques de la Armada durante las Fases de Proyecto y Construcción*, 1978.

GONZÁLEZ LÓPEZ, P.: *Técnicas de Construcción Naval*, 2021. *https://catalogo-publicacions.udc.es/producto/tecnicas-de-construccion-naval/*

MARTÍNEZ DE CASTRO, F.: *Construcción Naval: estrategia, planificación, fabricación y control,* 2019.

MEIZOSO FERNÁNDEZ, M.; GARCÍA GARCÉS, J. L.: *Desplazamiento. Cálculo iterativo del peso en rosca y peso muerto*, 2000.

VILLA CARO, R.: «Control de pesos durante la construcción de buques». REVISTA GENERAL DE MARINA. Julio 2015.

—«Diseño y construcción de un buque de guerra moderno». *Revista de Ingeniería Naval*. Abril 2021.

—«El proyecto de diseño de un buque de guerra». *Proa a la mar*. Diciembre 2020.

Popa del LHD *Juan Carlos I* durante el DIFAS 2024.
(Foto: José Ricardo Rodríguez Montero)