

# NAVEGACIÓN ASTRONÓMICA PRECISA. CUESTIÓN DE TIEMPO

Martín LARA COIRA



Teodoro LÓPEZ MORATALLA



## Introducción



A situación astronómica no está de moda. En la carrera profesional de un oficial de la Armada, las observaciones con el sextante se reducen casi exclusivamente a las prácticas a bordo del *Juan Sebastián de Elcano*, donde los días nublados son una bendición y al guardia marina aplicado se le premia liberándole de las observaciones. Aparte del inolvidable viaje de instrucción, raras son las ocasiones en las que un oficial se acerca a la caja del sextante, y si se abre el Almanaque Náutico posiblemente no sea más que para calcular la hora de la puesta de Sol. Y ya sería mala suerte recibir una señal táctica pidiéndonos situación astronómica en un tránsito en escuadrilla; a ver quién se acuerda de cómo rayos era aquello de la recta de altura.

La observación en sí tampoco está tan mal. Siempre y cuando sea la meridiana, claro. Corrección de índice, un par de «tangenteos» y ¡ya está! Además queda muy marinero: ¿quién no tiene aquella foto con sextante? Pero preparar el «mono»... Y luego está el tedioso «tipeo» para, con suerte, dar una situación con media milla de error. Pero ¡joiga!, ¡si tenemos el GPS!

Realmente, no tenemos mucho más que el GPS. Los servicios de radiobalizas y el sistema Decca, aparte de su alcance limitado, se han dejado de mantener por muchos países; el Omega, el único sistema terrestre de cobertura global, dejó de operar en 1997; y aunque el Loran C ha tenido un pequeño auge en Europa y Asia, en Estados Unidos tiene los días contados. Además, la precisión obtenida al situarse con sistemas hiperbólicos depende de la distancia a la estación transmisora, del ángulo de corte de las líneas de posición, de la hora del día, etc., y no es ni por asomo comparable a la obtenida por los sistemas de navegación por satélite, por lo que no parece muy arriesgado augurar su fin a no muy largo plazo. Con respecto a los sistemas de navegación por satélite, el Transit dejó de operar también en 1997, el ruso Glonass

todavía no proporciona la situación de forma permanente, y a los europeos EGNOS (European Geostationary Navigation Overlay Service) o Galileo aún les quedan unos años.

Lo dicho, si queremos (y debemos) situarnos por dos medios independientes, aparte del GPS poco más nos queda que la situación astronómica (que, por cierto, también utilizan los americanos). Además, hoy en día tampoco es tan penoso situarse astronómicamente, pues muchos de los cálculos nos los simplifica el ANdi (1). Y otras aplicaciones comerciales, claro. Más bonitas, más cómodas de utilizar y, además, al contrario que la actual distribución del ANdi, que limitaba su validez entre 1998 y 2003 (2), uno se puede olvidar de actualizarlas, pues su intervalo de aplicación es de cientos de años. ¿Se puede pedir más?

Pero, ¿y el UT? ¿Qué pasa con el UT?

## El reloj y la fórmula

Para situarnos por observaciones astronómicas, debemos conocer la posición de los astros estudiados a las horas de observación. Cuanto mayor sea la precisión con la que conocemos la posición de cada astro, fundamentalmente su altura verdadera, más precisa podrá ser la situación obtenida. La hora de la observación la tomamos del reloj. La posición verdadera del astro a esa hora la tomamos del Almanaque Náutico. Perfecto. Los «sabios» de la Sección de Efemérides del Observatorio de la Armada se han preocupado de darnos una posición con exactitud «proporcionada a la precisión de los instrumentos de a bordo». La hora de la observación la referimos al reloj magistral del barco, cuyo perfecto funcionamiento garantizan los «maestros relojeros» de la Sección de Hora del Observatorio, y cuyo estado absoluto conoceremos y estudiaremos al sincronizarnos con las señales horarias de dicho observatorio.

Las posiciones de los astros se obtienen de teorías que, a fin de cuentas, no son más que fórmulas. Ilustremos el problema con el caso por todos conocido del movimiento rectilíneo bajo aceleración constante, donde:

$$x = x_0 + v_0 t + 1/2 a t^2$$

y, si conozco la posición inicial  $x_0$  con respecto al origen de coordenadas y la velocidad inicial  $v_0$ , y por supuesto la aceleración  $a$ , puedo conocer la posi-

---

(1) ANdi es el acrónimo de Almanaque Náutico en disquete, aplicación del Real Instituto y Observatorio de la Armada que facilita a los navegantes los elementos astronómicos necesarios para la reducción de sus observaciones, así como otros datos útiles a la navegación.

(2) Posiblemente, cuando se publique este artículo ya se esté distribuyendo una nueva versión válida para el periodo 2000-2010.

ción  $x(t)$  en cualquier instante por simple evaluación de la fórmula. Análogamente, el movimiento de los astros se representa por un conjunto de fórmulas, más o menos complicadas, que proporcionan sus posiciones en cualquier instante. Sencillo. Bueno, no tan sencillo, pues nuestro origen de coordenadas es el punto de Aries, que no se está quieto. Pero, vaya, también podemos representar su movimiento por otra fórmula, y asunto solucionado.

No sé si lo hemos dicho pero, en las fórmulas,  $t$  es el tiempo. Lo que miro en el reloj también es el tiempo. Pero el tiempo de la fórmula y el tiempo del reloj son cosas distintas. El tiempo de la fórmula, variable independiente de las ecuaciones de la dinámica, es una escala uniforme, que actualmente se denomina Tiempo Terrestre (TT). Es decir, si utilizo el segundo como unidad de tiempo, la duración de dos segundos cualesquiera es siempre igual; y lo mismo reza para la duración de cualquiera de sus subdivisiones, ya sean microsegundos, picosegundos o femtosegundos. Sin embargo, el tiempo del reloj es otra cosa, más relacionada con las necesidades de organizar la vida diaria que con los problemas de la mecánica celeste.

## UT y TT. Breve relato

Gustan los entendidos en tiempo de citar al obispo de Hipona: «¿Qué es, pues, el tiempo? Si nadie me lo pregunta, lo sé; si quiero explicarlo al que me lo pregunta, no lo sé» (San Agustín, Confesiones XI, 14, 17). De cualquier forma, sea el tiempo lo que sea, resulta muy conveniente medirlo, y de ello se ha preocupado el hombre desde sus orígenes. Y ya en el lejano *Génesis* estaban las luminarias (el Sol y la Luna) allí arriba para medir el tiempo.

Tradicionalmente hemos usado la Tierra como reloj. La rotación alrededor de su eje nos sirve para definir el día como el intervalo entre dos pasos consecutivos del Sol por el meridiano del lugar; y el ángulo horario del Sol —ángulo que forma en cada instante el círculo horario con el meridiano superior del lugar— nos determinará la hora. Pero las horas así obtenidas, combinación de los movimientos de rotación y traslación de la Tierra, no tienen todas la misma duración. En efecto, en su movimiento anual el Sol aparenta desplazarse sobre la eclíptica, que está inclinada 23,5 grados con respecto al ecuador y, aun cuando su movimiento fuera uniforme (que no lo es por la excentricidad de la órbita terrestre), su proyección sobre el ecuador, que es donde se mide el horario, no será uniforme. Se define entonces un Sol medio, que recorre el ecuador con velocidad uniforme a lo largo del año (la diferencia entre los horarios de los soles verdadero y medio es la llamada ecuación de tiempo).

Como el Sol medio no existe, no podemos medir su horario, pero sí el de las estrellas fijas. Midamos entonces el tiempo sidéreo y calculemos el día

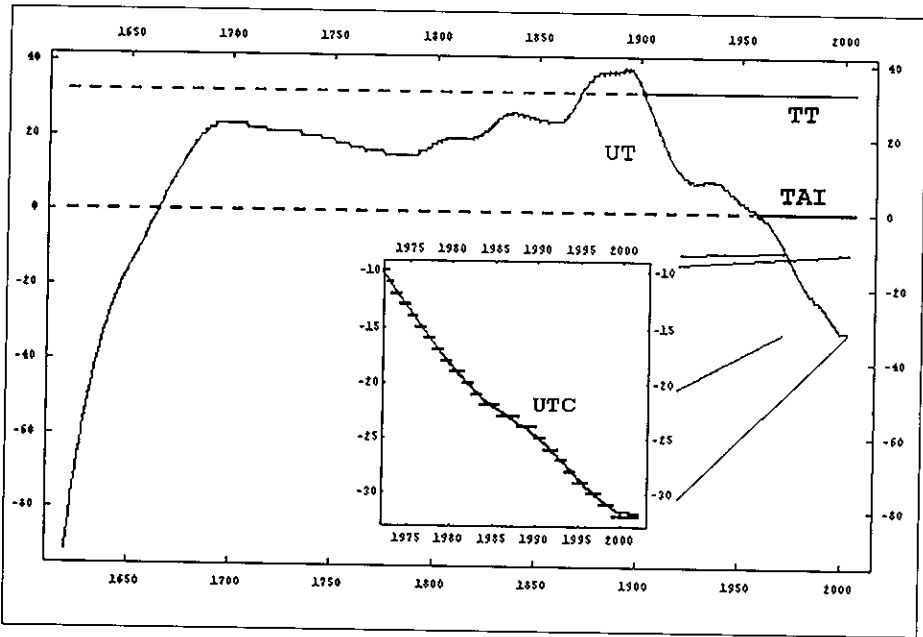
solar medio a partir de él: la relación entre ambos tiempos es muy sencilla pues, debido a la traslación de la Tierra alrededor del Sol, cuando el año se cuenta en días sidéreos dura un día más que cuando se cuenta en días solares. Si definimos ahora la unidad de tiempo, el segundo, como  $1/86400$  días solares medios, ya podemos construir relojes. Por otra parte, como el horario depende del meridiano del lugar, se ha convenido en definir un tiempo referido al meridiano de Greenwich, que actualmente se denomina Tiempo Universal y que se representa por las siglas UT.

Bueno, pues a pesar de todos estos esfuerzos nuestro reloj no mide un tiempo uniforme. Así, si con nuestra teoría determinamos el intervalo de tiempo (TT) transcurrido entre dos observaciones de un astro (en la ecuación del movimiento rectilíneo uniformemente acelerado consistiría simplemente en medir  $x$  en un momento dado y resolver el trinomio de segundo grado para despejar  $t$ ), resulta que no coincide exactamente con el intervalo medido con nuestro reloj de UT. El motivo de esta discrepancia es la falta de uniformidad en la rotación de la Tierra. En otras palabras, la Tierra no es un buen reloj. Se abandona entonces el reloj astronómico, se redefine el segundo en función de las oscilaciones en los átomos de Cesio y aparecen el Tiempo Atómico Internacional (TAI) y los relojes atómicos. Ahora sí que tenemos una escala uniforme que nos sirve para medir el TT.

Pero esto no acaba aquí: la siembra es la siembra y la cosecha es la cosecha. El calendario manda y el Sol, y por tanto el UT, gobierna nuestra rutina. Debido a las irregularidades de la rotación de la Tierra, el TAI se aparta del UT y la diferencia entre ambos sólo puede conocerse *a posteriori* del estudio de dicha rotación. Por tanto, nuestros exactos relojes no se sincronizan con el TAI, sino con otro tiempo: el Tiempo Universal Coordinado o UTC. Este nuevo tiempo corre uniformemente en la misma escala que el TAI, aunque se modifica intercalando o suprimiendo un segundo cuando es necesario, de manera que el UTC nunca se separe más de 0,9 segundos del UT. En resumen, por los motivos expuestos necesitamos utilizar distintas escalas de tiempo:

- El UT definido por la rotación terrestre, que no es uniforme.
- El TT de las teorías de la mecánica, con el que se predicen los movimientos de los astros.
- El TAI, que materializa el TT y que es la escala más precisa que podemos realizar en la práctica.
- El UTC, con la misma marcha el TAI, que se corrige discontinuamente para ponerlo de acuerdo con el UT. Es la hora de nuestros relojes.

Es importante recordar que el argumento de entrada en el Almanaque Náutico es, por supuesto, el tiempo, pero no el UTC de nuestros relojes, tampoco el TT ni el TAI, sino el UT.



Evolución de la diferencia en segundos entre las distintas escalas de tiempo. La diferencia constante entre TT y TAI (32,182 segundos) es por motivos históricos. En el detalle se muestra la relación entre el UTC y el UT, donde se aprecian las sucesivas intercalaciones de segundos. Así, con respecto a los relojes atómicos del TAI, mi reloj de UTC va retrasado 32 segundos desde 1999, mientras un reloj de UT iría 31.3 segundos atrasado en 1999; 31,6 en 2000; 31,7 en el año 2001, etcétera.

### ¿Son importantes unos segundos?

Un par de segundos de tiempo equivalen a una variación de medio minuto en el horario de los astros, variación que se reflejará íntegramente en la longitud del observador. Luego sí que son importantes los segundos a la precisión que puede obtener el navegante en su situación astronómica. Esta influencia hay que analizarla desde dos perspectivas: la del que construye un almanaque náutico y la de aquel que lo utiliza.

Las teorías que proporcionan las posiciones de los astros a partir del TT no dan directamente el horario, sino las coordenadas uranográficas para las estrellas y las eclípticas para el Sol, la Luna y los planetas. La variación del ángulo sidéreo y de la declinación es muy pequeña para las estrellas, algo menos de un grado diario en el ángulo sidéreo del Sol, mientras que para la Luna se producen las variaciones más notables: aproximadamente entre 10° y 17° diarios en el ángulo sidéreo y de hasta más de 6° en la declinación.

En la actualidad hay más de un minuto de diferencia entre el TT de las fórmulas y el UT, escala esta última en la que deben presentarse los almanques (3). Luego, si no tenemos en cuenta esta diferencia en nuestras fórmulas, al calcular, por ejemplo, la declinación de la Luna a las 1100 horas UT, obtendríamos el valor correspondiente a las 1059 h, lo que podría introducir un error de un cuarto de minuto en dicha coordenada, a todas luces inaceptable si se hubiera de observar este astro para situarse.

Esta cuestión tampoco es preocupante, pues la diferencia entre el TT y el UT se tiene en cuenta en la elaboración tanto de nuestro Almanaque Náutico como del ANdi, por lo que no es peor marino aquel que vive ignorante del TT. Como ya hemos dicho, la diferencia entre TT y UT se conoce del análisis *a posteriori* de las irregularidades en la rotación de la Tierra, y su valor se extrapola en base a las mediciones de años anteriores. Esta extrapolación es una predicción estadística cuya validez está limitada en el tiempo y, en consecuencia, limitamos la validez de nuestro ANdi a unos pocos años.

Sí que es más preocupante, en cambio, utilizar el UTC en vez del UT para datar nuestras observaciones. Teniendo en cuenta que la situación obtenida con el sextante puede darse con una precisión de la décima de minuto de arco, no estaría justificado introducir un error, que podría llegar hasta 0,9 segundos en la hora de la observación (0,2 minutos de longitud), por usar el UTC en vez del UT. Máxime cuando la diferencia entre UT y UTC se obtiene por el sencillo procedimiento descrito en el Almanaque Náutico (4), sin más que sintonizar las señales horarias del Observatorio.

## Conclusiones

En esta breve nota se han intentado clarificar algunos aspectos referentes a la construcción y uso de almanques náuticos, aspectos que podrán ser de aprovechamiento tanto para simples usuarios como para aquellos otros que gustan de hacerse sus propios almanques. Por supuesto, el tiempo y sus escalas no es un asunto trivial. La breve descripción que aquí se ha hecho es forzosamente divulgativa aun a riesgo de no haber sido totalmente rigurosos: ni el TAI es una escala exactamente uniforme (se determina de diversos relojes atómicos a través de procesos estadísticos), ni los relojes atómicos determinan directamente el TAI, sino un «tiempo propio topocéntrico», etcétera.

---

(3) No cabría presentar los almanques en otro tiempo (TT, TAI o UTC), ya que el horario depende del tiempo sidéreo, el cual se ve afectado por las irregularidades de la rotación de la Tierra. Es decir, el argumento necesario para calcular el horario de Aries forzosamente debe ser el UT.

(4) En la explicación de las señales horarias aparece la notación UT1. En este contexto debe considerarse equivalente al UT, tal y como se indica en el glosario del Almanaque Náutico.

Por otra parte, ¿se justifica la navegación astronómica en el tercer milenio? Con los medios actuales y futuros de radionavegación, parece que la navegación astronómica se reserva para el disfrute de aficionados o las emergencias de profesionales. En cualquier caso, si se quiere obtener la mayor precisión posible en la situación astronómica, se deben tener en cuenta los aspectos relacionados con el tiempo que aquí se han mencionado. La mayor precisión en la determinación de la hora se refleja directamente en la longitud, siendo deseable datar la observación a la décima de segundo cuando sea posible, o al medio segundo cuando menos, como se explica en los textos de navegación. Y nunca sería justificable obviar la diferencia entre UT y UTC.

Como ya se ha mencionado, además de los almanaques del Observatorio existen otras aplicaciones comerciales que efectúan cálculos astronómicos y de navegación. Hoy en día se acepta que el desarrollo de un país va en gran medida unido a su capacidad empresarial, que lleva a que el Estado se ocupe del menor número posible de tareas técnicas o científicas, manteniendo o financiando sólo aquellas otras que claramente no son rentables desde el punto de vista comercial. En este contexto, y ante la proliferación de aplicaciones informáticas de todo tipo relacionadas con la astronomía y la navegación, la tendencia entre las oficinas de efemérides astronómicas de todo el mundo es antes mantenerse como centros de referencia que competir en un mercado abierto.

