HISTORIA DEL TIEMPO. DEL TIEMPO SOLAR VERDADERO AL TIEMPO ATÓMICO

Dr. D. Javier Alcolea Jiménez
Astrónomo del Observatorio Astronómico Nacional
(Instituto Geográfico Nacional, Ministerio de Fomento)

1. INTRODUCCIÓN.

Vivimos inmersos en un Universo en cambio y en evolución, que percibimos gracias a nuestros órganos sensoriales. Los objetos que nos rodean se mueven, cambian de lugar, giran sobre si mismos, o cambian su velocidad y/o dirección de movimiento. Los seres vivos nacen, crecen, interaccionan con su hábitat, se reproducen y mueren. Algunos objetos inertes también evolucionan. Incluso la misma Tierra que habitamos no permanece inmóvil y sin cambios: viajamos por el espacio acompañando al Sol y el mismo relieve cambia constantemente. Algunos de estos movimientos parecen repetirse en ciclos sin fin, como la alternancia de los días y las noches, o la sucesión de las fases de la Luna. Otros cambios sólo se producen en una dirección, como la transmutación de los átomos más inestables en otros de mayor vida media, o el aumento de la entropía (grado de desorden) que rige la evolución de los sistemas de muchas partículas.

Gracias a todos esos fenómenos tenemos la percepción de que debe existir una dimensión, una especie de continuo similar al espacio de tres dimensiones que sí vemos, en el que esos cambios y evoluciones tienen lugar pero que no sentimos directamente. De esta manera tenemos constancia de la existencia de una magnitud que hemos llamado Tiempo. Cabría preguntarse si en ausencia de cambios (i. e. en un Universo inmutable) existiría el Tiempo, pero esto no deja de ser una pregunta retórica: en un mundo *congelado* la vida no tendría lugar y ningún ser inteligente podría formularla.

Los seres humanos disponemos de órganos sensoriales que son sensibles a la presión y la temperatura (el tacto), a cierto tipo de reacciones químicas (el olfato y el gusto), a la energía que se propaga mediante ondas electro-magnéticas en el rango espectral visible (la vista), y a las ondas de densidad que viajan por el aire con oscilaciones entre 20 y 20,000 ciclos por segundo (el oído). No disponemos en cambio de ningún órgano que nos diga qué hora es, aunque sí percibimos cambios en nuestro organismo tales como la sensaciones de hambre, sed, sueño, etc., que nos dan cuenta del transcurso del tiempo, pero de un modo sumamente impreciso. Cuántas veces habremos experimentado la sensación de haber dormido un buen rato y luego nos damos cuenta de que en realidad ha sido sólo una cabezada, o viceversa. O la también muy común de que el tiempo pasa más deprisa cuando estamos absortos en una actividad y, por el contrario, más despacio cuando estamos más ociosos o simplemente más atentos al transcurrir del tiempo. El hecho es que para medir el *Fluir del Tiempo* los seres humanos necesitamos de la ayuda de aparatos que en general denominaremos relojes.

Estos relojes pueden ser naturales o artificiales. Para medir el paso del tiempo en escalas de días basta con contabilizar la sucesión natural de los ciclos diurnos-nocturnos. En cambio, para medir el trascurso del tiempo con precisión de algunas décimas de segundo, necesitamos aparatos más o menos complicados que basados en alguna *Ley de la Naturaleza* (una ley de la Mecánica Clásica el caso de un reloj de péndulo, o una ley de la Mecánica Cuántica en el caso de los modernos relojes atómicos) midan con precisión el transcurso del Tiempo.

La medida del Tiempo, y los relojes que para ello hemos usado, han evolucionado conforme nuestras necesidades, en el seno de una determinada sociedad, han ido cambiando y el desarrollo tecnológico lo ha posibilitado. En esta contribución haré un breve repaso de la *Historia de la Medida del Tiempo*, desde la Prehistoria hasta nuestros días, deteniéndome en ciertos puntos que considero han sido fundamentales a lo largo de esta evolución de carácter tecnológico y social.

2. TIEMPO Y RELOJES.

¿Cómo podemos medir el paso del Tiempo? La respuesta es sencilla; mediante el uso de algún tipo de reloj. Esta respuesta implica una definición de reloj que usaré a lo largo de esta exposición. Un reloj será cualquier dispositivo o fenómeno natural que nos permita medir el paso del tiempo con una cierta precisión y exactitud. Para este fin es conveniente usar objetos

que se muevan de una forma periódica, i. e. que repitan constantemente un movimiento como oscilaciones o rotaciones, pero también podemos usar procesos no repetitivos si los iniciamos voluntariamente una vez tras otra. Por ejemplo, la rotación de la Tierra alrededor de su eje es un movimiento periódico que nos ha servido a lo largo de la historia para definir la unidad de tiempo día[1]. Por el contrario, un reloj de arena necesita ser reiniciado para que vuelva a funcionar, una vez que la arena ha pasado en su totalidad a su parte inferior. Si no hubiese cambios ni movimientos puede que el Tiempo existiese a pesar de todo, pero no creo que pudiese medirse de forma alguna.

¿Podemos definir el Tiempo? Al margen de consideraciones metafísicas, en las que no voy a entrar pues soy lego en esos temas, sí podemos hacerlo de un modo que resulta muy práctico para el *Método Científico*. Podemos definir científicamente el Tiempo como aquella magnitud que hace que se cumplan, por ejemplo, las leyes de la Física. Así la segunda ley de la Mecánica de Newton:

$$\boldsymbol{F} = d\boldsymbol{p} / dt = m\,\boldsymbol{a} = m\,d\boldsymbol{v} / dt = m\,d^2\boldsymbol{s} / dt^2$$

donde $\boldsymbol{F}$ es la fuerza, $\boldsymbol{p}$ el momento lineal (o cantidad de movimiento), m es la masa inerte y $\boldsymbol{a}$ su aceleración, definida a su vez como la variación de la velocidad en el tiempo o la derivada segunda de la posición con el tiempo t, puede ser interpretada como una mera definición de la magnitud Tiempo. No obstante esta no es una definición arbitraria, pues la misma definición de Tiempo tiene que ser válida para todas las leyes de la Física (y de la Química, etc.). De lo contrario no sería una definición útil. Así, en la ley de desintegración de los elementos radio-activos:

$$A(t) = A(0)\, e^{-(t\, \ln(2)/\lambda)}$$

donde $A(0)$ es la abundancia de un elemento inestable en un instante inicial 0, $A(t)$ es la abundancia transcurrido un tiempo t, y λ es la denominada vida media o tiempo en el que la abundancia inicial se reduce a la mitad, la defi-

[1] Para evitar ambigüedades, en lo sucesivo usaré el término día para referirme a un periodo de tiempo de 24 horas, y usaré los términos diurno y nocturno para referirme a los periodos de tiempo en los que el Sol está por encima y por debajo del horizonte respectivamente.

nición de tiempo debe ser la misma que la usada en las leyes de la Mecánica.

Con esta definición formal podemos enunciar leyes y construir dispositivos que, al cumplir esas leyes, nos permiten medir el paso del Tiempo; es decir, podemos construir relojes. Por ejemplo, como hoy en día sabemos que la velocidad de la luz en el vacío es una constante Física, podemos construir un reloj simplemente midiendo el espacio recorrido por un rayo de luz en el vacío:

$$t = s/c$$

donde *c* es la velocidad de la luz en el vacío, y *s* es la longitud recorrida en un intervalo de Tiempo *t*. (Normalmente esta ecuación se usa a la inversa para medir distancias entre objetos.) El periodo de oscilación de un péndulo *P*, o tiempo que tarda en completar una oscilación completa (ir y venir otra vez) está dado simplemente por la ecuación:

$$P = 2\pi\,(L/g)^{1/2}$$

donde *L* es la longitud del péndulo (desde el eje sobre el que pivota hasta el centro de gravedad de la masa que pende de él) y *g* es la aceleración de la Gravedad en el lugar.

Estos son ejemplos de relojes que siguen leyes sencillas, pero también obedecen unas leyes los relojes de arena y de agua (clepsidras), si bien éstos últimos miden el paso del Tiempo a través de fórmulas más complejas que dependen del valor de la fuerza de la Gravedad, presión, viscosidad, etc. Para finalizar esta serie de ejemplos citaremos que los modernos relojes de cuarzo están basados en circuitos eléctricos resonantes, en los que se propagan únicamente señales de un periodo bien conocido, que se se usan para impulsar unas manecillas a intervalos de tiempo idénticos de una manara muy precisa, mientras que los relojes atómicos usan la frecuencia natural de ciertas transiciones atómicas para controlar con mayor precisión aún relojes de cuarzo que les son esclavos.

Este *Tiempo Físico* es un Tiempo homogéneo y uniforme, todos sus segundos tienen la misma duración, y es válido en cualquier lugar del Universo, puesto que las leyes Físicas también son universales. Hoy en día ésta nos parece una definición natural del Tiempo, pero en el pasado esto no fue siempre así. Ya veremos que hubo épocas en las que resultaba mucho más

práctico usar horas de duración desigual, por raro que nos parezca esto en la actualidad.

Usando estas leyes podemos construir dispositivos de muy distinta índole. Como ya hemos dicho, podemos distinguir dos grandes tipos de relojes. Unos miden el tiempo usando procesos de duración calibrada, que podemos repetir un numero indefinido de veces. Este es el caso de los relojes de llama (una vela que arde, una cuerda que se quema, un reguero de pólvora usado como temporizador), de los relojes de arena y de los relojes de agua o clepsidras. El otro gran tipo de relojes usa procesos periódicos que se repiten (que en última instancia hay que realimentar para que no se amortigüen con el tiempo, pues el *perpetuum mobile* no existe). Este es el caso de la oscilación de un péndulo, de la oscilación de un muelle espiral, o un circuito eléctrico resonante.

Los cuerpos celestes pueden ser usados como relojes de éste último tipo. Así el periodo de revolución de la Tierra (alrededor del Sol) y de la Luna (alrededor de la Tierra) miden el Tiempo en años y en meses respectivamente, mientras que el periodo de rotación de la propia Tierra nos sirve para medir el tiempo en Tiempo en días.

3. ¿QUÉ HORA ES?

Existen dos tipos de medida del Tiempo: la medida cronométrica y la medida cronológica. Las medidas cronométricas miden el tiempo transcurrido entre dos sucesos o el que tarda en transcurrir un evento, como por ejemplo la duración de un año terrestre que se define como el tiempo transcurrido entre dos equinoccios de otoño consecutivos. Este tipo de medidas requiere el uso de una unidad de tiempo uniforme y bien definida, que se mantenga constante durante el intervalo de tiempo para el que efectuamos la medida.

Las medidas cronológicas indican el instante absoluto en el que suceden las cosas, como por ejemplo el instante en el que el Hombre pisó por primera vez la Luna. En el fondo se trata de una medida cronométrica a partir de un origen de tiempos bien definido. La unidad de medida puede cambiar, pero en ese caso necesitamos saber los instantes precisos en que se produjeron esos cambios de unidad y las reglas de conversión para pasar de unas unidades a otras.

La simple pregunta *¿qué hora es?,* que puede ser interpretada como *¿en qué instante estamos?*, es una medida de tiempo cronológica que puede tener una respuesta nada sencilla dependiendo del grado de exactitud reque-

rido. Si tomamos como ejemplo el comienzo de mi intervención en estas X Jornadas Científicas, éste estaba programado para las 4 de la tarde (las 3 en Canarias), pero para ser más exactos deberíamos decir:

Miércoles, 2011:03:23 (Calendario Gregoriano) 04:00:00.00 PM (CET=UTC+1)

Como vemos, para datar con exactitud un evento usamos hasta 6 unidades diferentes (años, meses, días, horas, min. y seg.) y por lo menos dos referencias para el origen de tiempos, una para la fecha (Era Cristiana, Calendario Gregoriano) y otra para la hora (Post Meridian, Hora Central Europea). Nosotros estamos acostumbrados a este tipo de datación, pero la complejidad que en él reside es notable.

–El año, 2011 en nuestro caso, se refiere a la Era Cristiana, y usamos para él un número entero que puede ser positivo o negativo pero no cero (a no ser que adoptemos el calendario proléptico para fechas anteriores al inicio de la Era.). Un año equivale a 12 meses y a 365 ó 366 días dependiendo de si es bisiesto o no.

–Para el mes, 03 en nuestro caso, usamos una cifra entera de 1 a 12 o doce nombres heredados de nuestra tradición latina. Estos meses constan de 28, 29, 30 ó 31 días dependiendo del mes del año y de si ése es bisiesto o no.

–Para el día, 23, usamos cifras del 1 al 28, 29, 30 ó 31 dependiendo del mes.

–Miércoles, designa el día de la semana y no aporta información adicional alguna (2011:03:23 es necesariamente miércoles), pero su indicación puede resultar conveniente. Esta cantidad puede designarse con un número del 1 al 7 o un nombre propio. La semana del año se indica con una cifra del 1 al 52 ó 53, siendo la primera semana del año la que contiene el primer jueves.

–04 indica la hora del día. Aquí usamos cifras del 0 al 23 o al 12, pero en este caso usando las iniciales AM o PM para indicar si se trata de las primeras o segundas doce horas del día. Un día equivale *aproximadamente* a 24 horas de 3600 segundos.

–Los minutos, 00, indican la fracción de horas en unidades de 1/60, y se dan en números enteros del 0 al 59.

–Finalmente los segundos indican la fracción de minutos en unidades de 1/60, o de horas en unidades de 1/3600, y se expresan en números reales (pueden adoptar valores decimales) positivos entre el 0,000... y

el 59,999..., o 60,999... en el caso de que se de un segundo intercalar (ver más adelante).

–Las siglas CET = UTC+1 indican además que estas horas (así como el inicio y fin de los días) están adelantadas 3600 segundos respecto del Tiempo Universal Coordinado (UTC por sus siglas en inglés). Se trata del horario oficial invernal en España (excepto en Canarias).

Esta compleja notación es un excelente compendio de tradiciones culturales heredadas a lo largo de más de 3000 años, abarcando desde los los primeros tratados de trigonometría de los babilonios, hasta los modernos patrones del tiempo, sin olvidar las fuertes influencias romana y judeocristiana tan presentes en la sociedad occidental moderna. Este sistema occidental ha sido adoptado mundialmente como sistema internacional de datación.

4. ASTRONOMÍA Y MEDIDA DEL TIEMPO EN LA EDAD ANTIGUA.

El hombre, una vez que se desarrollaron las sociedades cazadoras recolectoras semi-nómadas, debió tener conciencia de los siguientes ciclos temporales de origen astronómico:

–Alternancia de los periodos nocturnos/diurnos. Se trata de un ciclo evidente que es el origen de la unidad temporal día y que es debido a la rotación de la Tierra sobre su propio eje. Además del día de 24 horas, la alternancia de periodos diurnos/nocturnos característica del ciclo circadiano favorece la división del día en dos periodos de duración variable a lo largo del año. Esta división natural del día en periodos de luz y de oscuridad dará origen posteriormente a la división del día en dos ciclos de 12 horas, que en la actualidad no se ajustan a esa separación.

–La sucesión de las fases de la Luna. También se trata de un fenómeno fácilmente observable y evidente que da origen a la unidad temporal mes, y en ocasiones a la subdivisión de éste en 3 ó 4 grupos de entre 7 y 10 días. Este fenómeno, también de origen astronómico, se debe al giro orbital de la Luna alrededor de la Tierra, y a la posición relativa de estos dos cuerpos con respecto al Sol. Su influencia en el ciclo de las mareas y en que éstas sean vivas o muertas también debió resultar evidente para los habitantes del litoral, especialmente si se dedicaban a la recolección durante los periodos de bajamar.

–Más tarde debió percatarse también de la sucesión de la sucesión de las estaciones. Aunque este fenómeno no es tan evidente como los otros dos anteriores, puede observarse gracias a la variación de la du-

ración de los periodos nocturno y diurno, las épocas de migración y reproducción de los animales, las de floración, maduración de los frutos, caída de las hojas de los árboles, etc., los cambios climatológicos estacionales (periodos de calor/frío, estaciones secas/húmedas, etc.), y el cambio de las estrellas visibles por la noche.

Este fenómeno periódico, cuyo conocimiento preciso es fundamental para las sociedades cazadoras-recolectoras y aun más tras su conversión en sociedades agrícolas y ganaderas, es el origen de la unidad temporal año. Está debido al giro orbital de la Tierra alrededor del Sol y al hecho de que el eje de rotación de la Tierra no coincida con el orbital, lo que hace que las horas de insolación al cabo de un día dependan de la posición de la Tierra en su órbita, o lo que es lo mismo del día del año.

Como vemos, las tres unidades básicas de medida del tiempo en la antigüedad tienen como origen fenómenos astronómicos. De hecho, luego veremos que otras divisiones más arbitrarias, tales como la división del mes en semanas de 7 ó 10 días, o la del día en 24 horas, también tienen un origen astronómico aunque mucho más indirecto. En realidad la Astronomía y la medida del tiempo han estado íntimamente ligadas hasta la segunda mitad del S.XX, instante en el que los patrones de medida de tiempo dejaron de estar referidos a fenómenos astronómicos[2].

La importancia de la observación astronómica del cielo en la prehistoria esta bien documentada gracias a los estudios sobre la orientación de las construcciones megalíticas. Estos estudios han demostrado la importancia que se daba en muchas sociedades al *paisaje celeste*, lo que se tradujo en la orientación de los monumentos funerarios en la dirección de la salida o puesta de los astros más relevantes, el Sol y la Luna. En ocasiones, construcciones megalíticas de mayor relieve, como los alineamientos de rocas o los cromleches, señalan la salidas y puestas extremas del Sol y de la Luna a lo largo del año. En particular los ortos y ocasos extremos del Sol (la salida y puesta del Sol más al Norte y más al Sur) se alcanzan en los solsticios de invierno y de verano, y por lo tanto tales construcciones pueden ser utilizadas para medir la duración del año solar trópico, que es el que se usa para la elaboración de todos los calendarios. Finalmente, un ejemplo de la observa-

[2] Aunque la definición de segundo actual no guarda relación alguna con la rotación de la Tierra, el hecho es que su valor sigue siendo, aproximadamente, 1/86.400 de la duración de un día solar medio.

ción detallada de las fases de la Luna en épocas prehistóricas puede apreciarse en el calendario lunar de Blanchard (27.000 aC).

Ya en épocas históricas, sabemos que los estudios astronómicos se desarrollaron muy tempranamente tanto en Egipto como en Babilonia. Se estableció de un modo preciso la duración del ciclo de las fases lunares en 29,53 días; este periodo que corresponde al tiempo transcurrido entre dos lunaciones (lunas nuevas) sucesivas, es conocido hoy en día como mes sinódico. Asimismo se determino una duración del año trópico, o intervalo de tiempo transcurrido entre dos equinoccios de otoño sucesivos, de 365,25 días.

Desgraciadamente (o tal vez no), un año trópico así definido consta de 12,37 lunaciones, de aquí toda la problemática relativa al diseño de los calendarios cuando se trata de dividir el año en un numero de meses relacionados con las fases lunares. No olvidemos que en una sociedad en la que sólo una minoría sabe leer y escribir, el uso del mes sinódico como media de tiempo intermedia entre la del día y del año debía resultar muy práctica para la mayoría. También era bien conocido el hecho de que 19 años prácticamente equivalen a 235 lunaciones. Ésta es la base del conocido como ciclo de Metón, en el que se fundamentan los calendarios luni-solares, en los que suelen usar meses de 29 y 30 días alternativamente, introduciéndose un décimo-tercer mes en ciertos años, siguiendo un ciclo que se repite cada 19.

Sabemos además que se conocían las cinco *estrellas errantes* visibles sin la ayuda de ningún instrumento óptico, i. e. los planetas pre-galileanos: Mercurio, Venus, Marte, Júpiter y Saturno. Estos cinco objetos notables, junto con el Sol y la Luna, forman un conjunto de siete deidades al las que dedicar los días, lo que unido a la influencia judeocristiana en la sociedad occidental, facilitó la pervivencia de la semana de 7 días hasta la actualidad, frente a las de 8 o 10 días que también se usaban en la antigüedad. Como vemos, una unidad temporal tan arbitraria (en el sentido de que no existe ningún fenómeno natural que se repita cada siete días[3]) como la semana

[3] Está muy extendida la opinión de que la semana de 7 días tiene su origen en la división del ciclo lunar en cuatro fases. No obstante hay que hacer notar que 4 semanas, i. e. 28 días, es una aproximación peor al ciclo sinódico de 29,53 días que la división del mes en 3 semanas de 10 días que se usaba tanto en Egipto como en Babilonia. Una semana de 10 días puede dividir el ciclo lunar en una fase creciente (iniciada en la luna nueva), una de plenitud (alrededor de la luna llena), y una fase menguante (hasta la siguiente luna nueva).

actual tiene una también base astronómica, lo que demuestra el impacto cultural de la Astronomía en dichas sociedades.

Finalmente, reseñar que también en esta época tan temprana se elaboran los primeros catálogos estelares y se confeccionaron los primeros mapas del cielo, agrupando las estrellas más cercanas según figuras que cambian de una cultura a otra; las conocidas constelaciones o asterismos. De estas agrupaciones estelares, muchas veces asociadas a relatos mitológicos (catasterismos), destacan las doce (una por cada mes del año) en que se dividió la trayectoria que siguen el Sol y los planetas en el cielo a lo largo de la eclíptica; el Zodiaco.

4.1. Relojes y medida de la hora en la antigüedad.

Como ya hemos mencionado, nos consta que ya en épocas prehistorias se tenia noción de las unidades temporales día, mes y año, lo que posteriormente resultó (ya en épocas históricas) en la confección de lo que hoy en día conocemos como calendarios. Se produce un división, natural por otra parte, entre el cómputo del Tiempo en unidades mayores y menores que el día; de un lado tenemos el problema de la Calendación y de otro el de la Horología.

Si bien es cierto que en ciertas culturas, como la hebrea, se dividía el día en una serie de periodos de duración desigual, es también en esta época en la que se fija la costumbre de dividir el día en un total de 24 horas, y éstas a su vez en minutos y segundos, tal y como seguimos haciendo hoy en día. La principal diferencia entre las horas antiguas y las modernas, es que aquellas dividían el tanto el periodo diurno como la noche ambos en 12 horas. Nosotros sabemos, y entonces también se conocía, que las noches en invierno son más largas que en verano, y que lo contrario sucede para el periodo diurno (y justo todo al revés en el hemisferio Sur). Como resultado las horas nocturnas y diurnas diferían en duración: las 12 horas nocturnas eran iguales entre sí, y lo mismo sucedía con las horas diurnas, pero entre ambas diferían en duración. Esta diferencia de duración de las fases de luz y oscuridad del día está debida a la inclinación del eje de rotación de la Tierra, y es tanto mayor cuanto mayor es la latitud del lugar. (Más allá de los círculos polares llegamos al caso extremo de tener noches de 6 meses que se alternan con periodos de insolación de aproximadamente la misma duración.) Para una latitud de 40ºN la duración de la noche varía entre 15 horas y 1 minuto (de los actuales) en el solsticio de invierno y 9 horas y 19 minutos en el solsticio de verano (durando 12 horas en ambos equinoccios). Así,

si siguiésemos usando este antiguo sistema de horas, hacia el 21 de diciembre las horas nocturnas durarían 1 hora y 15 minutos modernos, y mientras que hacia el 21 de junio su duración sería sólo de 46 minutos y 12 segundos (y viceversa para las horas diurnas, y justo al revés a 40ºS).

Figura 1. *Clepsidras exhibidas en el Museo del Ágora de Atenas. La superior es original del S.V aC, la inferior es una reconstrucción moderna.*

A estas horas antiguas, iguales entre sí pero distintas entre la noche y el periodo diurno, y de duración variable a lo largo del año, se las denomina planetarias o estacionales, o simplemente horas desiguales. Por el contrario al tipo de horas que usamos en la actualidad, que tienen siempre la misma duración, se las denomina astronómicas o simplemente iguales.

Hoy en día puede parecernos que el uso de horas planetarias debía resultar tremendamente incómodo, pero esto no es cierto en absoluto. En una sociedad en la que casi nadie disponía de un reloj propio, y la hora del día se calculaba *grosso modo* por la longitud de las sombras en ausencia de mejor reloj de Sol, resultaba muy cómodo empezar a contar el tiempo al salir el Sol y a su puesta. Además el cambió de fecha solía acontecer en coinciden-

cia con uno de esos dos momentos[4]. Un sistema de cambio de fecha basado en la salida y puesta del Sol resulta incompatible con el uso de un sistema de horas moderno de igual duración, puesto que esto implicaría que la hora de cambio de día dependería de la fecha, al igual que la duración del día si lo medimos en horas astronómicas. Por el contrario, el uso de horas desiguales facilita el cálculo de la hora. Por ejemplo el mediodía siempre sucede a las 6 de la mañana, las 11 de la tarde es una hora antes de que se ponga el Sol, y las 2 de la noche es una hora después de que se haga noche cerrada (el crepúsculo dura aproximadamente una hora).

Con anterioridad a la invención del reloj mecánico en baja edad media, los relojes eran esencialmente de tres tipos: los de origen astronómico, las clepsidras y los de fuego. Algunos autores han postulado la existencia también de los relojes de arena, pero esto no está documentado y existen serias dudas de que se dispusiese de la tecnología necesaria para su construcción.

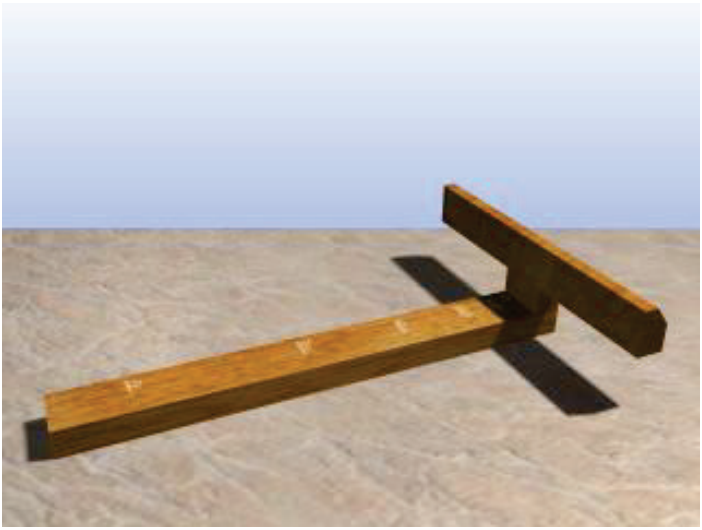

Figura 2. *Sencillo reloj de sol portátil egipcio. Probablemente uno relojes más antiguos que se construyeron.*

[4] Hoy en día el calendario islámico todavía sigue usando la puesta local del Sol como instante de cambio de día a efectos del culto musulmán. El calendario judío también solía seguir esa costumbre, pero en la actualidad ha adoptado las 6 de la tarde como la hora de cambio de fecha a efectos de celebraciones religiosas.

Los relojes de origen astronómico podían ser de tres tipos, de Sol, de Luna o sidéreos (de estrellas). Los relojes de Sol son aquellos que miden el paso del tiempo usando el movimiento aparente del Sol en el cielo (debido a la rotación de la Tierra) a lo largo del día. Este movimiento puede apreciarse directamente, esto es observando el Sol, pero resulta mucho más práctico estudiar el movimiento de las sombras o el de los rayos de luz que se dejan pasar por ciertas aberturas. El reloj más antiguo fue probablemente un reloj de Sol en el que se usaba la sombra proyectada de un objeto natural o artificial para marcar el paso de las horas en algún tipo de dial. Los relojes de Luna son aquellos que usan el movimiento de la Luna sobre el fondo de estrellas. Su uso es más complejo y requiere mayores conocimientos de astronomía, dado que la posición de la Luna en el cielo no sólo depende de la hora sino también de la edad de la Luna, que es como se denomina al tiempo transcurrido desde la última luna nueva, y del día del año (la fase de la luna depende de la orientación relativa de Sol, Luna y Tierra). Los relojes sidéreos, o de estrellas, se basan en el movimiento aparente de la estrellas en la bóveda celeste, debido también a la rotación de la Tierra. En este caso no podemos usar la sombra que proyecten las estrellas, por lo que para apreciar su movimiento tenemos que observarlas con algún aparato o procedimiento que nos permita medir este efecto, o basarnos en sus salidas (ortos) y puestas (ocasos) sobre el horizonte.

El uso de horas desiguales no plantea serios problemas en la construcción de relojes astronómicos. Podemos construir relojes de Sol que midan horas planetarias o astronómicas, o ambas al mismo tiempo, si bien es cierto que el trazo de las líneas horarias en relojes de sol de horas planetarias requiere algo más de esfuerzo. Para la lectura de un reloj de Sol de este tipo, debemos usar únicamente la sombra de la punta del *gnomon* o estilete que se usa para trazar la sombra, que al mismo tiempo puede indicar la fecha del año si se añaden las líneas correspondientes. (Este uso de los relojes de Sol como calendarios también puede darse en los relojes de horas iguales, pero en este caso su construcción ya no resulta más sencilla que la de los relojes planetarios.) Los relojes de Sol de horas desiguales podían construirse para contar las horas transcurridas desde la salida del Sol, denominadas horas babilónicas, o para para contar hacia atrás las horas de luz que restan del día (las horas que faltan para la puesta del Sol), que se denominan horas itálicas. Hay ejemplos incluso de relojes que marcan ambos tipos de horas.

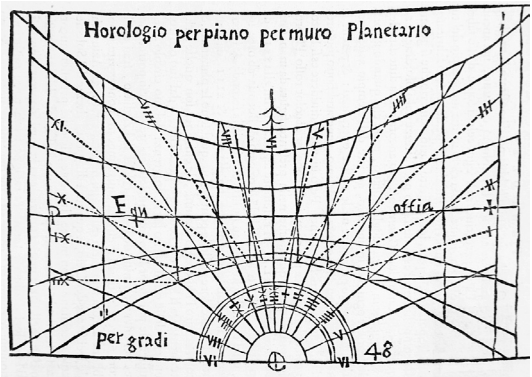

Figura 3. *Un reloj de sol vertical meridiano (para una pared orientada justo al Sur) para horas planetarias (desiguales), válido para una latitud 48°N. Este reloj de sol moderno señala al mismo tiempo las horas astronómicas (iguales) en el semicírculo inferior y con los trazos radiales contínuos, y las planetarias (desiguales) con los trazos discontinuos. En el caso de las horas planetarias se ha seguido el convenio de las horas itálicas, es decir marca las horas que faltan para que se ponga el Sol.*

Por el contrario, un sistema de horas desiguales complica el uso de otro tipo de relojes, como las clepsidras y los relojes de fuego, dado que en este tipo de relojes la *marcha* no cambia con la fecha del año. En el caso de las clepsidras el ajuste se podía hacer de dos formas: bien variando la velocidad a la que se vertía el agua abriendo o cerrando orificios de distinto tamaño, es decir alterando la velocidad de *escape* del agua, o cambiando la cantidad de líquido que se vertía en la vasija. En el caso de los relojes de fuego, velas que arden o aceite que se consume, la duración del reloj podía variarse cambiando la cantidad de combustible (aceite o cera), pero resulta muy complicado variar la velocidad a que se consume (el escape) a voluntad. Dejo al lector que imagine cómo podrían haberse ajustado los relojes de arena de ser cierto que se usaban en aquellas épocas.

Como resultado de las incompatibilidades entre los relojes no astronómicos y el uso de horas desiguales, éstas últimas serán sustituidas paulatinamente por las horas iguales modernas al mismo tiempo que progresa y se populariza el uso de los relojes mecánicos. Las horas antiguas tampoco cumplen las propiedades que se exigen al *Tiempo Físico*, dado que éste debe ser uniforme y constante, y por lo tanto no sirven para le realización de experimentos. No obstante este hecho era de sobra conocido y por otra parte

las ciencias experimentales no se desarrollan hasta la edad moderna, con lo que el problema probablemente ni llegó a plantearse.

4.2 El origen del día de 24 horas.

Al igual que el calendario usual en occidente, el gregoriano, ha sido adoptado como calendario internacional, la división occidental del día en 24 horas también ha acabado imponiéndose como sistema horario internacional. Esta costumbre de dividir el día en 24 horas, si bien desiguales, surgiría más o menos al mismo tiempo que se establecen los primeros calendarios: parece ser que los seres humanos, una vez que se establecieron unas normas para el cómputo de los días, meses y años, procedieron a subdividir el día en periodos de tiempo más pequeños.

Figura 4. *Representación egipcia del cielo con el sistema de decanos usados para marcar el inicio de sus semanas de diez días, que también era usado para medir el paso del tiempo por la noche.*

Esta bien documentado que los egipcios adoptaron un sistema de 24 horas para la subdivisión de la duración del día. Su calendario, eminentemente solar, consistía en 12 meses de 30 días, a los que se añadían 5 días especiales que se denominan *epagómenos*. Según este calendario el año trópico constaba únicamente de 365 días, en lugar de los 365,2425 que usamos en el calendario gregoriano. El valor del año trópico hoy en día es de 365,242198 días, con lo que el calendario egipcio sufría un desfase de año de año en año que nunca fue corregido[5]. Además los meses estaban divididos en tres semanas de 10 días (una año duraba pues 36 semanas de 10 días y 5 días extraordinarios). Para determinar el desfase entre el calendario civil y la sucesión de las estaciones (o en el caso que nos atañe, determinar el comienzo de la crecida del Nilo), los egipcios disponían de un conjunto de 36 estrellas o grupos de estrellas que denominaban decanos. El orto heliaco[6] de cada uno de esos decanos determinaba el comienzo de una nueva semana del año trópico real (no el de 365 días).

La determinación de la la hora nocturna se basaba el la aparición por el Este del horizonte de 12 de esos 36 decanos apropiadamente distribuidos en el cielo, de forma que todas las noches tuviesen 12 horas en cualquier época del año. El conjunto de decanos usado dependía de la fecha, pues la posición de las estrellas en el cielo a una hora fija cambia con el día del año. Este sistema de 12 horas se trasladaría al periodo diurno por similitud. A pesar de que conocemos bien el funcionamiento de este sistema para medir el tiempo, nada sabemos del porqué de la elección de dividir la duración de la noche en 12 horas, pues no hay nada en el método que lo favorezca.

[5] Según los cálculos de la época, este desfase se compensaría al cabo de 1460 años, lo que se conoce como ciclo sótico o sotiaco, pues se estimó que la duración del año trópico era de 365,25 días. Se propuso un reforma del calendario que consistía en añadir un 6 día epagómeno cada cuatro años, que nunca fue aceptada, pero que fue copiada y adoptada por Roma para el establecimiento del calendario juliano.

[6] Se denomina orto heliaco de una estrella a la aparición de esta sobre el horizonte al Este, justo después de hacerse de noche tras la puesta del Sol. Para las estrellas que no son circumpolares, es decir que no están siempre por encima del horizonte, existe una época del año en que no son visibles en ningún momento por estar por encima del horizonte al mismo tiempo que el Sol (pues en las horas diurnas resultan invisibles). El orto heliaco pone fin a este periodo de invisibilidad, iniciándose un periodo de visibilidad nocturna. Este ciclo se repite año tras año.

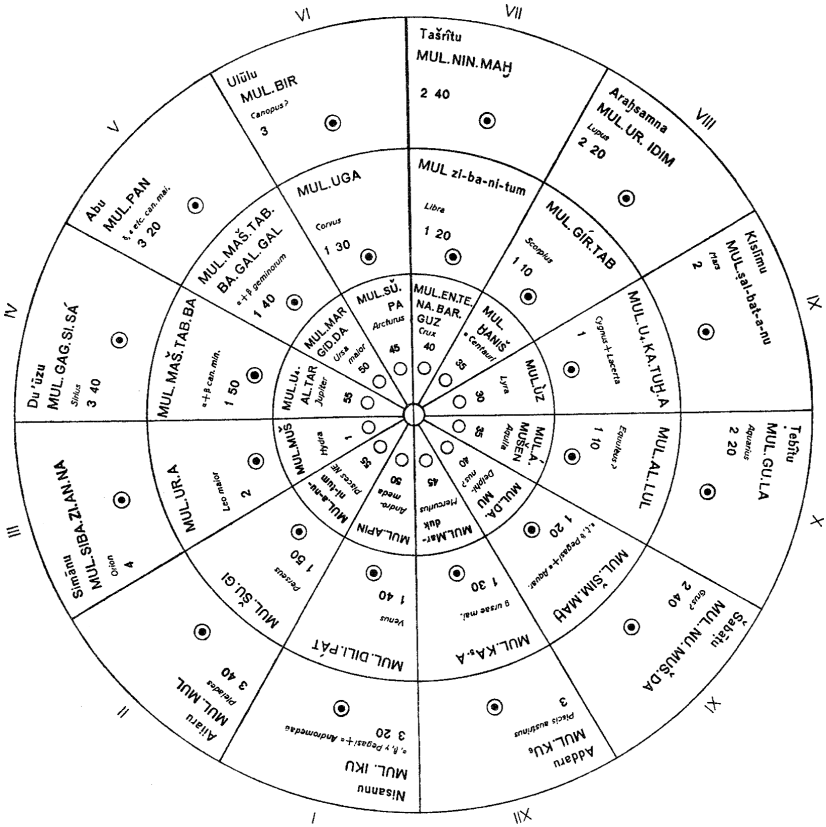

Figura 5. *Reconstrucción de un astrolabio circular babilónico según Shott (1934). El círculo está dividido en tres discos concéntricos de 12 sectores cada uno (uno por cada mes del año). En cada una de esas 36 zonas, además del nombre del correspondiente decano, figura la cantidad de agua que hay que poner en la clepsidra de día por unidad de tiempo (círculo exterior), media unidad (círculo central) y un cuarto de unidad (círculo interior). Así en el III sector, correspondiente al mes de Simānu en el solsticio de verano, hay que poner 4 "minas" de agua en la clepsidra para que mida una "hora babilónica" diurna y sólo 2 por la noche (no está indicado). En invierno, en el mes de Kislīmu, la situación se invierte: 4 minas para la noche y 2 para las horas diurnas.*

Según algunos autores el origen de la división del día en 24 horas se debería a los babilonios, sistema que Grecia y Roma adoptarían más tarde, y que ha pervivido hasta la actualidad[7]. Los babilonios, que tenían un calendario esencialmente idéntico al de los egipcios, también adoptaron una división del cielo en zonas, pero de una manera diferente a los egipcios. El recorrido del Sol en el cielo a lo largo del año, la eclíptica, fue dividido en las 12 constelaciones del zodiaco, al igual que dos bandas por encima y por debajo de este, resultando un total de 36 asterismos que no deben confundirse con los 36 decanos egipcios. Esta parcelación del cielo se representaba en un astrolabio primitivo como el que se muestra en la figura 5. Como vemos, tenemos tres coronas circulares, divididas cada una de ellas en 12 sectores. En cada mes del año, cuyo nombre se señala en la corona exterior, el Sol se encuentra transitando la constelación del zodiaco que indica la corona intermedia. En cada una de esas 36 casillas, además del nombre de la constelación, podemos leer una cifra en notación sexagesimal. Curiosamente, para cada mes, la cifra de la corona exterior es el doble de la de la central, y esta el doble de la que figura en la corona más interna.

¿Qué representan esta cifras ? Aparentemente, los babilonios dividieron originalmente el día completo en 6 *unidades de tiempo*. El valor de estas unidades de tiempo no era más que el tiempo que tardaba en vaciarse una cierta *clepsidra patrón*. Los números que figuran en el astrolabio indican la cantidad de agua que hay que poner en esa clepsidra para que tarde en vaciarse una unidad de tiempo (círculo externo), media unidad de tiempo (circulo medio), y un cuarto de unidad de tiempo (círculo externo). Según esta hipótesis las 24 horas actuales serían herederas de los cuartos de hora en uso en babilonia. Como puede apreciarse en la figura, las cifras a las que hemos hecho mención, es decir la cantidad de agua a poner en la vasija, cambian mes a mes. Esto no es sorprendente, pues, como ya sabemos, divi-

[7] Durante la Revolución Francesa es bien conocido que se reformó el calendario, adoptándose uno nuevo que esencialmente copiaba el egipcio/babilónico pero con la inclusión de un sexto día epagómeno en los años bisiestos. Otro tanto sucedió con la división horaria del día. Se trató de imponer un sistema de días de 10 horas, con horas iguales de 100 minutos de duración, de 100 segundos cada uno. Para más detalles véase la contribución por el Prof. Dr. José María de Francisco en estas mismas actas. Este sistema decimal cayo en desuso rápidamente, no obstante, como consecuencia de ese afán por la racionalización de los sistemas de medidas, han pervivido los *gradianes (aunque su uso está muy restringido)*, un sistema que divide el ángulo recto en 100 gradianes (en vez de los usuales 90 grados heredados de trigonometría babilónica), que a su vez se subdividen en 100 minutos de 100 segundos.

dir en el mismo numero de partes iguales la duración de los periodos nocturnos y diurnos del día, implica adoptar un sistema de horas desiguales o planetarias. Dado que el ritmo de vaciado de las clepsidras es fijo, la forma en que se ajustaba la duración de las horas era variando la cantidad de agua que se ponía en la clepsidra. Como vemos la duración una hora babilónica oscila entre 240 (4 • 60 + 0) y 120 (2 • 60 + 0) unidades de agua. Estos valores no ajustan correctamente la variación de la noche a lo largo del año, pero claramente nos indican cómo existía un interés por la correcta medida del tiempo.

Por último cabría preguntarse el origen babilonio de la división del día completo en 6 horas. La razón es sencilla. Los babilonios, que usaron un sistema de numeración sexagesimal (contaban en base 60), dividieron el círculo completo en 360 grados por ser éste un múltiplo de 60 muy cercano a la duración del año. ¡ Nosotros seguimos dividiendo la circunferencia en 360 grados porque ellos contaban de 60 en 60 y la Tierra tarda 365,242198 días en girar alrededor del Sol ! Y claro, 360 es 6 veces 60, la base de su numeración. Resulta pues obvio adivinar el porqué. Nosotros mismos seguimos dividiendo los grados, y las horas, en 60 primeros minutos, estos en 60 segundos minutos (que ahora denominamos simplemente minutos y segundos), mientras que hemos perdido la costumbre de dividir los segundos en 60 terceros minutos.

Incluso si éste no es el origen de la división del día en 24 horas, lo que si es cierto es que en la antigüedad se daba prioridad a dividir el día en un periodo nocturno y diurno con igual numero de horas. Dividir los periodos nocturnos/diurnos en 12 horas si resulta más fácil de entender. La docena es una unidad gran relevancia, que puede dividirse por 2, 3, 4, 6, y por lo tanto resulta mucho más práctica que la decena. (Yo puedo calcular fácilmente cuanto es cuarto y mitad de una noche de 12 horas sin tener que hacer operaciones con números decimales.) Calcular qué hora es por la noche con este sistema de 12 horas planetarias también es muy fácil, basta contar cuántas constelaciones del zodiaco han salido por el horizonte tras la puesta del Sol y multiplicar por 2, pues en cada noche del año, independientemente de la latitud del lugar y del día del año, siempre surgen 6 constelaciones zodiacales.

5. EL PROGRESIVO AVANCE DEL RELOJ MECÁNICO.

Los relojes mecánicos más antiguos que se conservan datan del S.XIII. Su desarrollo e implantación iniciales estuvieron impulsados por las órdenes

monacales y su necesidad de rezar a ciertas horas fijas, siendo avisados por toques de campana. De esta forma los monjes y monjas podían interrumpir brevemente sus quehaceres cotidianos para cumplir con los preceptos religiosos, y volver a ellos acabados estos, incluso si se encontraban el las tierras de labor que rodeaban sus monasterios.

Toques	Hora canónica	Hora de la jornada
3 toques	prima	Salida del Sol
2 toques	tercia	Media mañana
1 toque	sexta	Mediodía
2 toques	nona	Media tarde
3 toques	duodécima	Puesta de Sol
4 toques	completa	Noche cerrada

Tabla 1. Tabla de horas canónicas.

Si bien el uso de los relojes mecánicos impuso el uso gradual de las horas iguales o astronómicas, las horas de los rezos han conservado su denominación latina que recuerda que se originaron en sistema de horas planetarias (véase la Tabla 1).

Los relojes medievales consistían en un tren de ruedas que transmitía a una aguja el movimiento generado por un peso que iba descendiendo, o por un muelle espiral que se desenrollaba. La velocidad a la que se producía el giro de las ruedas dentadas era regulada por un mecanismo de *escape*, igual que los orificios que dejaban escapar el agua de las clepsidras eran el mecanismo regulador de la velocidad de éstas. En un principio se trataba de relojes sin esfera numerada al cuidado de uno o varios miembros de la congregación, que llamaban al rezo mediante toques de campana efectuados de un modo manual. Con posterioridad se añadió una esfera numerada en la que la hora era indicada mediante sólo una aguja, la horaria, pues la poca precisión de estos relojes y el uso que se les daba hacía innecesario el minutero: se ha estimado que estos relojes adelantaban o atrasaban del orden de 15 minutos por día. Con el tiempo también fueron dotados de toques automatizados, mediante sistemas de levas que accionaban martillos a las horas prefijadas.

Estas esferas numeradas podían estar divididas de distinta forma. Así se pueden encontrar esferas divididas:

–en 24 horas.

–en 6 horas (hora italiana o ultramontana).
–en 12 horas.

Este último tipo de esfera es el que al final ha perdurado como el más común hasta nuestros días, lo que refleja una vez más la importancia de la antigua costumbre de dividir el día en 12 horas diurnas y 12 nocturnas, a pesar de que a partir de ahora la correspondencia se habrá perdido.

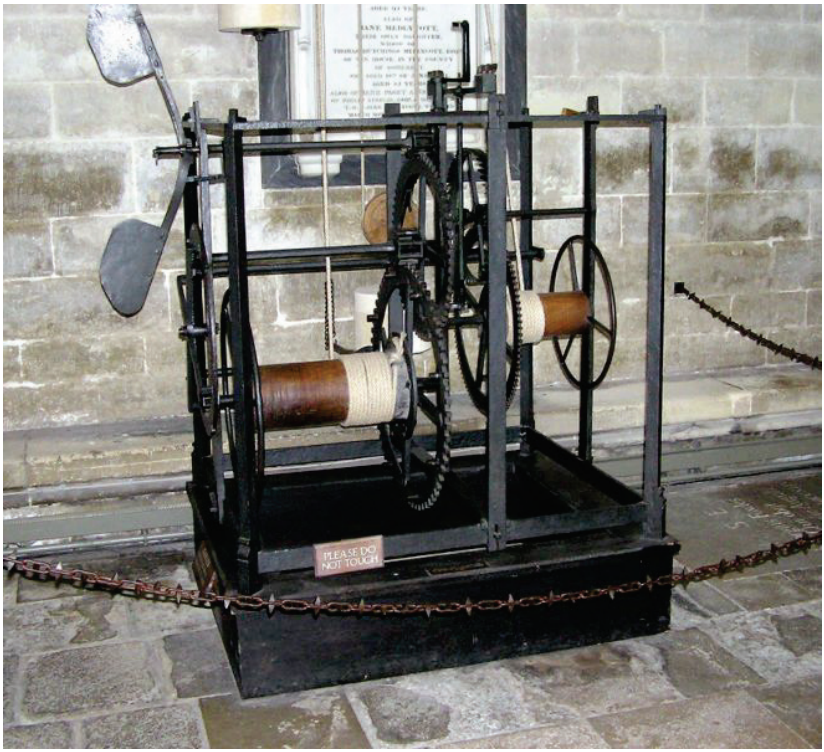

Figura 6. *Imagen de un antiguo reloj medieval de torre de campanario.*

Esta pérdida de correspondencia se debe al hecho de que al mismo tiempo que se introduce progresivamente el uso de las horas iguales, también se cambia el instante de cambio de fecha. En un sistema de horas iguales, en el que las noches y los periodos diurnos duran un número diferente de horas dependiendo de la época del año (como ocurre en la actualidad), no tiene mucho sentido comenzar el día con la puesta del sol o al amanecer:

cada día comenzaría a una hora distinta e incluso los distintos días del año no tendrían la misma duración.

Dado que los relojes eran tan imprecisos, era necesario ponerlos en hora con el Sol a las 12 del mediodía, haciendo coincidir esta hora con el paso del Sol por el meridiano del lugar. No obstante, como no resulta práctico cambiar de fecha en mitad de una jornada laboral (eminentemente ligada al periodo de luz diurna), acabó por adoptarse el convenio de cambiar de día 12 horas más tarde, a medianoche.

Estos primitivos relojes, como cualquier otro reloj mecánico o de otra índole, constan de una fuente de energía que evita que el reloj se detenga, un sistema regulador o de escape (u oscilador) que controle el ritmo al que la energía se libera y el reloj avanza, y un mecanismo que indique el tiempo transcurrido contando las liberaciones del escape (u oscilaciones) que se han producido desde un determinado instante (la última puesta en hora manual del reloj). El buen funcionamiento de un reloj mecánico reside en gran parte en su sistema de escape: un sistema mecánico, regulado por el un oscilador (i. e. un proceso repetitivo), que permite que la fuerza que mueve el reloj sea liberada poco a poco a intervalos regulares y siempre en la misma cantidad, lo que hace que el reloj avance de un modo uniforme.

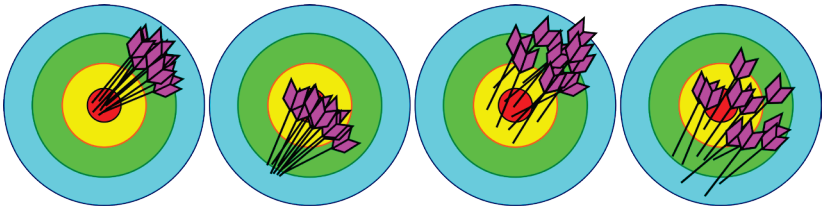

Figura 7. *Precisión y exactitud en un tirador de arco. El de la izquierda es preciso y exacto, el siguiente es también muy preciso pero comete un error sistemático: es inexacto. El tercero es exacto pero impreciso; sus tiros se dispersan más pero están centrados en la diana. El de la derecha es el peor de todos; sus tiros son inexactos y además imprecisos.*

En este punto conviene introducir dos nociones muy relevantes a la hora de caracterizar un reloj: exactitud y precisión. Un reloj exacto es aquel que en promedio marca la hora correcta, mientras que un reloj preciso es aquel en el que la duración de los segundos es muy similar, aunque no necesariamente exacta. Véase el símil del tirador de arco en la figura 7. El mejor reloj será aquel que sea exacto y preciso. Un reloj inexacto pero preciso será

igualmente válido si conocemos bien cuanto adelanta o atrasa, mientras que un reloj exacto pero impreciso nos valdrá para medir días u horas, pero tal vez no para medir minutos y segundos. Un reloj inexacto e impreciso no es un buen reloj.

Como vemos, ahora de lo que se trata es de dividir el tiempo en una serie de intervalos regulares, es decir todos iguales: el tiempo que trataban de medir estos relojes, lo hiciesen bien o mal, era pues el tiempo uniforme de la Física. No obstante estamos dando por hecho que la Tierra gira sobre si misma siempre a una misma velocidad de giro, con lo que todos los días, entendidos como el tiempo transcurrido entre dos pasos sucesivos del Sol por el meridiano de un mismo lugar, tienen la misma duración. Como veremos más adelante, esto no es realmente así, pero si sincronizamos nuestro reloj con el paso del Sol no tenemos manera de apreciar esos efectos. Este tipo de tiempo se denomina tiempo solar verdadero, pues está basado en el paso real del Sol por el meridiano.

El siguiente gran avance viene dado por el que es considerado padre de la Física moderna, Galileo Galilei. Uno de los descubrimientos que llevó a cabo mientras estudiaba el movimiento de los cuerpos, es lo que se denomina el isocronismo de los péndulos. Según Galileo, el periodo P de oscilación de un péndulo, esto es el tiempo que tarda en hacer un movimiento de ida y venida completo, es independiente del péndulo excepto por su longitud, siguiendo una ley que viene dada por la ecuación:

$$P = 2\pi\,(L/g)^{1/2}$$

donde P es el periodo de oscilación, L es la longitud del péndulo y g es la aceleración de la Gravedad. Hoy sabemos que esa formula es exacta sólo para oscilaciones de poca amplitud, pero esto poco importa ahora. La genialidad de Galileo no reside sólo en el descubrimiento de esta ley sino también en su inmediata aplicación para la mejora de los relojes mecánicos. Si se pudiera construir un escape controlado por la oscilación de un péndulo, el cuadrado de la velocidad de avance del reloj sería inversamente proporcional a la longitud del péndulo. Si éste consiste en un peso enroscado en una varilla, podríamos variar la velocidad de avance de un reloj, su marcha, sin más que enroscar o desenroscar el peso en la varilla. Galieo nunca llegó a construir tal reloj, y si bien es cierto que su hijo Vicenzo intentó fabricarlo siguiendo las ideas de su padre, este proyecto no llegó a término.

Amén de otras muchas cosas, entre las que destacan sus aportaciones a la Astronomía con el la invención del telescopio hace poco más de 500

años, y su férrea defensa del sistema cosmológico Copernicano, lo que le condujo a ser presentado ante el tribunal de la Santa Inquisición en Roma, Galileo es ante todo el primer experimentador moderno. Como tal fue el primero en estudiar el movimiento de los cuerpos mediante la toma de medidas de las distancias recorridas y los tiempos en ello invertidos. Dado que por aquél entonces los relojes de cualquier tipo distaban mucho de poder usarse como cronómetros si se requería de cierta precisión, asombra el ingenio que con que Galileo solventó este problema.

En su estudio de la caída de los graves, que concluiría con el descubrimiento del movimiento uniformemente acelerado, Galieo se proveyó de una serie de planos inclinados por los que hacía rodar bolas confeccionadas con distintos materiales. Para determinar la velocidad a la que dichas bolas bajaban rodando por el plano, Galieo dotó a éste de una serie de campanillas cuya posición podía variarse a voluntad. Galileo renuncia a medir el tiempo de descenso en segundos, no puede, y se conforma con estudiar cómo cambia el espacio recorrido para una misma cantidad de tiempo, no importa cual sea ésta. Al descender las bolas hacen sonar las campanillas a su paso. Galileo modifica la posición de estas campanillas hasta que el intervalo entre los toques es uniforme: Galileo no puede calcular cuanto tarda en descender la bola, pero sí puede ajustar la distancia entre sus puntos de medida de forma que la cadencia de los toques producidos sea precisa como el compás de una melodía bien interpretada.

Figura 8. *Reconstrucción del S. XIX del plano inclinado de Galileo, conservada en el Museo de la Historia de la Ciencia de Florencia, y detalle de una de las campanas en él empleadas para marcar los instantes de paso de las bolas.*

Cuando obtiene este resultado se da cuenta de que la separación entre las campanas obedece una progresión aritmética, 1, 3 ,5, 7, 9, etc., esto es, la velocidad de las bolas se acelera uniformemente:

$$v = a\ t$$

y por tanto

$$s = ½\ a\ t^2$$

donde v es la velocidad, s es el espacio recorrido, t es el tiempo transcurrido y a es la aceleración con la que caen las bolas, que a su vez depende de la fuerza de la gravedad y la inclinación del plano.

Las ideas de Galileo sobre el uso de un péndulo como regulador de un reloj se verán llevadas a cabo en 1657, año en el que el físico y astrónomo holandés Chistiaan Huygens patenta los primeros relojes de péndulo, que fabrica siguiendo sus propios diseños. Estos dispositivos llegan a alcanzar una exactitud de 10 s al día. También debemos a Huygens la invención de otro dispositivo que resultará fundamental para el desarrollo de los relojes transportables: el volante de torsión. Este dispositivo consta de un muelle espiral sobre el que se sitúa un anillo, cuyo momento de inercia (resistencia a cambiar su velocidad de giro) se puede regular alterando la disposición de unas masas situadas en el volante. Este dispositivo también tiene un comportamiento oscilatorio (gira en un sentido y el contrario alternativamente) cuyo periodo P viene dado por la ley:

$$P = 2\pi\ (I/k)^{1/2}$$

donde I es el momento de inercia del volante y k la constante de elasticidad del muelle espiral. La invención de este dispositivo le fue disputada por el también físico Robert Hook, el mismo que disputó con Isaac Newton la paternidad de la Ley de Gravitación Universal.

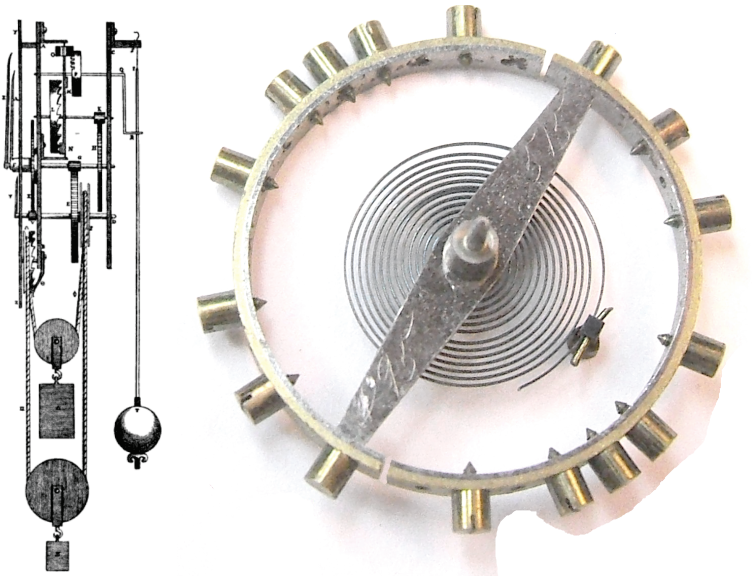

Figura 9. *A la izquierda, esquema de primer reloj de péndulo construido por Chistiaan Huygens a mediados del S.XVII. A la derecha un moderno volante de torsión de un reloj de pulsera mecánico.*

5.1. El problema de la Longitud: Astronomía y Horología frente a frente.

En el S.XVII, las grandes potencias occidentales basaban su supremacía en gran medida en el enorme beneficio económico resultante de la explotación sus respectivos territorios de ultramar. Los productos de las colonias inundaban la metrópoli generando riquezas con las que poder hacer frente a los costes de las interminables guerras que tenían lugar en suelo europeo. Asimismo estas confrontaciones se extendían a las colonias y al asedio de los convoyes comerciales que conectaban ya el mundo entero. En este escenario, disponer de una buena base cartográfica y de un método fiable para estimar la localización de un buque resultaba fundamental.

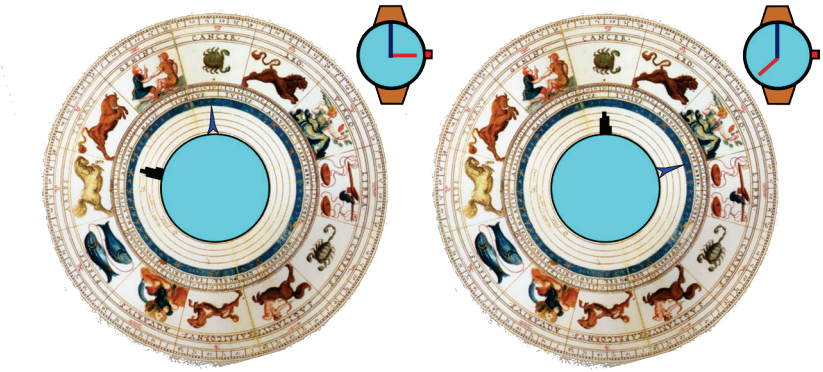

Figura 10. *Debido a la rotación de la Tierra las estrellas que cruzan el meridiano de París a una hora, lo hacen por Chicago algo más tarde. Este retraso no es mas que la diferencia de longitudes entre ambos puntos expresada en horas, minutos y segundos de tiempo (o en grados, minutos y segundos de arco si se multiplica por 15). Para poder aplicar este método para calcular la diferencia de latitudes entre ambas ciudades, debemos tener en Chicago la hora local de París o viceversa. Esto implica la necesidad de poder transportar la hora local de un punto a otro de la Tierra a través de largos viajes, es decir, de disponer de relojes móviles precisos, o de otro método de comparación de los distintos horarios locales.*

Para la localización de un punto en la superficie de la Tierra basta con dar su latitud y longitud. La latitud de un punto, o su distancia en grados hasta el ecuador, se puede calcular fácilmente sin más que calcular la altura del Polo Norte (o Sur) Celeste sobre el horizonte. En el hemisferio Sur no hay ninguna estrella notable cerca del polo, y en el Norte la observación de la Estrella Polar no es evidente. En la práctica, el calculo de la latitud se llevaba a cabo midiendo la altura del Sol sobre el horizonte en su culminación (al mediodía) y conociendo la distancia del Sol al ecuador celeste, la cual estaba tabulada para cada día del año en los almanaques náuticos. Este tipo de medidas podían realizarse perfectamente incluso en alta mar, mediante el uso de dispositivos inventados a tal efecto como los sextantes.

El escollo fundamental para conocer la posición de un barco o un accidente geográfico residía únicamente en el cálculo de su longitud, o distancia al Este u Oeste respecto de un meridiano de referencia. En teoría el cálculo

de este valor también es sencillo. Dado que el movimiento de los astros en el cielo es debido a la rotación de la Tierra, en un punto situado 60 grados al oeste de otro de referencia, todas las estrellas culminaran 4 horas más tarde (como la circunferencia tiene 360° y el día 24 horas, ambos gracias a los babilonios, para expresar grados de latitud en horas o en retrasos o adelantos de las culminaciones de la estrellas basta con dividir entre 15). El problema reside en que para saber diferencia de tiempos entre los instantes de culminación en un punto y otro, necesitamos tener la misma escala horaria en ambos: para calcular la distancia en longitud entre París y Chicago necesitamos tener relojes en ambos sitios que hayan sido sincronizados entre si en un cierto instante y hayan conservado el mismo ritmo de marcha.

Esta conservación de la hora no resultaba nada trivial, pues los relojes de péndulo que comenzaban a ser precisos no funcionan en un barco sometido al incesante oleaje, y los relojes portátiles de bolsillo, que ya comenzaban a ser usados entre las clases sociales altas como símbolo de distinción, eran tan inexactos e imprecisos que necesitaban ser puestos en hora a diario. Pero si ponemos nuestro reloj en hora usando en Sol, tendremos en Chicago la hora local del lugar y lo mismo en París, y el resultado será que las estrellas culminarán a la misma hora local en ambos emplazamientos: necesitamos llevar en el barco una hora de referencia con la que poder calcular la longitud del punto donde realizamos la media. Se intentaron otros métodos, tales como el uso de la medida de la declinación magnética, pero sin éxito.

A falta de un procedimiento mejor, hasta bien entrado el S.XVIII, la longitud de un barco se estimaba por su derrota, consistente en calcular su velocidad y rumbo en cada instante. El tiempo abordo se mantenía mediante el uso de relojes de arena. El resultado era enormemente impreciso, lo que se traducía en una pobre cartografía y en no pocos naufragios.

Precisamente a raíz de una de esas catástrofes, el parlamento inglés aprueba en 1714 una ley, que se conoce por la *Longitude Act*, por la que se constituye un comité de expertos, el *Longitude Board*, para la concesión de un premio en metálico, el *Longitude Prize*, de 10.000, 15.000, 20.000 £ para quien desarrollase un método para calcular la latitud con una precisión de 60, 40 y 30 millas náuticas respectivamente. Recordar en este punto que una milla náutica equivale a 1852 m, o lo que es lo mismo a 1' de arco de meridiano, para lo cual se necesita un reloj con una exactitud mejor que 4 segundos de tiempo. Todo un reto para la tecnología de aquella época. De hecho, cuando se instituyó el premio se pensaba que la solución vendría de la mano de algún método astronómico.

El método astronómico que parecía más prometedor por aquel entonces era el denominado *de las distancias lunares*. Como la Luna gira alrededor de la Tierra una vez al mes, su posición con respecto a las estrellas cambia con relativa rapidez. De hecho, si tomamos como referencia las estrellas, el periodo lunar (sidéreo) es de tan sólo 27,3 días. Esto da como resultado que la distancia entre la Luna y las estrellas cambie a razón de unos 30 segundos de arco por minuto de tiempo. Para alcanzar una precisión de 30 millas, necesitamos calcular la hora con menos de 2 minutos de tiempo de error, y por lo tanto la posición de la Luna mejor que 1 minuto de arco. Este procedimiento necesitaba a su vez de unas excelentes predicciones para el movimiento aparente de la Luna, que debido a su proximidad a la Tierra, tiene un órbita relativamente compleja. No obstante, incluso provistos de estas tablas, la estimación de la distancia de la Luna a las diferentes estrellas con la precisión requerida no era nada sencilla (el tamaño aparente de la Luna es unos 30'), necesitándose personal muy experimentado en este tipo de medidas.

Aunque este procedimiento llegó funcionar, nunca fue competitivo con el que describiremos a continuación. No obstante se otorgaron premios inferiores a los establecidos en la *Longitude Act*, en reconocimiento a los avances aportados a la realización de este tipo de medidas. Con anterioridad, el mismo Galileo propuso la utilización de las ocultaciones de los satélites de Júpiter para estimar el desfase horario entre dos puntos, pero este procedimiento nunca llegó a ponerse en práctica.

Contra todo pronóstico, el gran ganador del *Longitude Prize* fue el artesano (como relojero fue autodidacta) John Harrison, por su invención de los cronógrafos de marina. A lo largo de su vida, Harrison construyó cinco prototipos, que se denominan H1 a H5, que incorporaban sucesivas mejoras en el diseño, encaminadas a reducir el tamaño del reloj y mejorar su precisión, por los que recibió más de 14.000 £ en premios a costa del *Longitude Prize*, y otras casi 9.000 £ por otras vías. A pesar de recibir una auténtica fortuna por sus desarrollos, Harrison siempre sostuvo que el *Longitude Board* no le trató justamente, pues varios de sus cronógrafos marinos alcanzaron una exactitud de 0,5 s por día, siendo merecedores del premio mayor; una copia del prototipo H4 acumuló un error de tan sólo 54 s. en un viaje de 5 meses de duración.

Figura 11. *Cronógrafo de marina H5 construido por John Harrison. Colección Worshipful.*

La batalla por hacerse con el *Longitude Prize* demostró que ya en el S.XVIII la técnica de construcción de relojes había progresado lo suficiente como para ganar la partida a otros procedimientos no mecánicos. A pesar de esto, la unidad de medida del tiempo seguía estando basada en la rotación de la Tierra sobre sí misma. Tendrán que pasar más de 200 años para que se abandone finalmente esta idea.

5.2 Tiempo solar verdadero, tiempo solar medio y tiempo universal.

Como ya se ha comentado, todavía en el S.XVIII los relojes eran puestos en hora localmente mediante la observación directa de la culminación del Sol al mediodía. Esta práctica implica que un día solar verdadero, de 86.400 s de duración, era el tiempo que transcurría entre dos pasos consecutivos del Sol por el meridiano del lugar. Por otra parte las leyes de la mecánica de Newton necesariamente sólo pueden utilizarse si el tiempo es una magnitud uniforme: todos los segundos deben tener la misma duración. Dado que el movimiento aparente del Sol en el cielo se debe a la rotación de la Tierra, la condición de tener segundos de igual duración sólo se satisface si

todos los días tienen la misma duración, o lo que es lo mismo la velocidad de giro de la Tierra es constante y el ángulo girado cada día también es constante.

La segunda condición, la de que cada día la Tierra gira un mismo ángulo, parece una trivialidad pero no lo es. Uno tendería a pensar que cada día la Tierra gira sobre su eje una vuelta exactamente, es decir 360°, pero esto no es cierto. Al tomar como referencia el paso del Sol por el meridiano estamos mezclando los giros orbital y de rotación de la Tierra en nuestra definición de duración de día solar verdadero. Mientras la Tierra gira 360° sobre sí misma avanza 360°/365,25 (0,986°) en su movimiento orbital, y por lo tanto debe girar un poco más para volver a tener el Sol de frente (véase la figura 12). Si por el contrario hubiésemos tomado como definición de día el intervalo que separa dos culminaciones consecutivas de cualquier estrella, un día sí hubiese equivalido a un giro de 360° exactamente. El caso es que en un año de 365,25 días (solares) la Tierra gira 365,25 veces sobre si misma con respecto al Sol y una vez alrededor de éste, con lo que habrá girado 366,25 veces sobre si misma con respecto a las estrellas dado que el ambos movimientos traslación y rotación van en el mismo sentido[8].

- En un año la Tierra da 365,25 vueltas sobre sí misma respecto al Sol, esto es días solares (los normales), más una vuelta completa alrededor del Sol (en total 366,25 vueltas sobre sí misma).
- En un año la Tierra da 366,25 vueltas de 360º respecto de las estrellas. A estos periodos de tiempo los llamamos días sidéreos, 236 segundos solares más cortos que los días solares (los normales).
- El tiempo basado en los días sidéreos se llama tiempo sidéreo, es local y es el que determina la posición de las estrellas desde un punto de la Tierra, y no cambia a lo largo del año: una misma estrella culmina a la misma hora sidérea todos los días del año. (De hecho culmina a la hora sidérea local que indica su coordenada de longitud en el cielo, que se conoce como ascensión recta, A. R.).

[8] Se dice que la rotación de la Tierra es prógrada, como la de la mayoría de los planetas.

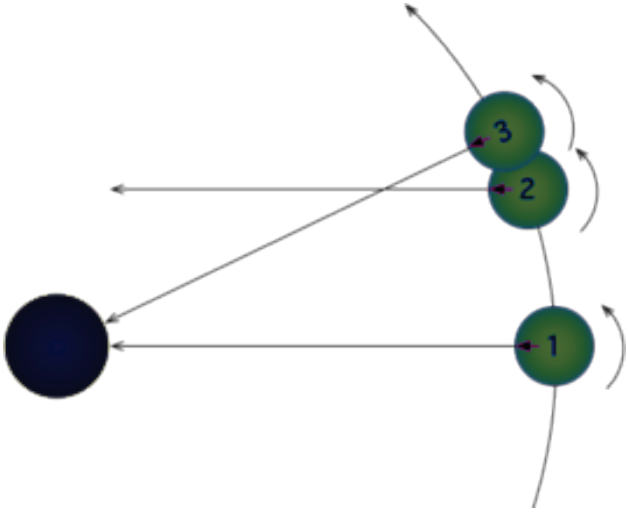

Figura 12. *Tiempo solar y tiempo sidéreo. Los giros de la Tierra sobre si misma de 360° dan lugar a los días sidéreos, más cortos que los días solares o normales. De la posición 1 a 2 habrá transcurrido un día sidéreo, mientras que de 1 a 3 ha pasado un día solar.*

Ahora bien, dado que los días habituales (los civiles) toman como referencia al Sol, inmediatamente debemos concluir que no pueden tener la misma duración todos los días del año. Veamos por qué.

De un lado tenemos la segunda ley de Kepler, que dice que cuando los planetas orbitan alrededor del Sol, el radio que une el éste con el planeta barre áreas iguales en intervalos de tiempo iguales. La órbita de la Tierra alrededor del Sol no es circular sino elíptica, con el Sol en uno de los focos (ésta es la primera ley de Kepler). En su punto más próximo, el perihelio (que sucede cerca del solsticio de invierno) la Tierra dista un 3% menos del Sol que en el afelio, y por lo tanto, para que se cumpla la segunda ley de Kepler, la Tierra orbita un 3% más deprisa, y necesita girar algo más de 360,986° para que el Sol vuelva a cruzar el meridiano (y al contrario ocurre en verano).

De otro lado tenemos que la órbita de la Tierra esta inclinada respecto de su eje de rotación unos 23,4° , lo que da origen a las estaciones y a que en el hemisferio Norte el Sol esté más alto en verano y más bajo en invierno (y viceversa en el hemisferio Sur). Aunque es la Tierra la que rota, podemos

visualizar los efectos de este fenómeno en la duración del día solar verdadero imaginando que es el Sol el que se mueve. Al cambiar de altura a lo largo del año, es como si el Sol, además de dar una vuelta a nuestro alrededor, debiera realizar un recorrido extra correspondiente a esos desplazamientos en altura, tardando algo más en volver a situarse sobre el meridiano. Este efecto es nulo en los solsticios (momento en el que la altura del Sol es máxima o mínima y por lo tanto estacionaria en primer orden) y en los equinoccios (que es cuando el Sol transita por la eclíptica), adoptando valores positivos y negativos en otras las épocas del año.

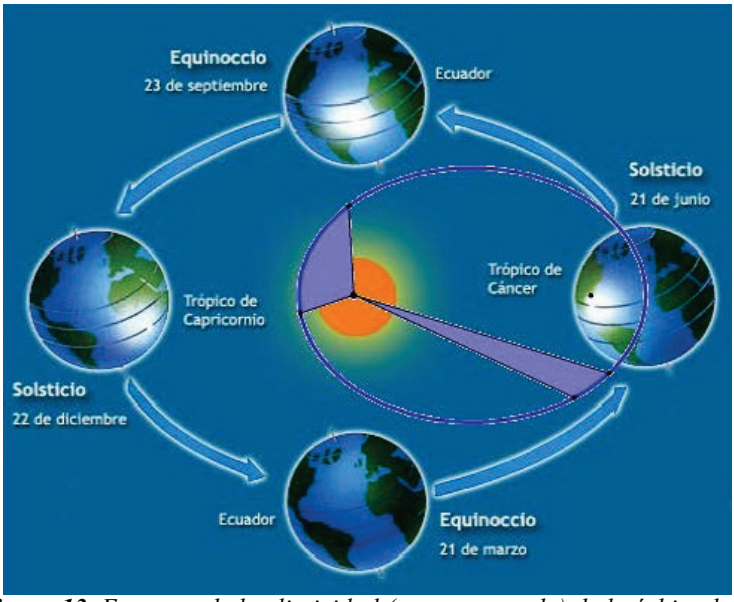

Figura 13. *Esquema de la elipticidad (muy exagerada) de la órbita de la Tierra y de la segunda ley de Kepler (figura interior), y de la inclinación del eje de giro respecto de la ecliptica. Ambos efectos son los responsables de la duración no uniforme de los días solares verdaderos.*

La combinación de ambos efectos hace que la duración de los días verdaderos tenga diferencias de hasta 1 s entre dos días consecutivos, de hasta 30 s respecto de su duración media, y que se acumulen adelantos y retrasos a lo largo del año de más de 10 m. El tiempo solar verdadero, el que marcan los relojes de Sol, no es uniforme.

Para evitar este problema, y mantener un día de 86.400 s de duración constante, se introdujo la noción de día solar medio, por contraposición con el día solar verdadero que resulta de la observación directa del Sol. En el caso del día solar medio, se define la duración del segundo como la 86.400-ava parte del intervalo transcurrido entre el dos tránsitos consecutivos de un Sol medio ficticio, que avanza a una velocidad uniforme no sobre la eclíptica sino sobre el ecuador celeste. Evidentemente la observación de este Sol medio no pude llevarse a cabo, puesto que es ficticio, con lo que para la determinación del mediodía medio del lugar se observaba el Sol verdadero, corrigiéndose el instante de la observación por la diferencia entre el tiempo solar verdadero y el tiempo solar medio. Esta diferencia es conocida como la ecuación de tiempos, y puede calcularse *a priori*. A continuación se da una fórmula aproximada para la ecuación de tiempos:

$$\textit{Ecuación de tiempos} = \textit{tiempo solar verdadero menos tiempo solar medio} = 595\ \mathrm{sen}(199° + 1{,}971° \cdot d) + 441\ \mathrm{sen}(175° + 0{,}986° \cdot d)$$

donde d es el día del año y la diferencia está dada en segundos de tiempo (solar medio). Véase también la figura 14.

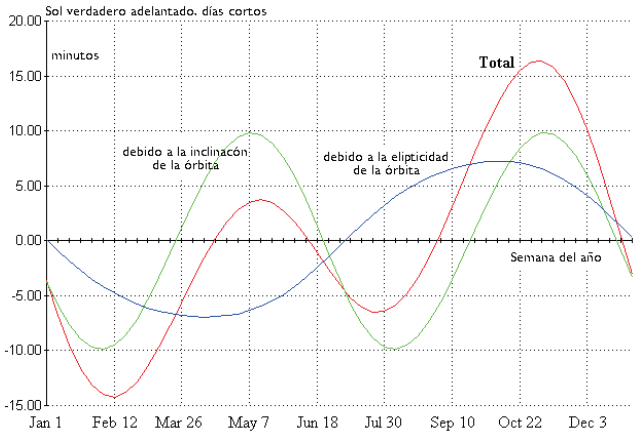

Figura 14. *Gráfica de la ecuación de tiempos. En verde el efecto debido a la inclinación de la órbita de la Tierra (con respecto al eje de rotación), y en azul el debido a la elipticidad de la órbita. En rojo la ecuación total resultante. Los valores positivos indican que el tiempo verdadero va adelantado.*

El problema que plantea la ecuación del tiempo es que si queremos seguir manteniendo el el Sol para la determinación de las 12 del mediodía, estamos obligados a volver a un sistema de horas desiguales (aunque no tanto como en el caso de las horas desiguales planetarias que se usaban en la Edad Antigua). Nuevamente esto implica el continuo ajuste de los relojes mecánicos como antiguamente sucedía con las clepsidras. Esto no es práctico, pues ni el tiempo es el tiempo uniforme de la Física, ni tiene sentido regular día tras día relojes que ya alcanzaban precisiones del orden de la décima de segundo por día. Se podría tomar como referencia el tiempo sidéreo, que no presenta estas inhomogeneidades (en el supuesto de que la Tierra gire de un modo uniforme), pero esto daría como resultado que en ciertas épocas del año a las doce del mediodía sería de noche.

Figura 15. *Analema solar (a la izquierda), y reloj de sol moderno (a la derecha) que corrige el efecto de la ecuación de tiempos mediante un "gnomon" en forma de huso.*

Con anterioridad al S.XIX se siguió manteniendo el uso del tiempo solar verdadero. La hora civil era una hora local. Cada lugar de la Tierra tenía su propia hora, en la que se hacía coincidir el paso del Sol (verdadero o medio) por el meridiano de lugar a las 12 h del mediodía. Los buenos relojes que entonces se comercializaban debían venir provistos de una tabla de corrección de tiempos, para trasformar el tiempo uniforme (solar medio) que marcaban, en el tiempo solar verdadero que seguía estando en vigor. Hoy en día, por el contrario, se construyen relojes de Sol que incluyen la corrección

por la ecuación de tiempos para que indiquen horas de tiempo solar medio, que son las que usamos en la actualidad, usando el Sol verdadero, que es que produce la sombra. Estas correcciones a veces se denominan *analemas*, pues este es el nombre que recibe la figura, similar a un 8, definida por las posiciones reales del Sol a una misma hora solar media a lo largo del año (ver la figura 15). Se definió el tiempo solar local como el ángulo horario (A.H.) del Sol medio, en cada lugar e instante más 12 h, pues seguimos queriendo que cuando el Sol culmine (A.H. = 0) sean las 12 h, y no las 0 h, y así seguir comenzando el día a medianoche. Se adopta finalmente como unidad de tiempo el segundo, definido como la fracción 86,400-ava de la duración del día solar medio.

El abandono definitivo del uso del tiempo local para usos civiles tiene lugar el S.XIX. La continua mejoría de la precisión de los relojes mecánicos empieza a hacer innecesaria la observación del Sol verdadero o medio para la determinación del mediodía. La invención del ferrocarril facilita la movilidad de las personas, lo que impone el uso de un mismo tiempo a lo largo de esos desplazamientos, o al menos para los de corta distancia. De otra parte, el telégrafo permite por primera vez la difusión de una hora patrón de una forma sencilla y con una precisión aceptable. Como resultado de estos avances y nuevas necesidades surge la adopción de sistemas de horas comunes, válidas para un cierto territorio (horas civiles de carácter regional o nacional), y de un tiempo internacional o universal, TU, en el que poder referir los eventos de un modo absoluto.

Este proceso culmina en 1887, momento en el que se propone adoptar el sistema internacional de husos horarios, todavía en vigor. Se divide la Tierra en 24 husos de latitud de 15º de longitud de anchura, centrados en longitudes 0º (Greenwich), ±15º, ±30º, etc., que tendrán desfases horarios de 0, ±1 h,±2 h, etc. Estos husos son adaptados a las a las fronteras de los países. Además estas horas oficiales nacionales pueden adelantarse o atrasarse permanentemente, para que coincidan con las de sus vecinos, o según la estación del año siguiendo criterios de ahorro energético, o ambos como es el caso de España[9].

Se adopta además como TU el tiempo solar medio del meridiano de Greenwich, GMT, que a su vez rige el del huso horario de Greenwich. Como curiosidad comentar que el primer patrón de TU fue construido por la empresa londinense *Dent*, que también fabricó el *Big Ben*. En el Observato-

[9] Para más detalles sobre la historia de la adopción de los husos horarios en España, véase la contribución por la Prof. Dra. María Ruiz Trapero en estas mismas actas.

rio Astronómico de Madrid se conservan dos cronógrafos de marina fabricados por esa misma casa, uno de tiempo solar medio y otro de tiempo sidéreo.

6. LOS NUEVOS PATRONES DE TIEMPO.

6.1. La Nueva Física: Relatividad y Mecánica Cuántica.

A principios del S.XX la Física era todavía Clásica (Newtoniana) y el tiempo, la distancia y la masa eran consideradas magnitudes invariantes. En 1905 A. Einstein publica su Teoría Especial de la Relatividad, completada entre 1907 – 1915 con una formulación más General; la Teoría General de la Relatividad. A partir de entonces sabemos que el Tiempo Físico depende del observador, precisamente para mantener que las leyes de la Física sean las mismas en todo el Universo. Según la mecánica relativista, desde nuestra posición como observadores en la superficie de la Tierra, la velocidad a la trascurre el tiempo en otro punto viene dada por la ecuación de la dilatación de los tiempos:

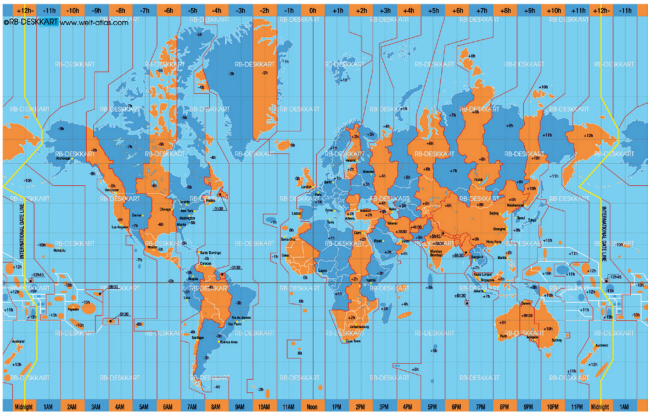

Figura 16. *Mapa mundial de los husos horarios en la actualidad.*

$$t/t' = (1 - 2GM/Rc^2 - v^2/c^2)^{1/2}$$

donde t es el Tiempo en nuestro sistema referencia y t' es el tiempo en otro sistema que se aleja de nosotros con una velocidad v y donde la fuerza de la gravedad es nula (por supuesto G es la constante de la Gravitación Universal, M es la masa de la Tierra y R es su radio). En los sistemas en movimien-

to, el tiempo parece transcurrir más despacio, mientras que ocurre lo contrario si la fuerza de gravedad es menor que la nuestra. Esto supone una autentica revolución porque a partir de entonces la medida del tiempo está ligada al observador que la realiza, y de hecho es distinta para observadores que no estén en reposo uno respecto del otro, o no sufran campos gravitatorios de igual intensidad. Estos efectos sólo son importantes cuando las velocidades relativas son cercanas a la de la luz, unos 300.000 km s^{-1}, y/o el campo gravitatorio es muy intenso. En la vida cotidiana estos efectos son muy pequeños, a pesar de lo cual, debido a la precisión de los relojes de actuales, son apreciables y corregibles en caso de ser necesario.

Durante el 1er tercio del S.XX se desarrolla la Mecánica Cuańtica, que describe la Física de los sistemas sencillos como los gases compuestos de átomos y moléculas. En estos sistemas sencillos las partículas no pueden tener cualquier nivel de energía, sino que sólo son posibles ciertos estados con valores de energía muy concretos: este fenómeno se denomina cuantización. Cuando las partículas que constituyen el sistema cambian de energía lo hacen pasando uno de esos niveles a otro, y por tanto los cambios de energía permitidos también adquieren unos valores discretos.

Si este cambio de energía cuantizado se produce a través de la absorción o emisión de luz, éste tiene lugar mediante la absorción o emisión de una partícula denominada fotón, cuya energía será igual a la del salto de energía que se de en la partícula al pasar de un nivel a otro. Por otro lado, la energía de un fotón depende únicamente su frecuencia *v*, o número de veces que el campo electromagnético oscila por segundo, mediante la sencilla ecuación:

Figura 17. *A la izquierda, retrato de A. Einstein, el descubridor de la Teoría de la Relatividad y de la cuantización del campo electromagnético. A la derecha Bohr, Heisembreg y Pauli, tres de los fundadores de la Mecánica Cuántica.*

$$E = h\,\nu = h / P$$

donde E es la energía del fotón, ν su frecuencia, y h es la denominada constante de Plank. P es el periodo del fotón, o tiempo que tarda en producirse una oscilación del campo electromagnético. Como resultado de la cuantización de los niveles de energía de estos sistemas y de la luz (tenemos que emitir un o absorber un número entero de fotones), la radiación que emiten o absorben estos sistemas sólo puede tener unos valores discretos de su frecuencia/periodo. Gracias a esto es posible construir relojes en el que el paso del tiempo esté controlado por el periodo de una de estas emisiones, un valor que está muy poco sujeto a variaciones, por lo que el citado reloj sería potencialmente muy preciso.

6.2. Relojes modernos no mecánicos: el reloj de cuarzo.

Los cristales de cuarzo presentan propiedades piezo-eléctricas, esto es, cambian de tamaño cuando se les aplica un campo eléctrico, y generan electricidad si se les cambia de tamaño (mediante una compresión por ejemplo). Gracias a esta característica, cuando se los incluye en un circuito eléctrico éste se convierte en un circuito eléctrico resonante: sólo circula la corriente eléctrica que oscila con un periodo determinado (las otras componentes de la corriente son amortiguadas en un plazo de tiempo breve). De esta forma se construyen relojes en los que el paso del tiempo esta controlado no por la frecuencia de oscilación de un péndulo o de un volante de torsión, elementos mecánicos que sufren desgaste, sino por la frecuencia propia de un determinado cristal de cuarzo. El valor de esta frecuencia depende del tamaño del cristal y sus propiedades piezo-eléctricas. Ambas están sujetas a variaciones debido sobre todo a la influencia de los cambios de temperatura, que producen dilataciones en el cristal, que aun siendo pequeñas cambian la marcha del reloj.

La invención de los relojes de cuarzo ha supuesto una autentica revolución en el mundo de la horología, no tanto por la precisión que alcanzan sino por su bajo coste de producción y su capacidad de miniaturización. Hoy en día encontramos relojes de cuarzo no sólo en la inmensa mayoría de los relojes comerciales, bien sean de pulsera o decorativos, sino en multitud de dispositivos electrónicos, desde teléfonos móviles a ordenadores personales o cámaras de fotos.

Para garantizar la estabilidad de estos relojes, el cristal de cuarzo debe mantenerse a temperatura constante. Los relojes de pulsera se calibran a una

temperatura de 37 – 38°C, y los de alta precisión se encierran en cámaras con temperatura controlada, alcanzándose exactitudes del orden del segundo por año o milisegundos por día. A pesar de esto, no superan en estabilidad y precisión a los mejores relojes de péndulo construidos (de tipo Shortt) que alcanzan exactitudes de 0.3 ms al día ≈ 0.1 s por año.

6.3. Relojes modernos no mecánicos: relojes atómicos.

Los relojes atómicos son aquellos que usan las frecuencias naturales de los cambios de energía de átomos como patrones de frecuencia (osciladores). Se han diseñado numerosos modelos, pero los más usados hoy en día son los relojes de Cesio y los máseres de Hidrógeno. En ambos casos se usa la estabilidad de estos sistemas para controlar relojes de cuarzo que funcionan de un modo esclavo.

Los relojes de Cesio son hoy en día los relojes más exactos que se han llegado a construir. Utilizan la transición (4,0) ↔ (3,0) del isótopo 133 del átomo de cesio (^{133}Cs) como patrón, cuyos fotones oscilan 9.192.631.770 veces por segundo. El funcionamiento del reloj de cesio se basa en la utilización de un gas de átomos de cesio para la construcción de un circuito eléctrico resonante a esa frecuencia. Con estos sistemas se alcanzan exactitudes de 0.1 ns por día (1 ns= 0.000 000 001 s), 0.000 035 ms por año, y constituyen la base actual para la definición del segundo y del TU.

Los máseres de Hidrógeno son sistemas similares que usan un gas de átomos de hidrógeno en vez de cesio para la creación del sistema resonante. A largo plazo estos relojes no son tan exactos como los relojes de cesio, pero son mucho más precisos (son mejores a corto plazo). Se utilizan para marcar tiempos en escalas cortas (inferiores al segundo), y su ritmo a más largo plazo se corrige mediante un patrón de Cesio.

En la actualidad se están desarrollando relojes de iones atrapados fríos con los que se alcanzan exactitudes de 1 ps por día (1 ps = 0.001 ns = 0.000 000 001 ms).

6.4. La rotación de la Tierra no es constante.

El TU definido a partir del día solar medio, asume, para que sea un Tiempo Físico válido, que la Tierra gira sobre si misma a una velocidad constante de 15,0566" por segundo de tiempo. Pero la velocidad de rotación de la Tierra no es constante. Podría serlo en módulo (su velocidad de giro), pero desde luego no lo es en su orientación. El eje de giro de la Tierra está

sometido a unos movimientos de precesión y nutación, debido a la atracción gravitatoria de la Luna y el Sol, y a que la Tierra no es perfectamente esférica. Esto hace que la duración de un año trópico no coincida con la duración de un año sidéreo. El año trópico es que mide el intervalo de tiempo que separa dos equinoccios de otoño, y es el relevante en lo relativo a la variación del periodo insolación con las estaciones, que es lo que gobierna ciclos naturales de floración, reproducción de los animales, etc. El año sidéreo es el que toma como referencia las estrellas para determinar cuánto tarda la Tierra en girar al rededor del Sol. (Tenemos algo similar a los días solares y sidéreos.)

El punto de la órbita de la Tierra en el equinoccio de otoño, el denominado punto Aries, es retrogrado, es decir, el ciclo de la sucesión de las estaciones dura un poco menos que un giro orbital completo medido respecto a las estrellas, y además esta duración disminuye con el tiempo según la ecuación:

$$\textit{Año trópico} = (365{,}24219878 - 0{,}00000614\ TE)\ \textit{días}$$

donde *TE* son los Siglos Julianos (de exactamente 100 años 365,25 días) transcurridos desde 1900: los años a los que estamos habituados desde el origen de la humanidad se van acortando.

Pero no sólo la orientación del eje de giro de la Tierra no permanece constante, sino que la velocidad de giro también cambia. Las fuerzas de marea debidas a la Gravedad y a que los planetas y satélites tienen un tamaño no despreciable, frenan poco a poco los movimientos de rotación de los cuerpos del nuestro Sistema Solar. De hecho la Luna y otros muchos satélites de otros planetas tienen rotaciones síncronas (periodo rotación igual al periodo de traslación), por lo que vistos desde el planeta parecen estar parados (siempre muestran la misma cara). La Luna ya no gira sobre si misma como resultado de estas fuerzas de marea, y la Tierra se está frenado por el mismo motivo.

Además hoy sabemos que hay otros efectos, como las mareas habituales, las mareas terrestres, los grandes terremotos, que afectan a la velocidad y orientación del eje del giro de la Tierra. El resultado de todo esto es que la definición de TU a partir del día solar medio no puede ser aceptable si queremos tener una definición del segundo que no cambie con el tiempo.

Estas variaciones en la velocidad de giro de la Tierra empezaron a apreciarse a mediados del S.XX, cuando los relojes mecánicos y electromecánicos entonces en uso fueron lo suficientemente precisos y exactos.

Desde 1987 la vigilancia de la rotación de la Tierra está a cargo del IERS (International Earth Rotation Service). Este organismo internacional es el encargado de medir:

–los cambios en la orientación del eje de la Tierra respecto de las estrellas: precesión y nutación. Estos cambios implican que las coordenadas de las estrellas en el cielo dependen del instante de observación y fijan la duración del año trópico.

–el cambio de la localización del polo en la corteza terrestre, lo que implica que la latitud y longitud de un lugar no son fijas.

–la velocidad angular instantánea del giro de la Tierra. Se aprecia una variación secular, la Tierra se está frenando, así como variaciones estacionales debidas a los cambios estacionales en las corrientes de agua y aire. También se aprecian otros cambios debidos a fenómenos climáticos más esporádicos como el Niño. Hasta la fecha no se han podido distinguir los cambios en la rotación de la Tierra debidos a terremotos, ni siquiera a los mayores acontecidos recientemente (Indonesia, Chile y Japón).

Se aprecian variaciones en la velocidad de giro de la Tierra que afectan a la duración del día Solar medio. Estas variaciones son periódicas de diversa frecuencia, pero también se aprecia un término secular.

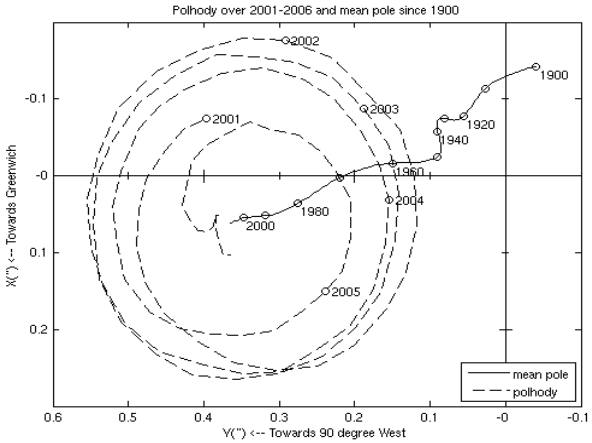

Figura 18. *Variación de la localización del eje de giro instantáneo de la Tierra en la corteza terrestre: el poloide. Recuérdese que 1" en la corteza terrestre equivale a un desplazamiento de unos 3,1 m.*

6.5. Una nueva definición del segundo.

Hasta mediados del S.XX la definición del segundo estaba basada en la duración de un día solar medio: 1 s = 1/86.400 día. Pero si la velocidad de giro de la Tierra no es fija, sino que se está decelerando ¿ a qué día nos estamos refiriendo ? Se podría haber solucionado el problema fijando un día en concreto, pero una vez que este día ha pasado ¿ cómo podríamos volver a comprobar que nuestros relojes marchan a ese ritmo ? No se trata sólo de dar una definición del segundo, sino de dar una definición que pueda ser usada para comprobar de una manera práctica la marcha de los relojes y permita las construcción nuevos modelos más precisos.

Debido a estos problemas, la Unión Astronómica Internacional (IAU/AUI) decide en 1955 redefinir el segundo. La nueva definición segundo fue:

1/31 556 925,975-ava parte de la duración del año trópico en 1900,0

es decir, el año 1900 duró exactamente 365,242199 días de 86.400 s. Digo exactamente porque se trata de una definición. La variación de la duración de los años trópicos sigue una formula bien conocida, por lo que puede calcularse la duración para ese año a partir de la observación de la duración de un año trópico posterior. Esta medida permite por tanto la calibración de cualquier reloj, al contrario que la basada en la rotación de la Tierra, simplemente porque el acortamiento de la duración los años es calculable y predecible y el de la duración de los días no.

Se definió además el denominado tiempo de efemérides, TE, que tiene como unidad ese mismo segundo pero que no se acomoda a las posibles variaciones del TU o del día solar medio. Se trata de un tiempo Físico, en el sentido de que es una sucesión de segundos todos idénticos entre si. En concreto se adopto como magnitud tiempo la que cumple la ley de Newcomb que da la posición del Sol en la eclíptica *L* según la expresión:

$$L = 279°41'48{,}04'' + 129602768{,}13'' \, TE + 1{,}089'' \, TE^2$$

donde *TE* es el tiempo de efemérides en dado en siglos Julianos trascurridos desde 1990.

Finalmente (de momento), en 1967 se adopta una definición de segundo que no se basa en ninguna observación astronómica, sino en la frecuencia

natural de una transición atómica. En concreto la usada en los relojes atómicos de cesio, de forma que:

1 s = 9 192 631 770 oscilaciones de la transición hiper-fina (4,0) ↔ (3,0) del átomo de Cesio 133 a nivel del mar

Esta definición está basada en Física Atómica, no en conceptos astronómicos ni ligados a la rotación de la Tierra. Nótese además el hecho de que se especifica que la medida debe estar hecha al nivel de mar, pues la marcha de cualquier reloj, no sólo los mecánicos, depende de la fuerza del campo gravitatorio. Se define además un Tiempo Atómico Internacional, TAI, como la sucesión ininterrumpida de segundos según la anterior definición.

Se define asimismo la unidad de longitud, el metro, a partir del segundo y la velocidad de la luz en el vacío c = 299.792.458 m s^{-1}, que se toma como una contante física fundamental. De esta forma la nueva definición de metro resulta:

1 m = distancia recorrida por un rayo de luz en el vacío en 9.192.631.770 / 299.792.458 oscilaciones de la transición hiper-fina (4,0) ↔ (3,0) del átomo de Cesio 133 a nivel del mar

Como vemos, la nueva definición de metro también está asociada sólo a contantes físicas que se adoptan como patrón, y por lo tanto están exentas de error.

En 1972 se adopta además el TAI como sustitución del tiempo de efemérides (el tiempo de las ecuaciones de la Física). TE = TAI + 32,184 s, porque TE = TU en 1900, y TAI = TU en 1958. 32,184 s es el retraso acumulado por la rotación de la Tierra en esos 58 años. En la actualidad ese retraso acumulado ascendería a 68,51 s.

Además de las las anteriormente citadas, se han definido otras escalas de tiempos que resultan prácticas para ciertos cálculos astronómicos, y que tienen en cuenta el hecho de que el tiempo no transcurre con el mismo ritmo en lugares diferentes debido a efectos relativistas.

–TDT: es el tiempo dinámico terrestre, heredero del TE

–TDB: es el tiempo referido a baricentro del Sistema Solar.

Y ya a partir de 1991 tenemos

–TCG: tiempo coordinado geocéntrico

–TGB: tiempo coordinado baricéntrico

–TT: tiempo terrestre, referido a la superficie de la Tierra

6.6. Tiempo Civil y Tiempo Físico en la actualidad.

En la actualidad existen dos escalas de tiempo universalmente utilizadas, el Tiempo Universal (abreviado TU) y el Tiempo Atómico Internacional (abreviado TAI). La hora civil de los países se rige por el TU, ligado a la rotación de la Tierra, mientras que el Tiempo Físico esta representado por el TAI. Como TU se atrasa respecto de TAI 0,8 s por año mas o menos, si no hacemos nada al respecto: ¡ al cabo de 540 siglos a las 12 h de TU sería media noche !

Obviamente no podemos dejar que suceda esto. Para prevenir este problema se han adoptado medidas correctoras, que en cierto modo son análogas a las que hemos venido tomado para el calendario a lo largo de la historia. Como el año trópico no dura un número entero de meses sinódicos, las culturas que adoptaron un calendario luni-solar debían introducir un décimo-tercer mes cada vez que el año de sólo 12 meses lunares acumulaba demasiado retraso. En el caso de los calendarios solares de 365 días, introducimos un día extra (en los años bisiestos) cada vez que acumulamos cerca de un día de retraso (si no nos ocurriría como a los egipcios con su ciclo sótico). Ahora para corregir este problema basta con añadir o quitar segundos al TU cada vez que este se separe más de un segundo del tiempo solar medio.

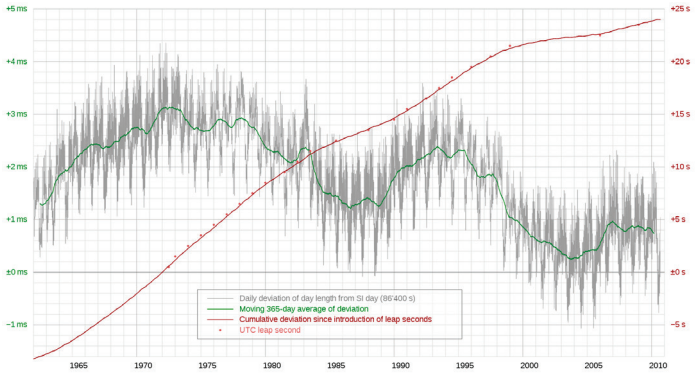

Figura 19. *Variación de la longitud del día respecto a la duración canónica de 86.400 segundos del Sistema Internacional de medidas (SI) o TAI, y diferencias entre TAI y TUC con el tiempo.*

La diferencia entre estas correcciones y las de los calendarios es que en éstos últimos, como los periodos de traslación de la Tierra y la Luna son bien conocidos, podemos establecer reglas fijas como la que se ha adoptado para la intercalación de los meses y su duración el en calendario luni-solar judío, o la de los años bisiestos en el calendario (solar) Gregoriano. Con la corrección debida a la deceleración de la rotación de la Tierra no podemos adoptar reglas tan sencillas porque estas variaciones no pueden predecirse, al menos por el momento. En la actualidad estas correcciones las establece el IERS, que las difunde a las distintas instituciones encargadas del mantenimiento de la hora civil en cada país; en España el Real Observatorio de la Armada (ROA) en San Fernando.

El sistema que se sigue para establecer el tiempo civil es el siguiente. Se define un Tiempo Universal Coordinado (TUC), como un tiempo que transcurre al mismo ritmo que el TAI (es decir, los segundos tienen la misma duración), pero que introduce correcciones de un segundo exacto, para que TUC – TU1 difieran en menos de un segundo. TU = TU0 es el tiempo universal local, determinado por la observación de las estrellas. TU1 es el TU una vez que se ha teniendo en cuenta la corrección debida a posición del polo en cada instante, por lo que es el mismo en toda la Tierra. Cuando DUT1 = TU1 – TUC es menor que –0,5 s, el siguiente 30 de junio o 31 de diciembre, se retrasa 1 segundo el TUC haciendo que los relojes sigan la secuencia:

23h 59m 58s, 23h 59m 59s, 23h 59m 60s, +1d 00h 00m 00s

Este segundo extra se denomina segundo intercalar. Lo que hacemos es retrasar el reloj que marca TUC, añadiendo un segundo más a un cierto día, para compensar que la Tierra tarda un poco más de 86.400 s de TAI en dar una vuelta (respecto del Sol medio). Es como si se tratase de un día abundante, embolístico, o bisiesto, que contiene un minuto con un segundo 59bis (el segundo 60).

En un principio, esta corrección se efectuaba cada vez que la diferencia TU1 – TUC superaba 0,1 s en valor absoluto, lo que hacía necesaria la introducción correcciones muy frecuentemente (varias veces por año) y muy pequeñas (de 0,1 s). Este sistema se abandonó en favor del actual, que requiere correcciones de 1 s una vez por año a lo sumo (hay años en los que ni siquiera es necesaria la corrección).

Podemos preguntarnos si tanta exactitud es realmente necesaria. El segundo intercalar se introduce para que el tiempo que usamos cotidianamen-

te, TUC, nunca exceda en más de un segundo el antiguo TU. De esta forma, el Sol nunca culminará con más de un segundo de retraso respecto de hora que resultaría de corregir las 12 del mediodía por la ecuación de tiempos, la diferencia de latitud entre el lugar y el meridiano central del uso horario, y de los adelantos y retrasos del tiempo oficial nacional respecto del huso horario que normalmente nos correspondería. ¿ Realmente merece la pena corregir esos retrasos de segundo en segundo ? La verdad es que, dado el retraso de 0,8 s por año que ahora se observa, ¿ no sería más razonable efectuar estas correcciones cuando el retraso acumulado fuera mayor ? Por ejemplo, si en vez de usar un segundo intercalar adoptásemos la introducción de un minuto intercalar, tendríamos que corregir nuestros relojes poco más de una vez por siglo.

7. LA DIFUSIÓN DEL TIEMPO.

Para la población en general el tiempo que cuenta es TUC, y sólo tiene que sincronizar sus relojes cuando se produce un cambio de hora al pasar de horario de invierno a verano y viceversa, cuando al viajar cambiamos de huso horario, cuando se introduce un segundo intercalar, y lo que es más frecuente, cuando queremos corregir la inexactitud de nuestros relojes. Para que esto sea posible debemos hacer llegar un buen patrón de TUC a los ciudadanos en general, y aun mejor a ciertos usuarios especializados (como observatorios astronómicos).

A principios del S.XX la difusión del entonces TU se hacía vía observatorios astronómicos especializados en la observación de los parámetros de rotación de la Tierra. Esos observatorios difundían el TU usando emisiones de radio de onda corta. En España, por ejemplo, el Observatorio Astronómico de Madrid estaba dotado con los telescopios necesarios para realizar ese tipo de observaciones astronómicas y con receptores de radio para captar la emisión de TU. Originalmente esa señal se transmitía vía telégrafo hasta la Puerta del Sol de Madrid, para la sincronización del reloj de la Casa de Correos (hoy sede la Presidencia de la Comunidad de Madrid). En la actualidad las emisoras dedicadas a la difusión del TUC permiten sincronizar relojes con precisiones entre 1 – 0,001 ms. En España sólo el ROA difunde TUC por este procedimiento.

Más adelante las emisoras de radio comerciales empezaron a difundir TU mediante las famosas señales horarias, que en nuestro caso el Observatorio de Madrid transmitía a las emisoras vía telefónica. Este método se sigue empleando hoy en día, aunque la mayoría de las emisoras tienen su

propio patrón de TUC (un receptor GPS), y esta línea telefónica se usa sólo como respaldo.

7.1. La difusión del TUC en la actualidad.

Aunque estos los dos métodos descritos con anterioridad se siguen utilizando en la actualidad, desde los años 90 se han popularizado enormemente nuevos sistemas para la difusión del TUC: la red de navegación GPS e Internet.

El sistema de navegación global norteamericano, GPS por sus siglas en inglés, es hoy en día un método que con relativo bajo coste permite la obtención del TUC con alta precisión. Los satélites que constituyen la red GPS están dotados de relojes de cuarzo de alta estabilidad, que se sincronizan con la red de relojes de cesio de los EE.UU. La hora difundida vía GPS es así un TUC de máxima calidad. No obstante para su uso debe ser corregida por los retrasos que sufre la señal desde el satélite hasta el receptor comercial, y por el hecho de que el satélite orbita alrededor de la Tierra (no está en reposo) y de que la fuerza de la gravedad en esta órbita es menor que en la superficie de la Tierra. Si se tienen en cuenta esos efectos y se calibran los retrasos introducidos por el propio receptor de la señal GPS, se pueden alcanzar exactitudes mejores que 0,000 0001 ms.

De otro lado, las modernas redes de ordenadores permiten intercambiar entre estos la información sobre la marcha de sus relojes internos, que pueden ser comparados con otros de mejor calidad (generalmente receptores GPS dotados de capacidad para comunicarse vía Internet). Para ello se usa el protocolo NTP (network time protocol), que es capaz de compensar de una manera bastante aceptable los retrasos introducidos en la transmisión de los datos por la red. Usando este protocolo, se puede obtener una precisión absoluta mejor que 0.01 s entre ordenadores distantes entre sí, y precisiones relativas (sincronismos) mejores que 0,2 ms para ordenadores situados en una misma red local.

8. CONCLUSIÓN.

La medida precisa del paso del tiempo es un problema casi tan antiguo como la propia humanidad. Los métodos que hemos venido usando a este fin son un fiel reflejo de la evolución de las sociedades, no sólo de su evolución tecnológica sino también de la evolución de la necesidad que se tenía de saber la hora. Aun hoy en día, el método que usamos para decir qué hora

es mantiene unos usos y costumbres a veces ancestrales. Hemos recorrido un largo camino de la mano del Sol, la Luna y las estrellas. En los comienzos estos astros eran usados como patrón, mientras que hoy en día usamos patrones más precisos para medir cómo evolucionamos dentro de nuestro Sistema Solar. No obstante, seguimos aferrados a nuestras viejas costumbres y nos empeñamos en que la las doce del mediodía el Sol luzca en lo más alto del cielo. O casi.

REFERENCIAS

—"Historia del Tiempo: evolución de los relojes y calendarios", Dr. Javier Alcolea Jiménez y Dr. Javier Bussons Gordo (directores), 2008, VI Curso de Astrofísica en Sigüenza, Cursos de Verano de la Universidad de Alcalá de Henares.
—"Reflejo del Cosmos", Dr. Juan Antonio Belmonte Avilés y Dr. Michael Hoskin, 2002, Equipo Sirius S.A.
—"Astronomía megalítica: mitos y realidades", Dr. Juan Antonio Belmonte Avilés, 2006, "Historia de la Astronomía", Dr. Javier Alcolea Jiménez y Dr. Javier Bussons Gordo (directores), IV Curso de Astrofísica en Sigüenza, Cursos de Verano de la Universidad de Alcalá de Henares.
—"The history and practice of ancient Astronomy", por Dr. James Evans, 1998, Oxford University Press.
—"Los calendarios de de la Revolución Francesa", Dr. José María de Francisco Olmos, 2011, X Jornadas Científicas sobre Documentación: El calendario y la datación histórica, Universidad Autónoma de Madrid.
—"The Cambridge illustrated history of Astronomy", Dr. Michael Hoskin (editor), 1996, Cambridge University Press.
—"Medida del tiempo", D. Mariano Martín Lorón, 1956, Anuario del Observatorio Astronómico para 1957.
—"El problema de la hora (su estado actual)", D. Mariano Martín Lorón, 1966, Anuario del Observatorio Astronómico para 1967.
—"Las medidas del tiempo en la historia. Calendarios y Relojes", Dr. Fernando Muñoz Box, 2003, Colección Acceso al Saber, Serie Historia de la Ciencia, Universidad de Valladolid.
—Oficina Internacional de Pesos y Medidas (BIPM), http://www.bipm.org
—"España en la hora europea", Dra. María Ruiz Trapero, 2011, X Jornadas Científicas sobre Documentación: El calendario y la datación histórica, Universidad Autónoma de Madrid.
—Servicio Internacional de Rotación Terrestre y Sistemas de Referencia (IERS), http://www.iers.org
—"Medida del tiempo", D. Antonio Vela, 1906, Anuario del Observatorio Astronómico para 1907. Reproducido en 1929, Anuario del Observatorio Astronómico para 1930.
—"La medida del tiempo", Dr. Pablo de Vicente Abad, 2010, Anuario del Observatorio Astronómico para 2011.