

RELOJES SOLARES VS. RELOJES DE PULSO

¿Porqué marcan horas diferentes?

ACHIM M. LOSKE
Instituto de Física, UNAM

Resumen

Generalmente, cuando uno observa un reloj solar y compara la hora que marca con la del reloj de pulso, hay cierta diferencia. La mayoría de las personas adjudican este "error" al mal diseño, a la colocación, en fin, al mal funcionamiento del reloj solar. En este artículo se explica cómo marca la hora un reloj solar, qué tipo de hora marca y a qué se debe la discrepancia anteriormente mencionada. Finalmente se concluye que, en principio, el reloj solar es más preciso que el reloj de pulso y que es capaz de dar bastante más información que únicamente la hora. Las posibilidades de indicación de los relojes solares se ejemplifican con la descripción de las carátulas de un reloj solar ecuatorial.

Introducción

Los relojes solares, como bienes intelectuales de tiempos remotos, siguen gozando de estimación hoy en día. Es sumamente interesante lo que los relojes solares pueden ofrecernos, la sabiduría que albergan y la diversidad de conocimientos astronómicos que se pueden adquirir a través de ellos.

En principio, hay un aspecto en el cual el reloj solar no puede ser superado por ningún otro tipo de reloj, aunque sea un reloj atómico. Todos los cronómetros y aparatos comprendidos bajo el concepto de relojes pueden conservar con mayor o menor precisión, según su sistema, el tiempo sobre el cual se ajustan, pero ninguno puede *determinar* por sí mismo el tiempo. Determinar el tiempo significa conocer

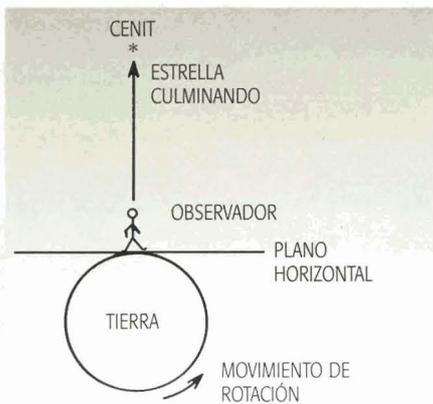


Figura 1. Para un observador parado sobre la Tierra una estrella culmina cuando se encuentra en el cenit, o sea, exactamente sobre la cabeza del observador.

la hora (y fecha) viendo la posición del Sol o de las estrellas sin consultar un reloj convencional. El reloj solar es un instrumento para la determinación del tiempo, lo cual explica por qué los relojes solares siguieron usándose todavía hasta fines del siglo XIX, a pesar de la existencia de relojes mecánicos. Otra característica de los relojes solares es que no sólo pueden indicar la hora, sino también la fecha. El diseño de carátulas de relojes solares con indicación de fecha y diferentes tipos de hora es una verdadera ciencia y puede llegar a ser muy complejo.

La ciencia de los relojes solares, denominada *gnomónica* (*gnomos* significa indicador, en griego) ha perdurado a través de varias épocas. A las antiguas leyes de la gnomónica, de las que nos hablan Vitruvio y Ptolomeo en sus escritos, les siguió una gnomónica que podría llamarse “moderna” la que a su vez ha experimentado hasta hoy en día una gran variedad de cambios. De los escritos antiguos sobre gnomónica muy pocos son veraces. Entre los pocos correctos y con valor científico pueden destacarse las obras de Apian, Benedicto, Schoner y Calvias.^{1,2} Los fundamentos matemáticos de la gnomónica aparecieron en 1925 en un libro de Joseph Drecker.³ Partiendo de los conocimientos de Vitruvio y Ptolomeo, Drecker hizo los cálculos necesarios para construir todo tipo de reloj solar. A mediados de los años cincuenta, Lothar M. Loske amplió estos conocimientos, diseñando carátulas de relojes solares con múltiples indi-

caciones, incluyendo los diferentes tipos de hora que se describirán más adelante.⁴ La lectura de estas obras requiere de una sólida preparación astronómica-matemática.

Generalmente, cuando uno descubre un reloj solar en un jardín o en una plaza pública, compara la hora del reloj de pulso con la del reloj solar. Con decepción, frecuentemente se descubre que las horas no coinciden, y se culpa al reloj solar de dicha discrepancia.

Para comprender a qué se debe la diferencia de la hora que marca un reloj solar con respecto a la del reloj de pulso, es indispensable definir algunos conceptos básicos en relación con la medición y determinación del tiempo. Hoy en día se manejan esencialmente cinco tipos de hora, que a pesar de ser diferentes, están relacionados entre sí: 1) la *hora sideral*, 2) la *hora solar verdadera*, 3) la *hora solar media*, 4) la *hora normal*, *zonal*, *local* o *legal* y 5) la *hora universal*, *mundial* o de *Greenwich*.⁵

La hora sideral

La *hora sideral* generalmente es usada por los astrónomos. Como su nombre lo indica, se refiere al aparente movimiento de las estrellas en el firmamento. Un día sideral se define como el tiempo que transcurre entre dos *culminaciones* consecutivas de una estrella fija. Se dice que un astro *culmina*, cuando se encuentra en el cenit, esto es, cuando está exactamente arriba de nosotros (figura 1). Por definición, una estrella fija es una estrella sumamente lejana. Debido a la enorme distancia a la que se encuentra, parece estar fija. Si en la figura 1 el observador se hubiera dibujado a escala, su tamaño se habría reducido a un punto del orden de 4.5 micras. ¡En esa escala, la estrella fija debería haberse dibujado por lo menos a unos 200 mil km del observador! Si el observador puede determinar el instante en el cual la estrella aparece en el zenit, únicamente tendría que esperar a que este suceso se repita y habrá

transcurrido un día sideral. Para este fin existen instrumentos especiales parecidos a un telescopio. La hora, el minuto y el segundo sideral se definen como el día sideral dividido entre 24, 24 x 60 y 24 x 3600, respectivamente. (En rigor, la hora sideral se define en relación con un punto imaginario en el cielo, denominado equinoccio vernal o punto equinoccial de primavera.⁴)

La hora solar verdadera

Análogamente al día sideral, el día *solar verdadero* es el tiempo que transcurre entre dos culminaciones consecutivas del Sol. Debido a que la distancia de la Tierra al Sol es varios órdenes de magnitud menor que la de la Tierra a una estrella fija, el día solar, tiene una duración diferente (más larga) que el día sideral. Esto puede apreciarse en la figura 2. Para un observador que se encuentra en la posición 1 el Sol se encuentra culminando.

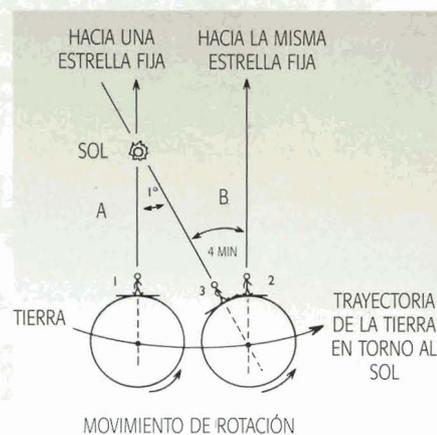


Figura 2. El tiempo que requiere un observador en pasar del punto 1 al 2 (tiempo entre dos culminaciones consecutivas de una estrella fija) es equivalente a un día sideral. El tiempo que le toma al observador pasar del punto 1 al 3 se define como día solar verdadero (tiempo entre dos culminaciones consecutivas del Sol). El día solar verdadero es 4 minutos más largo que el sideral.

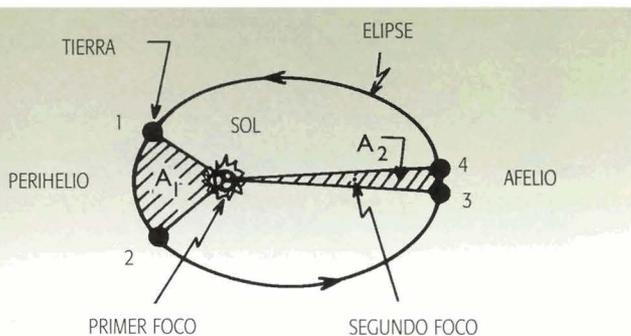


Figura 3. La Tierra gira alrededor del Sol describiendo una trayectoria elíptica. Si A_1 y A_2 son áreas iguales, la Tierra requiere del mismo tiempo para pasar del punto 1 al 2 que del 3 al 4, motivo por el cual debe trasladarse más rápido en el perihelio que en el afelio. Esta variación de la velocidad de traslación de la Tierra origina que los días solares verdaderos no sean constantes en duración.

Si pensamos en una estrella fija que está justamente en esa dirección, ella también estará culminando. Debido a la distancia tan grande a la que se encuentra la estrella, no se ha dibujado en la figura 2. Después de un día sideral la Tierra habrá girado 360° en torno a un eje imaginario que pasa por los polos norte y sur geográficos y el observador se encontrará en la posición 2. Nótese que el observador, además de haber girado 360° con respecto al eje de rotación de la Tierra, también se ha desplazado cierta distancia debido al movimiento de traslación de la Tierra en torno al Sol. Debido a la gran distancia a la cual se encuentra la estrella fija, las líneas A y B deben dibujarse prácticamente paralelas. Ahora bien, para que se complete el día solar verdadero, el observador tendrá que esperar hasta que el Sol se encuentre en el cenit, esto es, deberá esperar hasta que llegue a la posición 3. El día solar verdadero es aproximadamente cuatro minutos más largo que el sideral.

Lamentablemente, la hora solar verdadera es variable (puede llegar a variar del orden de 16 min en un día), motivo por el cual su uso en la vida cotidiana no es práctico. Esto se debe a que la velocidad (de traslación) con la cual la Tierra gira alrededor del Sol *no es constante*. Como es sabido, la Tierra gira en torno al Sol describiendo una *elipse*. La velocidad de traslación varía cumpliendo la segunda ley de Kepler. Únicamente así la Tierra puede describir la trayectoria mencionada. Si dicha trayectoria fuera una circunferencia con el Sol en su centro, en-

tonces la Tierra giraría con velocidad constante alrededor de él. La segunda ley de Kepler establece que la línea imaginaria que une al Sol (que se encuentra en uno de los dos focos de la elipse) con la Tierra barre áreas iguales en tiempos iguales (figura 3). Esto significa que si las áreas A_1 y A_2 son equivalentes, entonces la Tierra pasa del punto 1 al 2 en el mismo tiempo que del punto 3 al 4, recorriendo sin embargo distancias diferentes. Debido a que la distancia del punto 1 al 2 sobre la trayectoria elíptica es mayor que la distancia de 3 a 4, la velocidad cerca del *afelio* (punto más lejano al Sol) es menor que en el *perihelio* (punto más cercano al Sol). Como ya se mencionó, la consecuencia de esto es que los días solares verdaderos, a diferencia de los siderales, no son constantes, esto es, no duran el mismo tiempo. Cuando la Tierra se encuentra cerca del perihelio se mueve más rápido sobre su trayectoria elíptica y, aunque su velocidad de rotación no varía, el día solar verdadero es más largo que cuando la Tierra está cerca del afelio.

La hora solar media

Ninguno de los dos días anteriormente mencionados es práctico para nuestra vida cotidiana. El sideral, por estar referido a las estrellas, no es conveniente, ya que preferimos ajustar nuestros

días y horas según el comportamiento del Sol y no en relación con la culminación de una estrella fija. El solar verdadero no es práctico para nuestro quehacer cotidiano debido a que, como se explicó anteriormente, su duración es variable. Esto trae como consecuencia que las horas solares verdaderas en una estación no duren lo mismo que en otra estación del año. De hecho, las horas de cada día serían un poco diferentes a las del día anterior. Así por ejemplo, el tiempo (hora solar verdadera) que transcurre de las 9 a las 10 de la noche el 26 de abril no es el mismo que transcurre entre las 9 y las 10 de la noche del 21 de febrero. Sería complejo diseñar y construir (aunque es posible) relojes en los cuales las horas varían de duración continuamente, pero más que un problema técnico, es un problema práctico. Así por ejemplo, un partido de polo acuático que dura cuatro períodos de 7 minutos sería más largo en una época del año que en otra. Un atleta que completa el maratón en 2 horas con 7 minutos tendría que anotar la fecha junto a su marca para posteriormente poder hacer una conversión y comparar este tiempo con

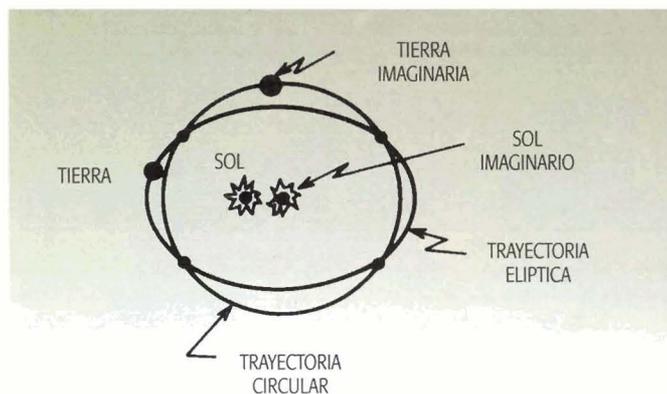


Figura 4. El día solar medio se define suponiendo que la Tierra gira en torno al Sol sobre una circunferencia. Cuatro días al año, las trayectorias se intersectan y el día solar verdadero tiene la misma duración que el medio.

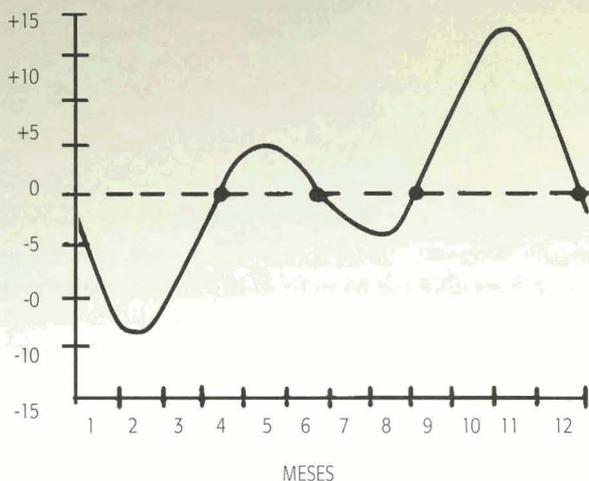


Figura 5. La diferencia entre el día solar verdadero y el día solar medio (ecuación del tiempo) varía a lo largo del año, siendo nula cuatro veces al año (cruces con la línea interrumpida).

el de otra marca impuesta por otro (o el mismo) corredor en una fecha diferente. Los itinerarios de los medios de transporte serían muy complicados, el número de horas y minutos que se laboraría en una oficina variaría, etc...

Por este motivo se definió el *día solar medio*. Como su nombre bien lo indica, a diferencia del sol verdadero, éste sí es constante. Se define como el tiempo que transcurriría entre una y otra culminación del Sol, si la Tierra se moviera alrededor del Sol, no so-

adelanta o atrasa con respecto al Sol real en su trayectoria aparente alrededor de nosotros). De esta manera se obtienen días, horas, minutos, segundos, etc. constantes. Obviamente, en general, habrá una diferencia entre la hora solar verdadera y la hora solar media. Esta es precisamente una de las diferencias entre la hora que marca un reloj solar (que se rige según el Sol real) y la hora de nuestro reloj de pulso. Únicamente en cuatro días al año (ver figura 4) la trayectoria circular imaginaria intersecta a la trayectoria elíptica real.

bre una elipse, sino sobre una circunferencia, con el Sol en su centro. La figura 4 muestra a este Sol imaginario colocado en el centro de una trayectoria circular imaginaria sobre la cual gira una Tierra imaginaria. (En rigor, lo que se hace es definir un Sol imaginario que, a lo largo del año se

entre los dos tipos de día mencionados y sobre el eje horizontal se graficó el tiempo. Nótese que en febrero y en noviembre la diferencia entre el día solar verdadero y el medio es máxima (en valor absoluto). En febrero, el día solar verdadero es más largo que el medio; en cambio, en noviembre es más corto que el medio.

La hora normal

Una vez definida la hora solar media, con sus días, horas, minutos y segundos constantes, surgió otro problema, relacionado ya no con la velocidad variable de la Tierra en torno al Sol, sino con la rotación de la Tierra alrededor de su eje de rotación. Debido a que la Tierra gira continuamente sobre su propio eje, la hora depende de la posición en la cual se encuentra una persona. En la figura 6 se tiene un esquema de la Tierra con sus meridianos y paralelos, que, como se sabe, son líneas imaginarias para dividir nuestro planeta en secciones. Supongamos que un observador se encuentra sobre el ecuador en el sitio marcado con el número 2 y que el Sol para él se encuentra justamente en el zenit, de manera que es el mediodía *astronómico*. (Se define como mediodía astronómico el instante en el cual el Sol se encuentra en el zenit). Por los motivos anteriormente descritos, el mediodía astronómico generalmente difiere del mediodía que marcan nuestros relojes convencionales. Si la Tierra gira de oeste a este, entonces para una persona parada en la posición 1 aún falta cierto tiempo (una hora) para que sea mediodía, mientras que para un observador en 3 el mediodía ya pasó (hace una hora). Para todos los lugares sobre el mismo meridiano es la misma hora. Ejemplo de ello son los puntos 2, 4 y 5, en los cuales es la misma hora (mediodía astronómico).

En esos días (15 de abril, 15 de junio, 1° de septiembre y 25 de diciembre) el día solar verdadero y el día solar medio tienen la misma duración. La diferencia (variable) que surge entre los días verdaderos y los medios se denomina *equatio temporis* o "ecuación del tiempo". En la figura 5 se muestra graficada la ecuación del tiempo. Sobre el eje vertical se graficó la diferencia

El Sol (aparentemente) recorre los cielos de oriente hacia occidente y, por lo tanto, un observador situado al oriente de otro verá el Sol pasar antes sobre su cabeza. En

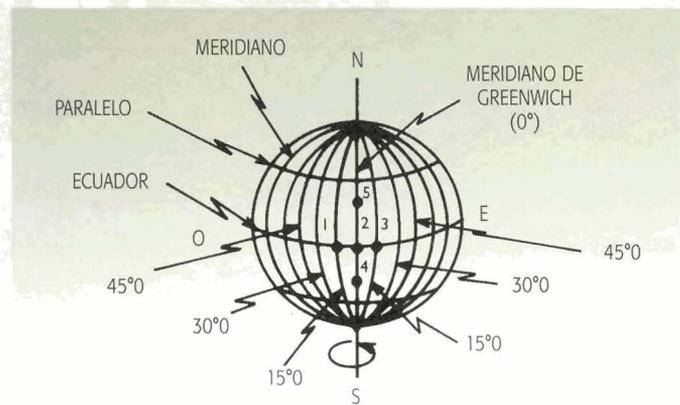


Figura 6. La hora en algún sitio sobre la Tierra depende de la posición. Si para una persona en el punto 2 es mediodía, entonces en 1 aún falta una hora para el mediodía y en 3, el mediodía ya pasó una hora antes. Los sitios que se encuentran sobre un mismo meridiano (puntos 2, 4 y 5) tienen la misma hora.

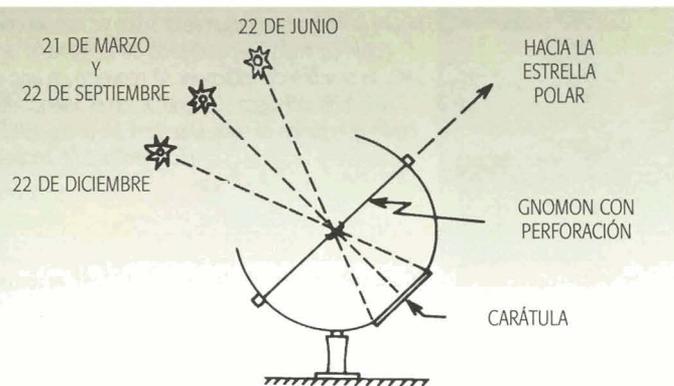


Figura 7. Esquema de un reloj solar ecuatorial. El rayo de luz que pasa por un pequeño orificio en el centro del indicador es proyectado sobre la carátula, cambiando su posición conforme el Sol cambia de inclinación a lo largo del año.

rigor, en Veracruz es mediodía unos 30 minutos antes que en Guadalajara y, así, los relojes del puerto debieran estar adelantados media hora respecto de los de Jalisco. Esto no es así, ya que desde el siglo pasado resultó impráctico que dos ciudades a unos cuantos cientos de kilómetros de distancia mantuvieran horas distintas. El problema se solucionó con un acuerdo internacional en 1883, imponiendo en una zona muy grande una misma hora, denominada hora *normal* o *legal*. A finales del siglo pasado se dividió el mundo en 24 zonas, eligiéndose como meridianos determinantes de la hora legal los meridianos 15°, 30°, 45°, 60° y así sucesivamente, hasta 180° al este y al oeste del observatorio de Greenwich (Royal Greenwich Observatory), Inglaterra, por donde pasa el meridiano cero. Entre una zona y la inmediata existe una diferencia de una hora. Por razones prácticas, estas líneas que dividen zonas con horas diferentes se ajustaron a las fronteras políticas y a las condiciones geográficas, de manera que no se dieran casos en los cuales, por ejemplo, una isla muy pequeña situada alrededor de un meridiano tuviera dos horas diferentes. Es interesante mencionar, por ejemplo, el caso de Alaska, que antes de 1983 cubría cuatro zonas diferentes. Con la modificación de varias líneas o fronteras zonales se logró que casi toda Alaska cayera dentro de una única zona.

Cabe mencionar la hora denominada de verano, introducida en los países europeos durante la Primera Guerra Mundial, y que consiste en adelantar arbitrariamente la hora legal para aprovechar al máximo la luz del día durante el verano.

uso de una hora *mundial* (o como la llaman los astrónomos, *universal*), válida en todo el mundo, independientemente del lugar en el que se esté. Esto significa que si son las 21:45 horas, hora mundial, serán las 21:45 horas (hora mundial) en la Ciudad de México, en Tokio, en Zurich, en Nueva York o en cualquier otro sitio sobre el planeta. Por definición, el meridiano que rige la hora mundial es el meridiano de Greenwich (0°), motivo por el cual la hora mundial frecuentemente se denomina con la siglas GMT que significan "Greenwich Mean Time", o sea, hora media de Greenwich. En principio la elección del meridiano cero o meridiano de Greenwich como referencia para la hora mundial es arbitraria en el sentido de que bien podría haberse seleccionado cualquier otro meridiano. Si en el meridiano de Greenwich son las 12 horas, entonces en el lado

La hora mundial o universal

Para algunas aplicaciones, como por ejemplo la navegación, las comunicaciones y la meteorología, es preferible el

opuesto del planeta (meridiano 180°) es medianoche y se está pasando de un día a otro. Por este motivo el meridiano 180° es el límite de fecha de la hora mundial.

Possibilidades de indicación de un reloj solar

En principio, con un reloj solar es posible *determinar* todos los tipos de hora mencionados anteriormente, aunque obviamente dependerá de la complejidad de la carátula que posea y del tipo de reloj solar. Casi todos los relojes solares diseñados después del siglo XV

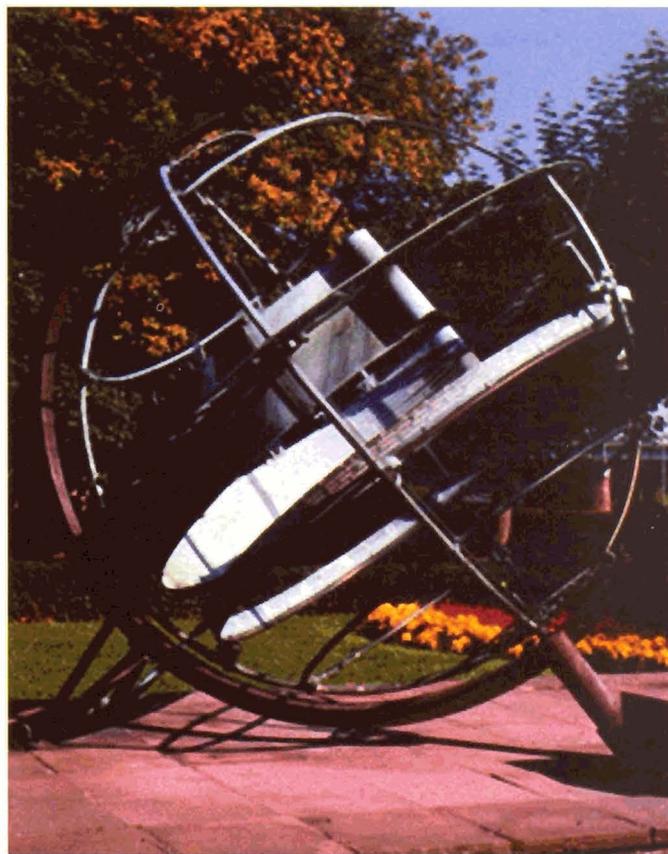


Figura 8. Fotografía del "Horologium Solarium Esfericum". Nótese la sombra de la estrella indicadora con la mancha de luz en su centro. (Fotografía: L.M. Loske).



Figura 9. Fotografía de un reloj solar ecuatorial con doble carátula. Dependiendo de la estación del año, la sombra del indicador se proyecta en uno u otro lado del disco suspendido en el interior del anillo que rodea al reloj. Diseño: L.M. Loske 1985. (Fotografía: L.M. Loske).

tienen su indicador orientado paralelamente al eje de rotación imaginario de la Tierra. Como ya se mencionó, a ellos se les denomina “modernos”. Según la orientación de la carátula con respecto al indicador se dividen principalmente en tres grupos: horizontales, verticales y ecuatoriales. El hecho de que se trate de un reloj solar moderno no implica que en él se puedan leer todos los tipos de hora que se discutieron aquí, ya que la mayoría de ellos fueron diseñados cuando aún no se habían definido los términos y las horas en la forma que aquí se ha explicado. Algunos relojes solares diseñados a partir de mediados de este siglo, tienen carátulas adecuadas y suficientemente complejas para determinar, no únicamente todos los tipos de hora mencionados, sino también las estaciones del año y la fecha, entre otras cosas.^{1,2,4} A pesar de esto, la mayoría de los relojes solares únicamente marcan la hora solar verdadera, que difiere de la hora que marcan nuestros relojes de pulso, excepto para lugares y días muy particulares. En muchos casos esta diferencia es hasta de media hora y de ninguna manera debe opinarse que uno de los dos relojes “camina” mal, simplemente indican otro tipo de hora. Teóricamente, el reloj de sol es infalible, ya que su *órgano regulador* es la rotación de la Tierra sobre su propio eje. Un reloj solar bien diseñado nunca se adelantará o atrasará y un día nublado no deberá ser motivo de preocupación, ya que al despejarse el cielo, la posición del Sol inmediatamente determinará la hora exacta.

Algunos relojes solares indican, además de diferentes tipos de hora, la fecha. Según la fecha, la trayectoria del Sol por el cielo tiene una inclinación determinada con respecto al horizonte. Así por ejemplo, si se hace una pequeña perforación a la mitad del indicador de un reloj ecuatorial con carátula paralela al indicador como se muestra en forma simplificada en la figura 7, es posible proyectar un pequeño punto luminoso sobre la carátula. El recorrido de este punto sobre la carátula variará de día en día, dando información acerca del ángulo de elevación del Sol sobre el horizonte sur. Todos sabemos que en el hemisferio norte, la altura de la trayectoria aparente del Sol sobre ese horizonte es menor durante el invierno que en el verano. Justamente el 22 de diciembre, en el solsticio de invierno, dicha altura es mínima, alcanzando por lo tanto el punto luminoso su posición más alta sobre la carátula del reloj. El 22 de junio, en el solsticio de verano, cuando el Sol presenta su máxima elevación, el punto de luz se desplazará junto al borde inferior de la carátula. Aprovechando este principio, sobre una carátula adecuadamente graduada podrá determinarse la fecha.

Las carátulas del “Horologium Solarium Esfericum”

Para mostrar las posibilidades de indicación de un reloj solar se ha seleccionado como ejemplo el “Horologium Solarium Esfericum”

(figura 8). Se trata de un reloj solar ecuatorial diseñado en 1982 por Lothar M. Loske. Fabricado en acero cobrizado y latón dorado, es uno de los relojes solares más completos de su categoría.⁶ De sus dos carátulas pueden obtenerse las horas solar verdadera, solar media y normal o legal de todo el mundo, así como la hora universal y la fecha (aproximadamente). Gracias a su diseño, es posible instalarlo en cualquier sitio del hemisferio norte. Actualmente existen dos ejemplares en el mundo. Uno de ellos se encuentra en el Centro de Ciencias de Sinaloa, en Culiacán, Sinaloa. El otro se instalará a fines del presente año en el Salón de Ciencias Físico-Matemáticas en Dresden, Alemania.

Por tratarse de un reloj solar moderno, su indicador (varilla delgada que atraviesa la esfera anular de polo a polo) es paralelo al eje de rotación de la Tierra, consecuentemente apuntando hacia la Estrella Polar. En esta clase de reloj (ecuatorial) el indicador y la carátula pueden formar un ángulo recto entre sí, o bien ser paralelos. El primer caso, el del reloj ecuatorial con carátula perpendicular al indicador (ver figura 9), requiere de hecho de dos carátulas, una orientada hacia el sur y la otra, hacia el norte. Dependiendo de la estación del año, o sea de la inclinación del Sol sobre el horizonte, la sombra se proyecta sobre una u otra carátula. En el segundo tipo (figura 8) la carátula generalmente es una cinta metálica que rodea parcialmente al indicador, y es paralela a él.

La disposición esférica a base de anillos del “Horologium Solarium Esfericum”, semejante a las antiguas esferas similares usadas para determinar la posición de las estrellas, le proporciona un hermoso aspecto y lo convierte en un bello monumento.

La carátula principal del “Horologium Solarium Esfericum”

En la figura 10 aparece una fotografía de la

parte central de la carátula principal del “Horologium Solarium Esfericum”, que tiene divisiones para indicar la hora desde las 6 de la mañana (lado izquierdo) hasta las 6 de la tarde (lado derecho). La sombra del indicador, que en este caso es la estrella suspendida en el centro de la esfera anular por la varilla dorada que va de un extremo del reloj al otro (ver figura 8), es proyectada sobre la carátula principal, marcando la hora y la fecha.

En sus extremos, la carátula principal tiene marcas cada media hora. En cambio, en la parte central, entre las 10:30 AM y la 1:30 PM (figura 10), está provista con divisiones de 5 minutos, de manera que es posible determinar la hora con una precisión de ± 2 minutos con 30 segundos. La hora se determina observando ya sea la sombra de la varilla indicadora sobre la carátula o la mancha luminosa que se proyecta dentro de la sombra que forma la estrella. Dicha mancha luminosa se produce por la luz que pasa por una abertura que tiene la estrella en su centro y puede apreciarse en la figura 8. En el lado izquierdo de la carátula, junto al número ocho, el diseñador dibujó la proyección de dicha estrella sobre la carátula, más como consecuencia del diseño artístico, que como requisito para determinar la hora. Como ya se mencionó, la hora normal o legal del reloj de pulso varía con respecto a la que marca el reloj solar. Las variaciones dependen de la fecha y están representadas por las curvas con forma de ocho que rodean a los tres números centrales. Estas curvas se llaman “analemas” (*ana*, de arriba; *lema*, tomar). Únicamente el 15 de abril, el 15 de junio, el 1° de septiembre y el 25 de diciembre, la hora que marca el reloj solar y la que marca el reloj de pulso coinciden. Puede observarse que la diferencia entre la hora legal y la solar verdadera es máxima en febrero (+ 14 min 20 seg) y en noviembre (16 min 22 seg). Más adelante se describirá con más detalle cómo debe leerse la hora.

Entre las once de la mañana y la una de



Figura 10. Acercamiento de la carátula principal del “Horologium Solarium Esfericum”. (Fotografía: A. Sánchez).

la tarde se puede determinar la fecha aproximadamente. Como ya se mencionó, debido a las variaciones de la inclinación de la trayectoria aparente del Sol sobre el horizonte, la sombra del indicador (y con ello la proyección de la mancha luminosa) sube y baja sobre la carátula a lo largo del año (figura 7). Cuando los relojes de pulso marcan las 12 horas, la mancha luminosa se encontrará en algún sitio sobre el analema que rodea al número 12. Si se encuentra sobre la sección roja será primavera (22 de marzo al 21 de junio). La curva verde se refiere al verano (22 de junio al 22 de septiembre), la amarilla al otoño (23 de septiembre al 21 de diciembre) y la azul al invierno (22 de diciembre al 21 de marzo). Los signos del zodiaco dibujados sobre el analema son decorativos y ayudan a determinar el mes. De ninguna manera se pretendió crear una relación con la astrología. La curva de la primavera comienza con el signo de aries. Junto a

él se muestra la fecha de uno de los equinoccios (21 de marzo) que son los momentos del año en que los días y las noches tienen la misma duración, esto es, cuando los polos de la Tierra se encuentran a igual distancia del Sol. Siguiendo la curva roja de la primavera hacia abajo, se tienen los signos de tauro y géminis. En la parte inferior se distingue el signo de cáncer, perteneciente a la curva verde de verano. Junto a él se indica la fecha del solsticio de verano (22 de junio), que es el momento en que el Sol se encuentra más lejos del ecuador. Continuando ahora sobre la curva verde hacia arriba, aparecen los signos de leo y virgo. En la parte central comienza el otoño (curva amarilla), con el signo de libra. A un lado de este signo aparece la fecha del otro equinoccio (23 de septiembre). Al transcurrir el otoño la mancha luminosa se desplaza sobre la curva amarilla hacia arriba, pasando por los signos de escorpión y sagitario. En la parte más alta de la carátula

aparece la fecha del *solsticio de invierno* (22 de diciembre) junto al signo de capricornio, perteneciente a la curva azul que corresponde al invierno. Finalmente, siguiendo la curva azul se pasa por los signos de acuario y piscis hasta completar el año. Los analemas en torno a los números 11 y 1 tienen la misma función, de manera que la fecha puede determinarse ya sea a las once, a las doce o a la una de la tarde. Así por ejemplo, el 21 de febrero, cuando el reloj de pulso marque las 12 horas, el punto luminoso estará situado en el círculo correspondiente a piscis. A las once horas (hora normal) ese día estará sobre el círculo que se encuentra a la izquierda del número once, a la altura del signo de piscis.

La carátula principal puede girarse, de manera que el reloj indique la hora solar verdadera del sitio de colocación, sin embargo, es conveniente que la carátula se ajuste para indicar la hora solar verdadera del meridiano que determina la hora normal en el sitio de colocación. Así, con los analemas puede obtenerse la hora legal haciendo el ajuste correspondiente a la ecuación del tiempo. El hecho de que la carátula principal del reloj sea móvil, permite instalarlo en cualquier parte del mundo que se encuentre en el hemisferio norte.

La carátula universal del "Horologium Solarium Esfericum"

La carátula universal permite determinar la hora solar verdadera de cualquier parte del mundo, y en combinación con la carátula principal se puede deducir la hora solar media y la hora local del sitio de interés. Para ello se requiere conocer la posición geográfica de la ciudad o región del mundo de la que se desea saber la hora. Esta carátula universal está formada por dos carátulas montadas, una sobre el exterior y la otra sobre el interior del anillo cobrizado colocado en la parte inferior de la esfera anular (ver figura

8). El anillo es libre de girar en torno al indicador. En la parte exterior se tiene la carátula con todos los meridianos del mundo. La graduación crece desde 0° (GMT) hasta 180° ("Date Line") y posteriormente decrece hasta llegar nuevamente al meridiano cero. En la parte interior del anillo, una vez que éste se ha girado hasta la posición adecuada, la sombra del indicador marca la hora solar verdadera del sitio de interés.

¿Cómo determinar la hora y la fecha?

Para determinar la hora en un reloj solar, es necesario conocer la fecha (lo cual puede hacerse con el mismo reloj), debido a que, como ya se explicó, dependiendo de la fecha, el reloj de sol se adelanta o atrasa con respecto al reloj de pulso en mayor o menor medida. El analema en torno al número 12 nos indica cuántos minutos se deben restar o sumar a la hora que indica el reloj solar para obtener la hora legal del reloj de pulso. Localizando sobre el analema el sitio correspondiente a la fecha actual, se calcula la separación (en minutos) desde el punto mencionado hasta la línea del mediodía (número 12). Si el punto quedó del lado izquierdo (derecho) de la línea del mediodía, se deberá sumar (restar) esa cantidad en minutos a la hora que marca el reloj solar, para obtener así la hora legal. Del analema, puede deducirse que existen cuatro días al año en los cuales no hay diferencia entre la hora legal y la que marca el reloj de sol, esto es, para esos días no hay separación entre la línea del mediodía y el punto correspondiente sobre el analema. Así por ejemplo, el 21 de febrero habrá que sumar aproximadamente 13 minutos a la hora que marca el reloj de sol para obtener la hora legal (ver figura 10). Eso significa que a las 12 horas (hora legal) la mancha luminosa se encuentra exactamente sobre el signo de piscis, indicando que la hora solar verdadera del meridiano que corresponde al sitio de colocación es 11 horas con 47 minutos.

Para determinar la fecha, es necesario esperar hasta que la mancha luminosa esté en la región analema de la carátula (entre las once horas y la una de la tarde). Si se conoce la estación del año, únicamente habrá que esperar hasta que la mancha pase por la sección del analema correspondiente a esa estación y se sabrá la fecha aproximadamente. En el caso poco probable de que no se conozca la estación del año, habrá dos fechas posibles, esto es, la mancha luminosa cruzará el analema en dos puntos, uno antes y otro después del número 12 (o de los números 11 o 1). Para saber cuál de esas dos fechas es la correcta, habrá que esperar varios días y observar la dirección del movimiento de la mancha sobre el analema.

Para determinar la hora solar verdadera de cualquier parte del mundo, tendrá que conocerse la longitud del lugar de interés. En la parte exterior del anillo se tiene una escala con todas las longitudes del mundo. Girando el anillo y haciendo coincidir un pequeño indicador (ver figura 8) montado en el soporte superior del anillo, con la longitud deseada, podrá obtenerse la hora solar verdadera en la ciudad de interés observando la sombra del indicador sobre la carátula inferior e interior del anillo. La carátula interior tiene graduaciones del 1 al 24, de manera que es posible saber si es de día o de noche en el lugar geográfico consultado. La hora solar media o la hora local del sitio de interés pueden deducirse tal y como se hace para el sitio donde se encuentra colocado el reloj.

Conclusiones

A diferencia de lo que comúnmente se piensa, los relojes solares tienen ventajas sobre nuestros modernos relojes mecánicos y electrónicos. Un reloj solar no únicamente es un "guardatiempo" que conserva la hora que hemos ajustado. Con él es posible *determinar* la hora y la fecha. Suponiendo que por una extraña causa todos los relojes mecánicos, eléc-

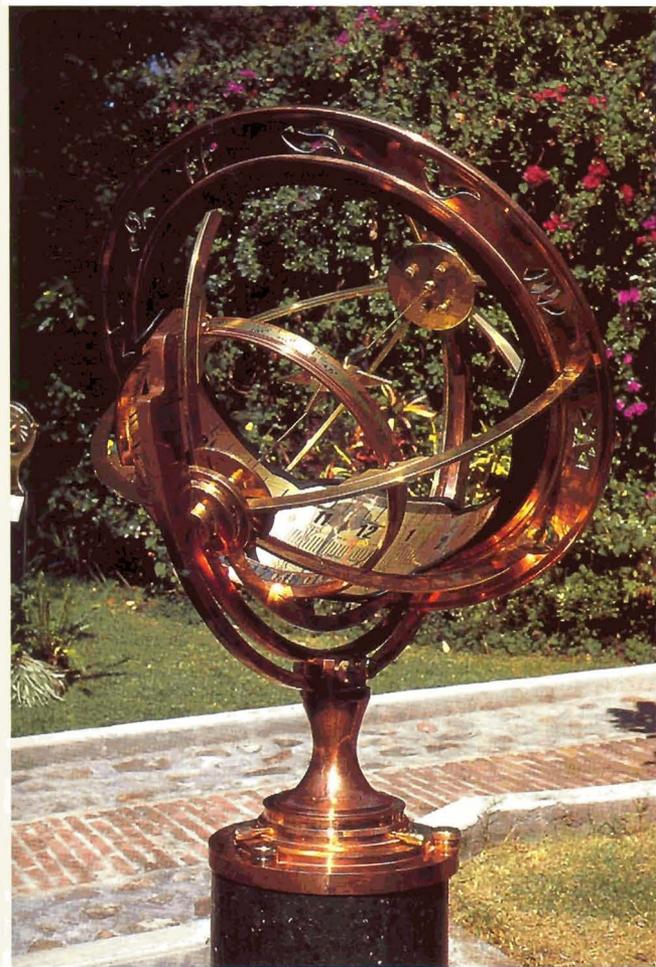


Figura 11. Fotografía del reloj solar (ecuatorial) más completo del mundo, instalado en la Ciudad de Frankfurt, Alemania. Diseño: L.M. Loske 1951. (Fotografía: L.M. Loske).

tricos y electrónicos sobre la Tierra se descompusieran, habría únicamente dos formas de determinar nuevamente la hora y la fecha. Una de ellas es observar el cielo con un telescopio especial, la otra, usar un reloj solar.

Además de un instrumento para determinar la hora y la fecha, un reloj solar es un excelente “guardatiempo” debido a que su regulador es la rotación de la Tierra en torno a su eje, que es sumamente constante. La labor de un gran número de astrónomos, iniciada en 1875, ha permitido comprobar que la longitud del día sideral se alarga únicamente unos 0.0014 segundos cada siglo!¹ Esto se debe a que la velocidad de rotación de la Tierra disminuye continuamente debido a dislocaciones y movimientos de masas dentro y sobre el planeta. Además de esto, el eje de rotación

de la Tierra “precesa”, esto es, presenta un pequeñísimo bamboleo similar al que se observa en un trompo, lo cual afecta al movimiento de rotación. Estas variaciones se comprobaron durante los años treinta con ayuda de relojes de cuarzo de alta calidad en la “Physikalisch-Technische Bundesanstalt”, en Braunschweig, Alemania.^{1,2} Hasta 1955, el segundo se definía como una fracción (1/86,400) de un día solar medio. Por las variaciones mencionadas, fue redefinido como una fracción (1/31,556,925.9747) del año solar que comenzó a mediodía del 31 de diciembre de 1899. (El

haber seleccionado la duración de ese año como patrón para el segundo, en principio, fue arbitrario). Hoy en día los astrónomos toman en cuenta estas variaciones, haciendo las correcciones adecuadas con ayuda de tablas (efemérides) muy precisas.

En resumen, se puede decir que teóricamente un reloj solar es más preciso que el mejor de los relojes mecánicos e incluso más preciso que la mayoría de los relojes de cuarzo. En la práctica, la precisión con la cual puede determinarse la hora en un reloj solar depende del tamaño de la carátula. Si el diámetro de una carátula como la descrita aquí fuese de algunos metros, como es el caso en el reloj solar ecuatorial de la ciudad de Frankfurt, Alemania (ver figura 11), sería posible determinar la hora con precisión de segundos. Esto mismo es

válido para la determinación de la fecha exacta.

Son pocos los relojes solares dotados con carátulas que permiten la determinación de las variables mencionadas en este artículo. Sin embargo, debe tenerse en mente que un reloj solar bien diseñado, por muy simple que sea, marcará la hora siempre bien y que la diferencia con respecto a lo que nos “dice” nuestro reloj de pulso se debe exclusivamente a que se trata de dos diferentes tipos de hora. ♦

Bibliografía

1. Loske, L.M. *Ars Temporis, el arte de la medición del tiempo*, México, Colección Editorial de Arte Crysler, 1992.
2. Loske, L. M. *Cronometría: del obelisco al reloj de cuarzo y atómico*, México, Editorial Impulso, 1979.
3. Dreyer, J. *Die Theorie der Sonnenuhren*, Munchen, F. Bruckmann Verlag, 1925.
4. Loske, L.M. *Die Sonnenuhren* Berlín, Springer-Verlag, 2a. edición 1970.
5. Loske, L.M. *Vom Schaffenstab zur Weltzeituhr*, Munchen, Wilhelm Andermann Verlag, 1956.
6. Loske, A. M. *Descripción del funcionamiento e interpretación de las carátulas del reloj solar ecuatorial “Horologium Solarium Esfericum” del Centro de Ciencias de Sinaloa*, Reporte Interno, Instituto de Física, UNAM, 1995.

El autor desea agradecer a Ana María Rueda y a Luis Enrique Prieto la cuidadosa revisión del manuscrito, así como sus comentarios y sugerencias.