

La medida del tiempo II: Relojes modernos

J. Mariano Merino de la Fuente

Catedrático de Didáctica de las Ciencias Experimentales. Universidad de Valladolid

Desde su invención a mediados del S. XVII hasta bien entrado el S. XX, los relojes de péndulo han proporcionado la máxima precisión posible en las medidas del tiempo. Gracias a ellos han sido posibles importantes avances en Astronomía, Física, Química y otras ciencias. A comienzos del S. XIX los relojes de volante, más pequeños y portátiles, mejoraron sus prestaciones y compitieron con los de péndulo. En la última década de este siglo se incorporan los sistemas eléctricos de impulsión que proporcionaron más autonomía y regularidad a los relojes mecánicos. Todo ello ha sido tratado en un artículo precedente. Es en los años treinta del S. XX cuando aparecen los relojes de oscilador electrónico y poco después los de cuarzo. Finalmente, en los años sesenta, aparecen los relojes atómicos. Todos estos nuevos dispositivos ofrecen una exactitud y fiabilidad que los hace imbatibles frente a los relojes clásicos, lo que unido al bajo costo de los nuevos relojes, ha supuesto un rápido proceso de extinción de los relojes mecánicos, similar a lo que sucedió en nuestro planeta hace unos 60 millones de años. Hoy la profesión de relojero ha desaparecido casi por completo y los pocos maestros de este noble oficio que aún quedan son tan solo los mantenedores del rico, eso sí, patrimonio relojero de muchos museos, instituciones públicas y particulares caprichosos o nostálgicos de un pasado sin duda esplendoroso.

Relojes de cuarzo

El reloj de cuarzo es un reloj electrónico que se caracteriza por poseer una pieza de material piezoeléctrico que sirve para generar los impulsos necesarios a intervalos regulares, que permitirán la medición del tiempo. El cuarzo se talla habitualmente en forma de lámina y se introduce en un cilindro metálico. Éste tiene por función la protección del mineral. Para que vibre el cristal de cuarzo, debe ser alimentado por un campo eléctrico oscilante generado por un circuito electrónico.

El cuarzo hace el papel de regulador y estabilizador de la frecuencia, lo que servirá finalmente para dar una medida del tiempo. La vibración de la lámina producida por el circuito genera una señal eléctrica de la misma frecuencia. Esta nueva onda realimenta el circuito electrónico, corrigiéndose las desviaciones de frecuencia que pudieran producirse respecto a su valor nominal. La frecuencia natural de

oscilación de un cristal de cuarzo depende tanto de su forma como de su tamaño por lo que puede ser seleccionada por el fabricante.

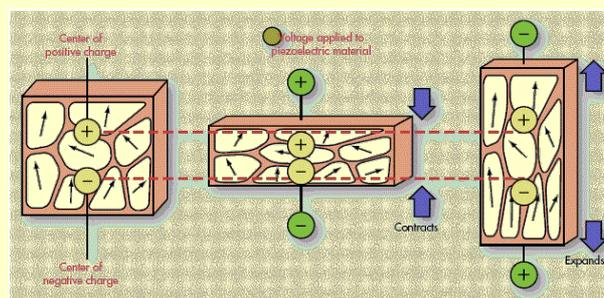


Fig. 1 Cuando un cristal de cuarzo piezoeléctrico es comprimido o expandido, genera una diferencia de potencial y, viceversa, al serle aplicada una diferencia de potencial alterna, este se contrae y expande rítmicamente. Si la frecuencia del potencial eléctrico alterno coincide con la frecuencia natural de vibración del material piezoeléctrico, se da una resonancia manifestada como una amplificación de las oscilaciones.

Es de señalar que los relojes de cuarzo no son siempre digitales, siendo también muy habituales los relojes de cuarzo con mecanismo de agujas. En este caso, las vibraciones del cuarzo se convierten en giro de los engranajes mecánicos por un procedimiento similar al de los relojes de oscilador electrónico (ver el artículo precedente).

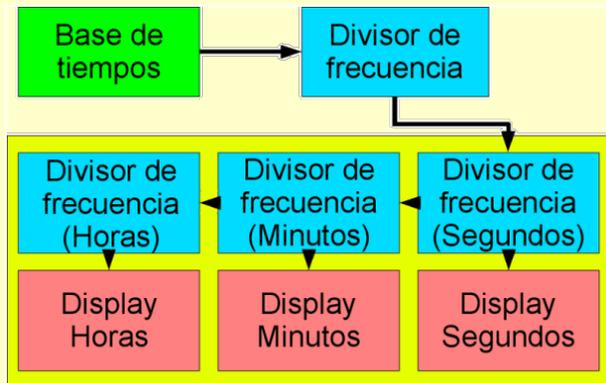


Fig. 2 Esquema de un reloj de cuarzo con pantalla digital.

Relojes atómicos

La medida del tiempo se ha hecho tradicionalmente por comparación del tiempo objeto de medida con el número de ciclos u oscilaciones del patrón de tiempo propio del ingenio relojero usado para tal fin. Así, el número de vueltas dado al reloj de arena, el volumen de agua vertido por la clepsidra, el número de oscilaciones efectuadas por el péndulo o el avance de las manecillas (proporcional al número de oscilaciones efectuadas por el volante) proporcionan la medida de la magnitud. Todo esto requiere que el patrón de tiempo del reloj sea lo más estable posible, siendo ello determinante para su exactitud.

Ciertamente, a lo largo de los siglos se han arbitrado soluciones tan variadas como ingeniosas, algunas de las cuales se han expuesto en un artículo precedente, para lograr la máxima estabilidad del patrón de tiempo de los relojes mecánicos. No menos cierto es que la aparición de los osciladores electrónicos y de cuarzo piezoeléctrico han supuesto una extraordinaria mejora en la exactitud y fiabilidad de los relojes.

A mediados del S. XX aparecen los relojes atómicos, en los que la base de tiempo es la oscilación de una molécula o de un átomo entre dos de sus estados energéticos. Estos lo hacen en ciertas condiciones mediante un dispositivo denominado MASER (*microwave amplified by stimulated emission of radiation*). Cuando una molécula o un átomo se hallan en un estado energético adecuado y pasan cerca de una onda electromagnética, ésta puede inducirles a emitir energía en forma de otra

radiación electromagnética con la misma longitud de onda que refuerza la onda de paso y desencadena una cascada de fenómenos que llevan a aumentar mucho la intensidad del impulso original.

En un principio (1949) se utilizó la resonancia magnética molecular del amoníaco lográndose exactitudes comparables a los relojes de cuarzo, ya existentes por entonces.

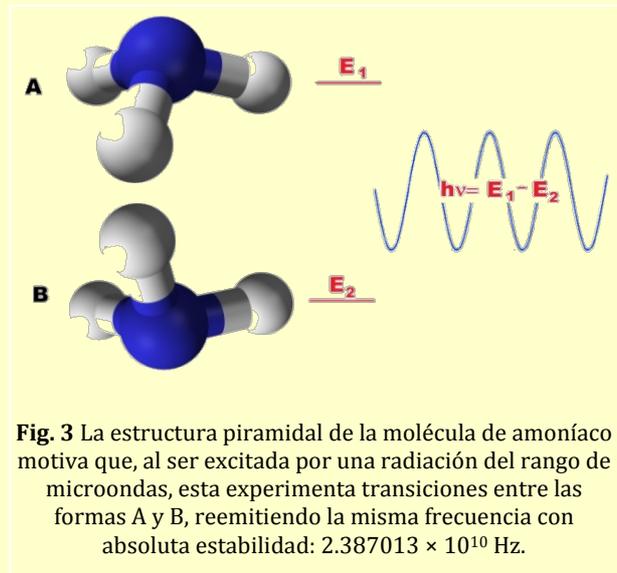


Fig. 3 La estructura piramidal de la molécula de amoníaco motiva que, al ser excitada por una radiación del rango de microondas, esta experimenta transiciones entre las formas A y B, reemitiendo la misma frecuencia con absoluta estabilidad: 2.387013×10^{10} Hz.

Pocos años después (1955) se construyó el primer reloj basado en las oscilaciones de la transición hiperfina del electrón $6s^1$ del ^{133}Cs , fueron sus artífices Louis Essen y John V.L Parry. La precisión alcanzada con este tipo de reloj atómico es tan elevada que admite únicamente un error de un segundo en 30.000 años. El reloj más preciso del mundo se encuentra en el Observatorio de París, su exactitud es tal que tardaría 52 millones de años para desfazarse un segundo; Ello significa que si ese reloj hubiera comenzado a funcionar el día en que desapareció el último dinosaurio y hubiera mantenido su marcha ininterrumpidamente hasta hoy, habría experimentado una variación de ± 1 s.

En el año 1967 los relojes atómicos basados en cesio habían conseguido fiabilidad suficiente como para que la Oficina Internacional de Pesas y Medidas eligiera la frecuencia de vibración atómica de los dispositivos creados y perfeccionados por Essen como nuevo patrón base para la definición de la unidad de tiempo físico. Según este patrón, un segundo se corresponde con 9.192.731.770 ciclos de la radiación asociada a la transición hiperfina del isótopo de cesio 133 en su estado fundamental. Actualmente existen relojes de Rubidio y también de Hidrógeno.

El cesio pertenece a la familia de los elementos alcalinos. Su elevado radio atómico de $3,34 \times 10^{-10}$ m

comparado con su radio nuclear de $6,1 \times 10^{-15}$ m (es decir, 55.000 veces más grande el primero que el segundo) y la estructura de gas noble que hay por debajo de su único electrón de valencia motivan que la atracción nuclear sobre él sea muy débil no solo por la relación de tamaños sino también por el fuerte efecto de pantalla que ejercen los numerosos electrones de las capas interiores. Así lo revela su escaso potencial de ionización (3,9 eV), es decir, dicho electrón podría ser arrancado por un fotón ultravioleta de esa energía.

El átomo de cesio posee un momento magnético nuclear de valor $7/2$ y su electrón solitario $6s^1$ lo tiene de valor $1/2$. Los restantes electrones se encuentran en capas completas y no contribuyen al momento magnético cortical.

Los átomos de cesio pueden tener un spin global igual a $7/2+1/2$ o bien $7/2-1/2$ y ello no supone diferencias energéticas entre ambos, pero si estos son sometidos a un campo magnético externo experimentan un desdoblamiento de niveles (efecto de Zeeman) como el esquematizado en la fig. 4. La diferencia de energías entre ambos niveles se sitúa en los $0,000038$ eV, correspondiente al rango de las microondas.

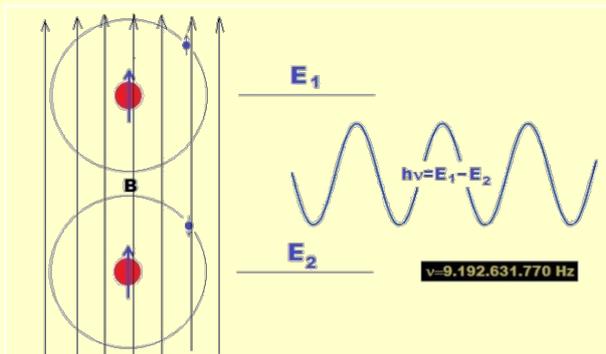


Fig.4 Desdoblamiento energético hiperfino por efecto Zeeman en el átomo de cesio. Al aplicar un campo magnético **B** los átomos con spin nuclear y electrónico inversos presentan un nivel energético distinto que aquellos que tienen ambos spines de igual sentido.

El reloj de cesio consta de un generador a 370 K que vaporiza átomos de una placa de cesio (fig. 5). Los átomos de cesio así vaporizados tienen una excesiva energía cinética y son "frenados" mediante rayos laser concurrentes: Los fotones impactan contra los átomos deteniéndolos en un proceso similar al frenado de un balón de fútbol chutado, cuando se dirige sobre él, en sentido contrario a su movimiento, el agua proyectada por una manguera.

Tras separar los átomos rápidos de los lentos por procedimiento magnético, estos últimos pasan a la cavidad resonante. Allí son irradiados con

microondas generadas por un oscilador electrónico y provocan la emisión de la frecuencia correspondiente a las transiciones expresadas en la Fig. 4.

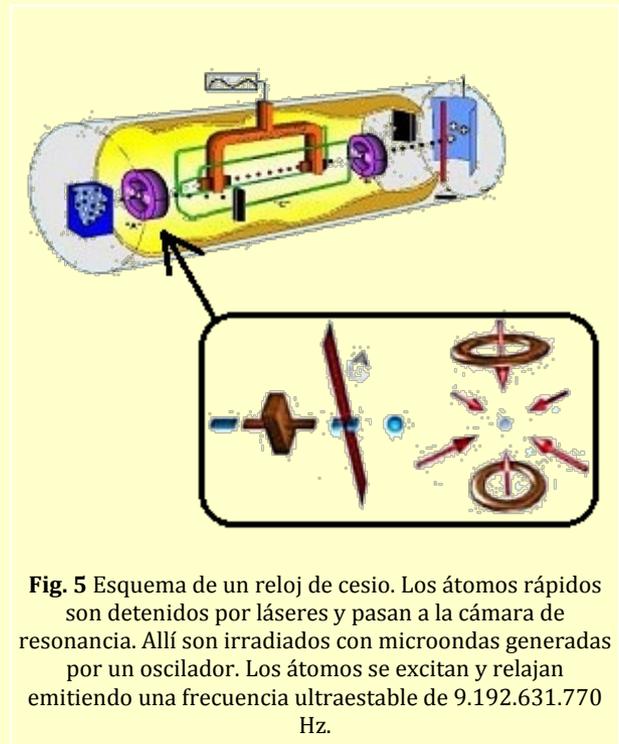


Fig. 5 Esquema de un reloj de cesio. Los átomos rápidos son detenidos por láseres y pasan a la cámara de resonancia. Allí son irradiados con microondas generadas por un oscilador. Los átomos se excitan y relajan emitiendo una frecuencia ultraestable de $9.192.631.770$ Hz.

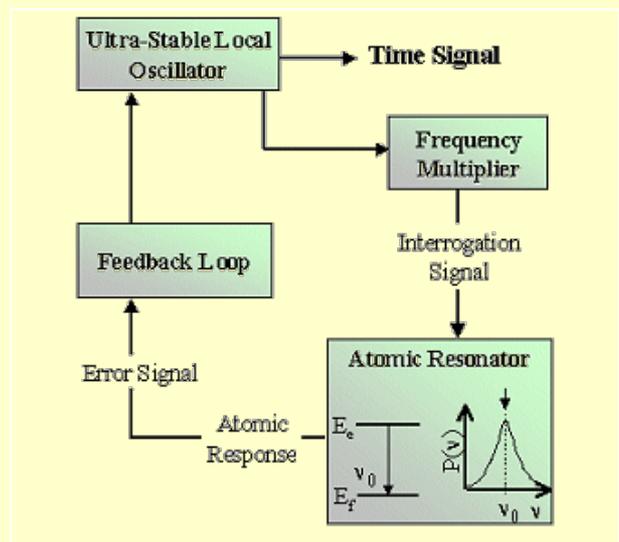


Fig. 6 Esquema del funcionamiento de un reloj atómico. El multiplicador de frecuencia inyecta la radiación excitadora en el resonador atómico. La frecuencia emitida por los átomos es reinyectada en el oscilador. Cuando se produce el acople entre los osciladores electrónico y atómico, la frecuencia es ultraestable. Parte de la misma es extraída y convertida en señal de tiempo.

El dispositivo funciona correctamente cuando se produce la sintonía entre la frecuencia del oscilador local y la frecuencia propia de relajación atómica.

Por tanto, el verdadero reloj es el oscilador electrónico y los átomos de cesio actúan como reguladores de la frecuencia, un papel análogo al que desempeña el péndulo o el volante en los antiguos relojes mecánicos.

Sistemas de situación GPS y los relojes atómicos

La precisión extrema que proporcionan los relojes atómicos en la medida del tiempo ha permitido realizar avances científicos importantes, como comprobar la Teoría General de la Relatividad <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/relativ/airtim.html#c3> determinar las variaciones en las frecuencias de los pulsares <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/astro/pulsar.html#c2> y otras determinaciones astronómicas relevantes. También tienen aplicaciones en la navegación aérea, en el mundo de las finanzas, establecimiento de la hora mundial; dicha hora es accesible a cualquier individuo desde el ordenador, el teléfono, centralita meteorológica, etc.

Relojes atómicos y ciencia: El Sistema GPS

Una de las principales aplicaciones de los relojes atómicos es el sistema de posición geográfica GPS (*Global Positioning System*). Dicho sistema tiene carácter universal, siendo accesible en principio, a cualquier individuo del planeta. El sistema permite conocer la situación en cualquier punto geográfico utilizando, al menos, tres satélites de referencia (triangulación).

Triangulación

Para que ello sea posible, se ha de poder medir la distancia a cada uno de dichos satélites con gran precisión y los satélites han de estar en posiciones estables perfectamente conocidas. Supongamos, por ejemplo, que se está en un punto desconocido del espacio y se dispone de tres satélites de referencia en el entorno (Fig. 7).

Si se mide la distancia al primero de ellos y dicha distancia resulta ser $D_1=11.000$ millas, podremos decir que estamos en algún punto de la esfera cuyo centro ocupa dicho satélite y cuyo radio es la distancia medida. Si a continuación se determina la distancia al segundo satélite, resultando ser $D_2=12.000$ millas, podremos decir que nos encontramos en algún punto de la circunferencia determinada por el corte de la esfera anteriormente citada y una segunda cuyo centro estaría ocupado por el segundo satélite y cuyo radio sería 12.000

millas. Si, finalmente, se determina la distancia al tercer satélite, resultando ser $D_3=13.000$ millas, podremos decir que nos encontramos en uno de los dos puntos resultantes del corte de las tres esferas. Así pues, con referencia a los tres satélites del ejemplo, sólo puede haber dos puntos del espacio que disten 11.000 millas del primero, 12.000 millas del segundo y 13.000 millas del tercero.

Dado que la finalidad del sistema GPS es determinar la situación en la superficie terrestre, los instrumentos están diseñados para descartar uno de los dos puntos obtenidos, por encontrarse siempre alejado de la Tierra.

Así pues, la determinación GPS requiere el cumplimiento estricto de dos condiciones:

- A) Conocimiento exacto en tiempo real de las posiciones de los satélites de referencia.
- B) Determinación precisa de la distancia a cada uno de ellos.

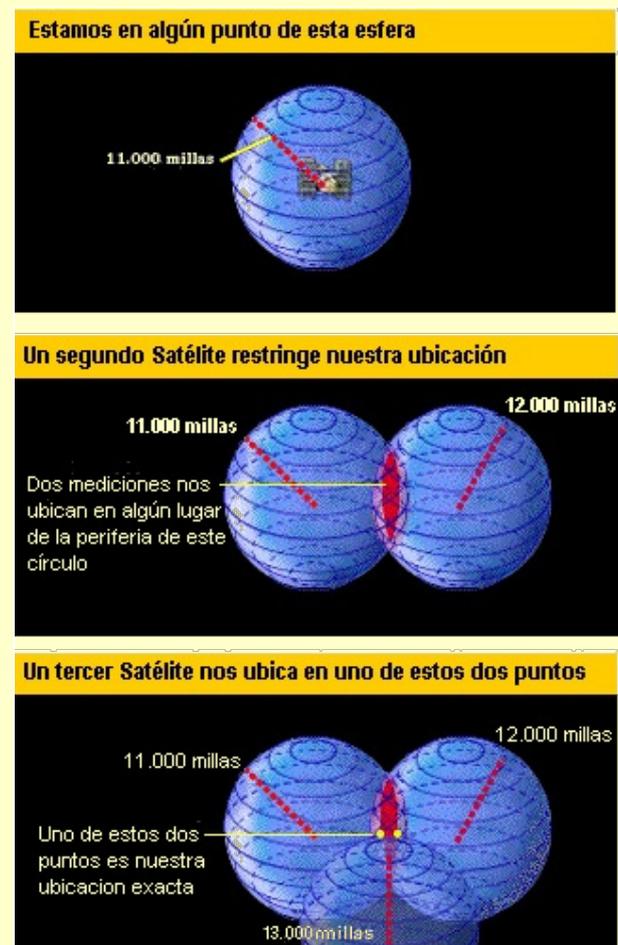


Fig. 7 Esquema de la triangulación. Si se determina la distancia exacta a tres puntos de referencia en el espacio puede conocerse la posición geográfica.

Establecimiento de referencias

Los satélites GPS orbitan a unos 20 km de la superficie terrestre. A esta altura no hay atmósfera ni accidente alguno que perturbe su trayectoria. El Departamento de Defensa de EEUU colocó los satélites GPS en órbitas muy precisas y de forma constante monitorea su altura, velocidad y posición en cada momento. Por otro lado hasta el más humilde navegador GPS posee en su memoria un almanaque que le permite “saber” qué posición ocupa cada satélite referencial en cada momento.

Pese a que se trata de órbitas muy lejanas y por tanto muy estables, la influencia gravitacional de la Luna y del Sol, así como la presión de la radiación solar modifican ligeramente la trayectoria de estos satélites. Con ayuda de eficacísimos radares se determina la posición exacta de los satélites, dicha información es enviada a los mismos satélites y de esta forma ellos incluyen su nueva posición corregida en las señales GPS que emiten.

Pero aún hay más problemas que afectan a la referencia. Las señales de los satélites deben atravesar la baja atmósfera con un cierto ángulo disminuyendo su velocidad y refractándose y, ya en la superficie terrestre, pueden rebotar hasta varias veces antes de ser captadas por nuestro navegador GPS. Todo ello es motivo de imprecisiones en el resultado de la triangulación.

Aún más, si los tres satélites captados por nuestro GPS están demasiado juntos, de manera que las trayectorias rectas a cada uno forman ángulos agudos, la triangulación será más inexacta que si dichos satélites están más separados y las líneas rectas aludidas forman ángulos casi rectos. Ciertamente, son numerosos los satélites que orbitan en torno al planeta y los buenos GPS seleccionan automáticamente aquellos que permiten obtener las más exactas posiciones.

Finalmente, el Departamento de Defensa de EEUU introduce cierto “ruido” en las señales satelitales que se traducen en errores intencionados en la obtención de la posición. Esto se hace para evitar que ciertos países o grupos terroristas considerados peligrosos puedan disponer de armas certeras (los receptores de uso militar disponen de un código para eliminar este *ruido*).

Medición de distancias a los satélites

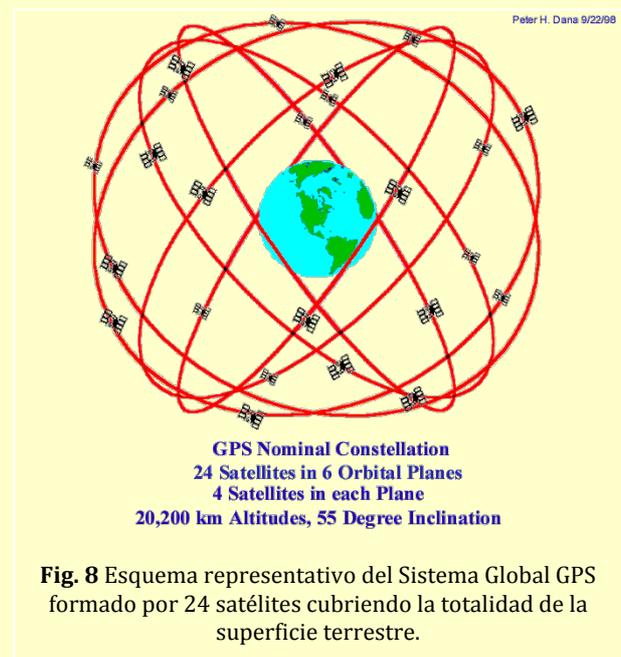
Se basa en una idea muy simple: Si se conoce el tiempo que tarda la señal en llegar al receptor desde que es emitida (Δt), puede saberse a qué distancia está el satélite.

$$D=c \cdot \Delta t \quad (c=3.10^8 \text{ms}^{-1})$$

Es en este momento cuando el reloj atómico, con su elevadísima exactitud, hace posible este aparente milagro. Los satélites van equipados con relojes de cesio exactísimos y bastaría que el receptor dispusiera de otro reloj de igual exactitud, sincronizado con el satélite, esto es, el satélite y el receptor generarían pulsos absolutamente isócronos. Entonces, la señal recibida por el receptor estaría retrasada Δt segundos respecto de la que dicho receptor genera. Esa medida de tiempo permitiría determinar la distancia al satélite.

Corrección de errores

Pero, claro está, nadie se cree que un receptor GPS que ha costado unos pocos cientos de euros puede albergar en su interior un costosísimo reloj de cesio. ¿Cómo se ha resuelto este problema? La idea es realmente brillante: *Si tres mediciones muy exactas permiten obtener una posición precisa, esto mismo se puede lograr con cuatro mediciones menos exactas.* Por tanto, la clave está en medir la distancia a un cuarto satélite.



Si todo fuera perfecto, es decir, si el reloj de nuestro receptor GPS tuviera un reloj tan exacto como los de los satélites, la triangulación sería perfecta y la cuarta esfera imaginaria de radio D_4 cortaría a las otras tres en el punto ocupado por el receptor en la superficie terrestre. Al no ser así, el resultado de la triangulación 1-2-3 ha proporcionado un punto que no coincide con la posición real del receptor. Entonces, la computadora de nuestro GPS detecta la discrepancia atribuyéndola a una sincronización imperfecta con la hora universal y buscará un factor de corrección único que, siendo aplicado a sus

mediciones de tiempo, hará que los rangos coincidan en un solo punto. Una vez que el receptor de GPS aplica dicha corrección al resto de sus mediciones, obtenemos un posicionamiento preciso, todo funciona como si tuviésemos un reloj atómico en la mano.

Una consecuencia de este principio es que cualquier GPS debe ser capaz de sintonizar al menos cuatro satélites de manera simultánea. En la práctica, casi todos los GPS en venta actualmente, acceden a más de 6, y hasta a 12, satélites simultáneamente; Cada satélite emite, junto con las señales GPS, una segunda señal que contiene un complicado código aleatorio formado por una sucesión de 1 y 0. Dicho código es el "carnet de identidad" del satélite. Su complejidad hace muy improbable que el receptor confunda accidentalmente la señal GPS con alguna otra o que no distinga entre uno u otro satélite.



Fig. 9 El código de identificación de un satélite GPS es una larga y compleja serie binaria, única para cada satélite y diferente de todos los demás.

La romántica estampa del marino que pilotaba su nave observando las estrellas ha dado paso al procedimiento GPS, mucho más tecnificado y eficiente. Tanto la navegación como la telefonía, las finanzas, la ciencia y, en general, nuestra vida cotidiana dependen del *timing* que con extraordinaria exactitud proporcionan los relojes atómicos.

PARA SABER MÁS

M.A.S.E.R.

Townes, C.H. (1964) "Production of coherent radiation by atoms and molecules"

http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1964/townes-lecture.pdf

Relojes atómicos

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/acloc.html>

GPS

http://gutovnik.com/como_func_sist_gps.htm

http://www.colorado.edu/geography/gcraft/notes/gps/gps_f.html