

EL TIEMPO ENTRE MAMPAROS. LA TECNOLOGÍA DE TIEMPO Y SU USO EN LOS BUQUES DE LA ARMADA

Antonio ESTARELLAS PERALES



Introducción



ACE un tiempo, me encontré intentando explicarle a un conocido el porqué de los cambios en la definición de las unidades fundamentales de medida. En su respuesta a mi exposición quedó patente que la precisión y exactitud que necesitamos en nuestro día a día y la que creemos necesitar están en las antípodas de distancia. Los argumentos expuestos por mi interlocutor defendían la idea de que la búsqueda de mejores resultados estaba impulsada más por el reto tecnológico que por la necesidad real: «Lo hacemos porque creemos que podemos, no porque realmente lo necesitemos». Ésta es la traducción de sus palabras a un lenguaje menos científico. La frase, de una manera más literal, rezaba que la décima de nanosegundo o la milésima del femtosegundo no varían para nada la vida cotidiana de las personas. Escribo este artículo para exponer la importancia de la tecnología de tiempo y frecuencia en lo que al mundo naval se refiere. La relación intrínseca entre la evolución de esta tecnología y el éxito en la navegación se manifiesta en cómo estas innovaciones no sólo han desafiado los límites tecnológicos, sino que también han redefinido las posibilidades y límites de la exploración y el control de los mares.

Antes de comenzar con el desarrollo, es conveniente aclarar los principales usos que *a priori* se le da al tiempo en los barcos, si bien estas aplicaciones, tan generales como ahora expondremos, son comunes a casi cualquier ámbito de la

vida. Más adelante entraremos en detalle en cómo la información obtenida de relojes, cronómetros u otros instrumentos de medición del tiempo se transforma en conocimiento del entorno marítimo y en ayudas a la navegación y el combate.

El primer y más sencillo uso que se le da al tiempo es saber qué hora es, en qué momento del día nos encontramos. La información que obtenemos con un reloj que podemos entender como moderno sería, por ejemplo, que son las 10:27, o que estamos cerca del mediodía observando simplemente la posición del Sol en el cielo. Este conocimiento nos permite coordinar nuestras acciones con las de los demás y nos facilita la planificación de eventos, reuniones y tareas diarias. Acciones aparentemente sencillas y que se realizan todos los días en los buques, como poder dar la novedad de regreso de francos sin ningún fallo a la hora estipulada o que todo el mundo pare a tomar un café en el momento que corresponde, sólo son posibles gracias a los relojes que hoy en día todos tenemos. Pero otros factores tan fundamentales como determinar la posición del barco en alta mar solamente son posibles gracias al uso de relojes.

La siguiente aplicación de estas tecnologías es saber cuánto tiempo ha pasado entre dos eventos. Medir el tiempo cronometrando de manera precisa es un



Reloj y campana en la cubierta del *Juan Sebastián de Elcano*.
(Fotografía facilitada por el autor)

factor fundamental. La cantidad de información que podemos obtener a partir de las tecnologías de cronometría son casi infinitas, aunque es más ilustrativo expresarlo al revés. La inmensa mayoría de la tecnología que usamos actualmente sería imposible sin la cronometría. Conocer el régimen de máquinas del barco mediante las revoluciones a las que gira un motor por minuto sería imposible, de manera precisa, sin cuantificar la duración de un minuto. La velocidad del buque, siempre expresada en nudos o millas por hora, no se puede determinar si no se sabe exactamente cuánto dura una hora. Si bien esto puede parecer obvio, hay otras muchas aplicaciones que no serían posibles sin una adecuada tecnología cronométrica que las soportara.

Una tercera pata, que no deja de ser una resultante de la anterior, es la generación de frecuencias. Digo que se deriva de la cronometría, aunque estrictamente hablando son lo mismo. El hercio se define como la unidad derivada obtenida de la inversa del segundo, por lo que conociendo de manera precisa un segundo, conocemos de forma exacta un hercio y viceversa. Si pensamos en un reloj de péndulo, otra perspectiva en la medición de los segundos se obtiene a partir de la frecuencia a la que oscila éste. Si esta frecuencia es algo mayor que un hercio, el reloj adelantará, ya que sus segundos serán un poco más cortos. Este mismo reloj retrasaría si la frecuencia de su péndulo fuera de algo menos de un hercio. De hecho, la inmensa mayoría de las tecnologías de relojes se basan en generar una frecuencia muy estable conocida, y de ahí, contando ciclos, «fabricar» los segundos.

A pesar de su estrechísima relación, he querido presentar por separado esta aplicación de la tecnología de tiempo para poder entender por qué normalmente se habla de tecnología de tiempo y frecuencia. Lo hemos hecho así debido a que el uso de diferentes frecuencias en los buques de la Armada es de una importancia mayúscula, pero de un tiempo a esta parte es, si cabe, mucho más crítico.

Hasta el siglo XVI

Antes de que Cristóbal Colón se aventurase a cruzar el Atlántico en su búsqueda de una ruta a las Indias hacia el oeste, la navegación era principalmente de cabotaje, cerca de la costa. Una excepción la encontramos en la que cruzaba de norte a sur, o viceversa, el mar Mediterráneo. Este viaje no era excesivamente largo y los requerimientos tecnológicos en lo que a tiempo se refiere no eran muy demandantes.

Si pensamos en la tecnología de tiempo que se utilizaba en la navegación hasta prácticamente el siglo XVI, veremos que se basaba en el uso de la cronometría, es decir, en estimar cuánto tiempo transcurría entre dos instantes determinados. Su principal función era ordenar la vida a bordo y marcar, entre otras cosas, el inicio y el fin de las guardias de la dotación de un barco.

La tecnología existente hasta la invención de los primeros relojes mecánicos a principios del siglo XIV consistía básicamente en relojes de sol y clepsidras o relojes de agua. Es fácil entender que cualquiera de estos dos aparatos presentaba grandes inconvenientes al usarse a bordo de un barco. Con un reloj de sol, además de resultar inútil en un día nublado o durante la noche, el movimiento del propio barco hacía imposible medir de manera suficientemente precisa el tiempo, lo que ocurría también con las clepsidras de agua: el balance o la cabezada de la embarcación hacía variar de manera incontrolada la altura del líquido contenido en su depósito superior, lo que alteraba la presión en la parte inferior y, por tanto, la velocidad con la que el agua caía al depósito inferior, con lo que su escasa precisión las hacía inútiles.

Los inconvenientes que presentaban las clepsidras se solucionaron al sustituir el material que caía del depósito superior al inferior. Al cambiar el agua por arena, si bien éstos no desaparecieron del todo, quedaron muy reducidos. Esto llevó a la fabricación de los relojes de arena, cuyas primeras referencias sobre su uso se encuentran en barcos del siglo XIV. Aunque actualmente estos mecanismos puedan parecer muy simples, en su momento eran instrumentos de gran valor y difíciles de fabricar, ya que se precisaba vidrio lo suficientemente transparente como para poder comprobar el contenido. Uno de estos artefactos lo encontramos en el inventario de las posesiones de Carlos V de Francia en el momento de su fallecimiento en 1380. Entre los objetos registrados había un reloj de arena que estaba instalado en su estudio, que se describía como «un gran reloj de mar». A pesar de la invención a principios de ese siglo de los relojes mecánicos, la imposibilidad de que estos objetos —con sistemas de pesos y pensados para colocarse a grandes alturas, como torres o campanarios— fuesen instalados en los barcos hizo que los relojes de arena fueran conocidos como relojes de mar.

Otro de los nombres que recibían estos instrumentos, utilizado ahora con normalidad, es el de ampolletas. La ampolleta para medir lapsos de tiempo era tan importante como la brújula para conocer la dirección. Tenía la cantidad de arena adecuada para medir un lapso de media hora; cada vaciado de toda la arena era una ampolleta, y ocho ampolletas eran cuatro horas, el tiempo que duraba una guardia. En la relación de instrumentos náuticos con los que partió la expedición de Magallanes y Elcano figuran dieciocho ampolletas. Otro de sus usos fundamentales, como decíamos al principio de este artículo, era como soporte para medir la velocidad del barco. Durante los siglos XV y XVI, la mayoría de los pilotos calculaban la velocidad del barco a ojo, basándose en su experiencia y en el conocimiento de los vientos y de las corrientes o en el efecto de la carga transportada en la velocidad del buque. Para evitar los errores que se cometían en la estimación de la velocidad, en 1577 apareció la corredera de barquilla, que consistía en una tabla sujeta a un cordel que se arrojaba desde la popa del barco. Este cordel tenía nudos a intervalos regulares que permitían estimar la distancia recorrida por la nave en un lapso específico, medido con

una ampolleta, que tenía normalmente una duración de treinta segundos. Generalmente, cada nudo soltado del barco en medio minuto correspondía a una velocidad de una milla por hora. La distancia entre nudos es de 1.852 m (una milla náutica) dividido entre 120, es decir, que los nudos estaban espaciados 15,43 m (50 pies). Con el uso de esta corredera nació el nudo como unidad habitual de medida de velocidad de los barcos que perdura hasta el día de hoy.

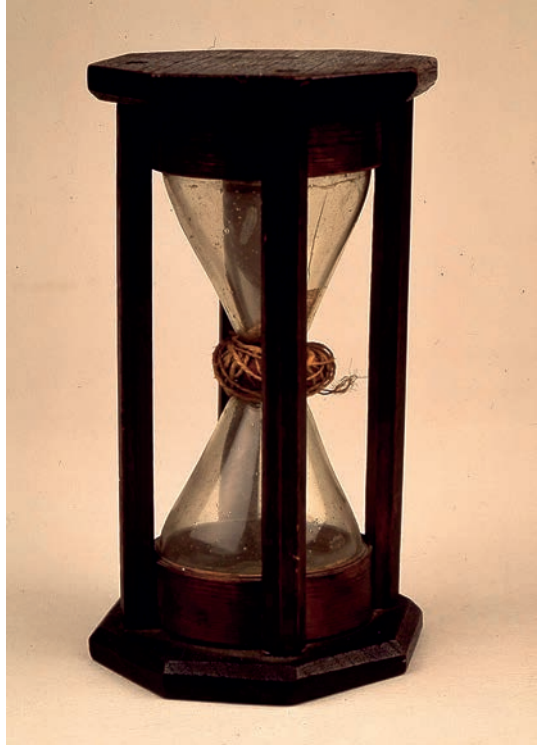
Una vez obtenida la velocidad del barco de manera precisa, empezó a ganar importancia la ampolleta del timonel. Situada al lado del timonel y la brújula, junto con el registro en el diario de a bordo de la velocidad medida con la corredera, permitía al navegante calcular la posición de su barco sobre una carta de navegación. Multiplicando la velocidad por el

tiempo que se había mantenido el rumbo, proporcionaba la distancia recorrida, y la brújula mostraba la dirección del rumbo al que se navegaba. Éste es un método simple que se llama navegación por estima. Para poderlo anotar con precisión, salvo en caso emergencia, los cambios de rumbo se hacían en el momento de completar una ampolleta, con lo que el piloto podía calcular con más exactitud la distancia navegada en ese rumbo.

Si bien estas ampolletas eran instrumentos con una razonable precisión, podían, no obstante, llegar a variar hasta diez minutos por hora, lo que podía conllevar un error en la posición del barco cercano a las 25 millas diarias.

El cronómetro marino

El descubrimiento de América y la regularización de las comunicaciones por mar entre la península ibérica y los nuevos territorios de la Corona de



Ampolleta para medir treinta segundos (siglo XVI).
(Museo Naval de Madrid)

Castilla trajeron consigo la época de las grandes navegaciones transoceánicas, que continuaban siendo bastante inseguras, pues no se habían conseguido avances técnicos importantes respecto a épocas anteriores. La latitud era determinada mediante la observación de las alturas del Sol y de la estrella polar. Sin embargo, el cálculo de la longitud en la mar seguía sin tener un método más preciso que el de la navegación de estima.

Desde principios del siglo XVI se había propuesto una solución bastante sencilla para el problema de la longitud. Como la Tierra da una vuelta al día, cada 24 horas pasa por el mismo lugar. Al dividir la Tierra en 360 grados sexagesimales, resulta que el Sol se mueve, aparentemente, a razón de 360 grados cada 24 horas, es decir, 15 grados por hora. De hecho, la diferencia de longitudes entre dos lugares situados en distintos meridianos se puede calcular fácilmente si conocemos la diferencia que existe entre las horas locales de ambos puntos. Si llevamos en un barco un reloj que señale la hora de San Fernando y nos hallamos en un punto del océano en el que determinamos que es mediodía cuando nuestro reloj señala las 15:00, estaremos a 45 grados de longitud oeste, ya que el mediodía en San Fernando fue hace tres horas y en ese tiempo el Sol ha recorrido 15 grados tres veces. Esta sencilla solución planteaba una pega, ya que, como hemos visto, no existían relojes capaces de mantener la hora de forma precisa en alta mar durante largos períodos de tiempo.

Dada la importancia que tenía la navegación en aquella época, solucionar este problema pasó a ser un asunto de Estado de máxima prioridad. Por ello, en 1567 la Corona española fue la primera en convocar un concurso, premiado con una cuantiosa dotación económica, para encontrar un método efectivo para el cálculo de la longitud. Bastantes años después, en 1714, el Parlamento británico aprobó el Longitude Act, dotado con 20.000 libras (equivalente a varios millones de euros actuales), para aquél que inventase un medio de determinar la longitud con un error de medio grado sexagesimal tras una navegación de un cuarto del círculo terrestre (90 grados), que era la distancia promedio entre Inglaterra y el Caribe. Como la Tierra gira 15 grados por hora, medio grado equivale a una hora dividida por treinta, es decir, una exactitud de dos minutos que tenía que mantenerse durante un viaje de aproximadamente un mes, que es lo que se tardaba en una travesía trasatlántica. Esto significa que el reloj no atrase ni adelante más de 120 segundos en treinta días, o sea, cuatro segundos al día. Como la Tierra mide unos 40.000 kilómetros de circunferencia máxima, que equivalen a 360 grados, un grado es igual a una distancia de $40.000/360$, esto es, unos 111 kilómetros. Medio grado de exactitud en la longitud proporciona una precisión de unos 55 kilómetros tras haber cruzado todo el océano Atlántico.

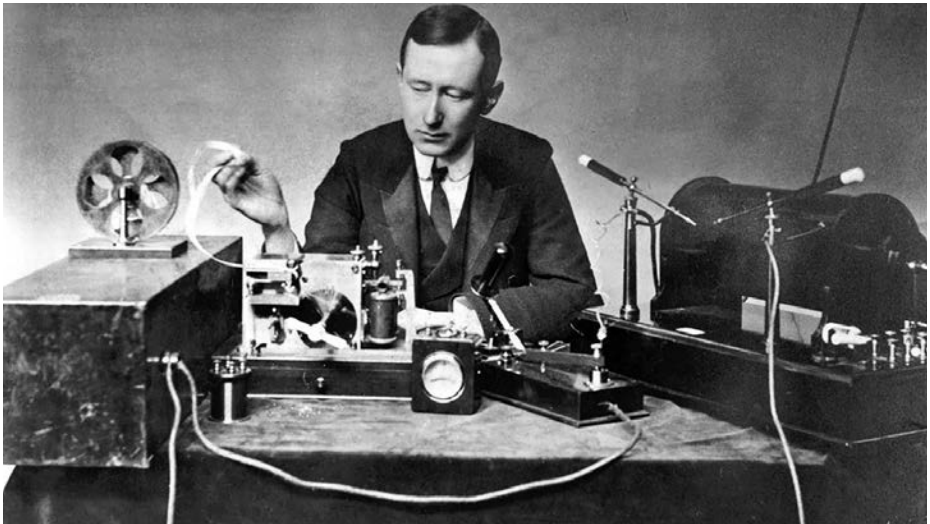
Fue el relojero inglés John Harrison quien en 1736 fue autorizado por el Board of Longitude para efectuar las pruebas de su cronómetro marino en un viaje de ida y vuelta entre Londres y Lisboa. Los buenos resultados obtenidos le fueron recompensados con una ayuda oficial para que construyese un nuevo prototipo más perfeccionado. Unos años más tarde, Harrison conseguiría fabricar

un cronómetro que, tras 81 días de prueba en un viaje de ida y vuelta entre Londres y Jamaica, sólo acumuló un error de cinco segundos. Así, el avance que se produjo en la tecnología de tiempo y frecuencia permitió posicionar los barcos en alta mar.

Comunicaciones navales y radares

A comienzos de 1864, el matemático y científico James Clerk Maxwell presentó un documento a la Royal Society en el que demostraba la existencia teórica de las ondas electromagnéticas y su propagación a través del espacio. Pasaron 23 años antes de que Heinrich Hertz lograra generar y detectar esas ondas, demostrando que viajaban en líneas rectas, a la velocidad de la luz y que podían ser reflejadas en objetos metálicos.

Estos dos avances científicos fueron el punto de inicio de una carrera tecnológica para desarrollar la telegrafía sin hilos con la que poder establecer comunicación sin necesidad de estar a distancia visual. Fue Guillermo Marconi quien, apoyado por la Royal Navy, creó un sistema que probó eficazmente en 1899: utilizando tres buques como relés, fue capaz de transmitir un mensaje entre Torbay, cerca de Plymouth, y la isla de Wight, próxima a Portsmouth, realizando una conexión de 87 millas. Como curiosidad, la primera comunicación radio entre buques de nuestra Armada se llevó a cabo entre el crucero protegido *Extremadura* y el acorazado *Pelayo* el 16 de agosto de 1904.



Guillermo Marconi con su equipo de radiotransmisión. (Fuente: *National Geographic*)

El mayor inconveniente que presentaba esta tecnología era que la frecuencia que se utilizaba tenía un gran ancho de banda y apenas había control sobre la misma. Esto suponía que si dos estaciones o dos buques emitían a la vez, lo más probable era que los mensajes fueran ininteligibles o que sólo el que tuviera más potencia de emisión pudiese realizar una comunicación exitosa.

Durante toda la primera mitad del siglo xx se hizo, una vez más, un gran esfuerzo para que la tecnología de tiempo y frecuencia alcanzase el nivel de refinamiento necesario para responder a las demandas que se presentaban. La primera mejora que se desarrolló fue la válvula termoiónica. Patentada en 1904, con su uso las frecuencias de transmisión pudieron controlarse mejor, las interferencias fueron radicalmente reducidas, se incrementaron las potencias irradiadas, las señales eran más inteligibles y la velocidad de transmisión fue mayor. Y lo más importante de todo, la válvula hizo posible la comunicación por radiotelefonía, lo que permitió además desarrollar aplicaciones concretas para el enlace con y desde aeronaves.

A partir de ahí, nos osciladores de cuarzo, los receptores superheterodinos y los transistores nos acercaron a los sistemas de comunicaciones que tenemos hoy en día. Por ponernos en situación, se pasó de que los buques de mediados de 1940 comúnmente llevasen un transmisor de onda media y otro de HF —que ocupaban una superficie de entre 13 y 15 metros cuadrados, con un peso aproximado de 4,5 toneladas— a la instalación de un equipo moderno de transmisión de alta potencia, que cubría ambas bandas y se podía montar en una estructura estándar (*rack*) de 19 pulgadas, con un peso aproximado de 25 kilos, pudiendo además cumplir simultáneamente las funciones de transmisión y recepción.

Una de las primeras derivadas del uso del espectro electromagnético por parte de las diferentes marinas del mundo fue la aparición de la guerra electrónica. Con equipos que podían emitir en una frecuencia determinada, la detección de dichas frecuencias era un indicio claro de la presencia de buques. En 1915 se instaló en Inglaterra una cadena de cinco estaciones de radiogoniometría capaces de detectar con precisión a los buques que usaban telegrafía inalámbrica en cualquier lugar del mar del Norte. El sistema, usado en conjunto con la adquisición fortuita del código de seguridad alemán de telegrafía inalámbrica, hizo posible que la flota inglesa adoptara una estrategia de bloqueo a distancia, saliendo a la mar solamente con los cambios de movimientos de la Flota de Alta Mar alemana o Hochseeflotte. La culminación de esta estrategia fue la batalla de Jutlandia a mediados de 1916, en la cual una serie de acciones demostraron el valor táctico de la telegrafía inalámbrica y de la guerra electrónica.

En 1922, el propio Marconi, en una nota al Instituto Americano de Ingenieros de Radio, decía: «En algunos de mis experimentos he notado los efectos de la reflexión y refracción de estas ondas por objetos metálicos distantes a varias millas. Creo que es posible diseñar un aparato por medio del cual un buque podrá radiar ondas que, si chocan con el casco metálico de otro buque, podrán

reflejarse y detectarse de regreso en un receptor y con ello revelar la presencia y demarcación de este buque». A pesar de que Marconi no pasó de esta reflexión teórica, hubo varios intentos de llevar a cabo el diseño del aparato que presagiaba. En abril de 1937, un radar experimental que trabajaba con una longitud de onda de un metro y medio fue instalado en el destructor *Leary* de la US Navy. Tras una serie de mejoras, se convirtió en el primer equipo que tuvo éxito en la detección, con un alcance de hasta 40 millas. Estas pruebas fueron hechas con antenas transmisoras y receptoras separadas, hasta que en febrero de 1938 un duplexor, elemento que permitía usar la misma antena para transmisión y recepción, fue concebido y perfeccionado. De esta manera, el primer equipo de radar tal y como lo conocemos actualmente, denominado XAF, se instaló en el acorazado USS *New York* en diciembre de ese año. Por dar una idea del nivel de desarrollo tecnológico necesario para poder llevar a cabo estos avances, una onda electromagnética con una longitud de onda de 1,5 metros tiene una frecuencia de 200 MHz, lo que equivale a un ciclo cada cinco nanosegundos, es decir, cinco veces la milmillonésima parte de un segundo.

La era espacial

Otra de las grandes revoluciones en la que la tecnología de tiempo ha sido fundamental, ya en la época actual, es el posicionamiento satelital. Como es sabido, el sistema global de navegación por satélite (GNSS) permite posicionar un buque en tiempo real y con una precisión más que razonable, por debajo del metro. Si bien no entraremos en detalle sobre cómo funcionan estos sistemas, es imprescindible remarcar el papel que la tecnología de tiempo cumple en los mismos.

Cada uno de los satélites de las constelaciones GPS y Galileo lleva a bordo relojes atómicos de cesio y rubidio, de gran precisión a corto y medio plazo. Estos sistemas de radiodeterminación proporcionan a los usuarios información exacta sobre la posición, la velocidad y, en lo que respecta a este trabajo, una valiosa determinación del tiempo, estando diseñados para ofrecer este servicio a un número ilimitado de usuarios en cualquier parte del mundo y bajo cualquier condición meteorológica.

El concepto de radiodeterminación se basa en la triangulación de las señales de radio recibidas de una serie de transmisores con situaciones conocidas. El usuario básicamente computa el tiempo que tarda en llegar la señal de los diferentes transmisores a su receptor y, multiplicando estos tiempos por la velocidad de transmisión, se calculan las distancias relativas a cada uno de ellos. Mediante cualquier sistema GNSS y utilizando cuatro satélites, es posible sincronizar el reloj del receptor y conseguir una situación precisa en tres dimensiones. Y aquí radica la clave, ya que por «bueno» que sea el reloj del receptor, sus fallos comprometen seriamente la exactitud de la medición (un error de un microsegundo,

normal en un reloj de cuarzo, equivale a 300 metros de error en distancia), por lo que es necesario utilizar un cuarto satélite para proporcionar el tiempo, además de la latitud, longitud y altura. Es más, al objeto de obtener mayor precisión en el cálculo, se suele disponer de hasta una decena de satélites de una misma constelación en un mismo instante.

Los satélites llevan relojes atómicos a bordo, y el segmento de control del sistema se encarga, entre otras cosas, de mantener controlados estos relojes e ir calculando las desviaciones que presentan respecto a la escala del tiempo del sistema. Por ejemplo, en el caso de Galileo se utiliza la escala Galileo System Time (GST), en la que participa el Real Observatorio de la Armada (ROA) junto a los laboratorios nacionales de tiempo y frecuencia de Alemania, Francia, Italia y Suecia.

Su uso en la actualidad y en el futuro

Los buques de guerra actuales no se podrían entender sin el uso de la tecnología de precisión de tiempo y frecuencia. A todas las tecnologías que ya hemos visto, y que en mayor o menor medida se siguen utilizando en los barcos, hay que añadir miles de casos que permiten ver su grado de importancia.

Podemos poner un ejemplo que aún tanto la necesidad de un sincronismo excepcional como el uso de diferentes frecuencias y su control. El radar SPY/1D que montan las *F-100* es un sistema muy particular. Una de las primeras cosas que llama la atención al fijarse en cualquiera de los barcos que componen la clase *Álvaro de Bazán* es la disposición de sus cuatro antenas del radar. Al pensar en un radar lo normal es que nos venga a la mente la imagen de una antena girando de forma constante. Esto no pasa con el SPY, ya que basa su sistema de barrido en el apuntamiento electrónico. Cada uno de los cuatro paneles está compuesto por una gran cantidad de pequeñas celdas que contienen dentro un emisor. Para poder apuntar a un punto concreto del espacio, el instante en que cada uno de los elementos ha de emitir se calcula de manera muy precisa. Jugando con los tiempos de emisión, generamos un frente de onda que se dirige al punto deseado gracias a las interferencias constructivas y destructivas que se producen, cada uno de los pequeños emisores radiando a un instante concreto unos pulsos extremadamente cortos y de forma perfectamente coordinada. El control sobre el tiempo y la frecuencia que es necesario alcanzar para llevar a cabo toda esta operación nos demuestra que estamos hablando de una tecnología que vuelve a convertirse, otra vez, en una pieza fundamental para conseguir la superioridad en la mar.



Fragata *Almirante Juan de Borbón* (F-102). (Foto: Armada)

Conclusión

Desde el principio de los tiempos, la tecnología de tiempo y frecuencia ha sido un elemento clave en el importante control de los mares. Hemos visto cómo su desarrollo ha impulsado a las naciones a lo largo de la historia. La siguiente pregunta que cabe hacerse es a dónde nos llevará a partir de ahora. Los relojes ópticos, como el que se está construyendo en la Sección de Hora del ROA, incrementarán hasta mil veces la precisión de los actuales relojes atómicos, si bien hoy en día el óptico ocupa una habitación entera, lo mismo que pasaba con los primeros ordenadores. En definitiva, estamos ante el nacimiento de esta nueva tecnología y sólo falta por saber hasta dónde nos puede llevar.



«Toro» sobre cubierta durante el Ejercicio MAR-24-1 de la 41.^a Escuadrilla de Escoltas.
(Foto: Ernesto Grueso García)

