

LOS AÑOS BISIESTOS

Casi todo el mundo sabe¹ que La Tierra es redonda y que da vueltas alrededor del Sol y alrededor de sí misma². El tiempo que tarda en dar una vuelta alrededor del Sol lo denominamos año y el que tarda en darla alrededor de sí misma lo llamamos día³.

Para poder medir con exactitud la duración de un día, es necesario tomar una referencia externa, que puede ser una estrella o el propio Sol⁴. Pues bien, dependiendo de la referencia que tomemos la duración del día será diferente.

Si se toma como referencia una estrella fija⁵ y cronometramos el tiempo transcurrido entre dos pasos consecutivos de dicha estrella por encima de nuestra cabeza (es lo que se llama el meridiano del lugar) estaremos midiendo el tiempo correspondiente al día sideral o sidéreo.

Si en lugar de tomar una estrella lejana⁶ como referencia para medir el tiempo que dura un día, hubiésemos tomado el Sol y seguimos el mismo proceso, es decir ponemos el

¹ Mi hija Ana, de cuatro años, aunque ya sabe que la Tierra “es redonda como una bola y da vueltas”, todavía ignora los principios de la mecánica celeste, no obstante crece sana y vive feliz. A ella está dedicado este escrito.

² Además de los consabidos movimientos de rotación y de traslación, el eje de la Tierra tiene otros dos movimientos menos conocidos, el de precesión y el de nutación, con lo que realmente son cuatro los movimientos del eje de la Tierra. El movimiento de precesión es el que describe el eje de la Tierra deslizándose sobre la superficie de un cono imaginario con un periodo de 26.000 años. Este movimiento es el culpable de la precesión de los equinoccios, de donde recibe el nombre, haciendo que el punto vernal o primer punto de Aries, que veremos más adelante, se desplace 50,26’’ cada año en sentido contrario al de la traslación. El movimiento de nutación hace que el polo celeste describa un elipse cuyos ejes mayor y menor miden 18,42’’ y 13,72’’ respectivamente, con un periodo de 18,61 años. Este movimiento se manifiesta en pequeñas oscilaciones del eje terrestre alrededor de su posición media, superponiéndose al de precesión.

³ El día fue la primera unidad de tiempo empleada por el hombre, impuesta de forma natural por la constante sucesión de luz y oscuridad.

⁴ La Luna o los planetas no nos sirven como referencias externas, ya que sería necesario eliminar de sus movimientos aparentes los debidos a la propia Tierra, lo que resulta muy laborioso y muy complicado. Precisamente una de las principales dificultades que tenía el sistema geocéntrico de Ptolomeo era explicar los movimientos tan extraños que tenían los planetas si, como se suponía entonces, estos giraban alrededor de la Tierra. Vistos desde la Tierra, los demás planetas describen unas curvas parecidas a las epicicloides.

⁵ En realidad ninguna estrella está fija en el firmamento, pero las estrellas muy lejanas tienen movimientos que para ser percibidos desde la Tierra es necesario que transcurran miles de años, por lo que no hay ningún inconveniente en considerarlas fijas.

⁶ La estrella más próxima a nosotros, aparte del Sol naturalmente, es Alfa Centauri y se encuentra aproximadamente a 4,40 años luz, es decir la distancia que recorre la luz en cuatro años. Teniendo en cuenta que esta viaja a una velocidad aproximada de 300.000 Km/sg, la estrella más próxima resulta que está bastante lejos. Sin embargo esta distancia tan tremenda no es suficiente para poderla considerar como fija ya que exhibe un movimiento propio de 3,68’’ por año. Este movimiento supone que necesita algo más de 500 años para desplazarse una distancia equivalente al diámetro aparente de la Luna. La estrella más rápida que se conoce actualmente es la Estrella de Barnard, cuyo movimiento propio es de 10,30’’, o lo que es lo mismo, necesita aproximadamente unos 180 años para el mismo desplazamiento. Las estrellas que se pueden considerar fijas están a distancias de miles de años luz.

cronómetro en marcha en el momento en el que el Sol pasa por el meridiano del lugar y lo paramos cuando el Sol vuelve a pasar por encima de nosotros, no mediremos el mismo tiempo que en el caso anterior, porque la Tierra, al desplazarse sobre su órbita, habrá dejado atrás al Sol y por tanto, a la visual que antes se dirigía hacia este, le faltará recorrer el pequeño ángulo de desfase provocado por el propio desplazamiento de la Tierra sobre su órbita⁷. Este día se llama día solar verdadero.

Antes de continuar, es necesario hacer un pequeño paréntesis para explicar las leyes que rigen los movimientos de los planetas, enunciadas por Johannes Kepler (1571-1630).

Las leyes de Kepler son tres leyes empíricas deducidas a partir de las observaciones de las posiciones de los planetas, especialmente de las que hiciera Tycho Brahe (1546-1601) de Marte, y compararlas con las calculadas teóricamente mediante los modelos matemáticos de la época⁸.

Aún hoy parece increíble que, de la simple observación⁹, Kepler dedujera estas leyes que, además de sencillas y elegantes, proporcionan unos valores de las posiciones de los planetas que coinciden perfectamente con las observaciones realizadas¹⁰.

Las dos primeras las publicó en 1609, en *Astronomia Nova* y la tercera en 1619, en *Harmonius Mundi*. Estas tres leyes son las siguientes¹¹.

⁷ Este desfase entre el día sidéreo y el día solar verdadero es aproximadamente de 4 minutos.

⁸ El modelo geocéntrico de Ptolomeo (85-165), con la Tierra en el centro, empezó a superarse desde la muerte de Copérnico (1473-1543), cuyo modelo heliocéntrico se abría camino lentamente. Copérnico había retrasado la publicación de su trabajo consciente de que sus ideas podrían acarrearle problemas con la iglesia. Su obra maestra "*De revolutionibus orbium coelestium*" fue publicado el mismo año de su muerte. Y efectivamente ser prudente era una excelente opción como se encargaría de demostrar Galileo (1564-1642) unos años después. Hacia 1610 Galileo dió pruebas irrefutables sobre la validez del modelo Heliocéntrico, como las fases de Venus o los satélites de Júpiter entre otras y se convirtió en uno de sus mayores defensores. En 1616 la iglesia censuró oficialmente las teorías de Copérnico, pero Galileo las siguió defendiendo. La iglesia las calificó de "una insensatez, un absurdo filosófico y formalmente una herejía". Finalmente Galileo fue acusado por la iglesia y tras un larguísimo juicio, en 1633 abjuró de sus ideas bajo amenazas de tortura, "eppur si muove". En 1992 Juan Pablo II pidió perdón, refiriéndose a este asunto, por los errores cometidos en el pasado por los hombres de la iglesia.

El modelo de Copérnico, con el Sol en el centro y todos los planetas, incluida la Tierra, girando alrededor de él en órbitas circulares, encajaba mucho mejor con las observaciones realizadas, aunque no terminaba de coincidir exactamente con tales observaciones. Faltaba el pequeño detalle de sustituir los círculos por elipses. Por fin encajaba todo.

⁹ Hasta 1684, año en el que Isaac Newton (1642-1727) enuncia su famosa ley de gravitación universal, las leyes de Kepler no tuvieron un soporte matemático que demostraran su validez y exactitud.

¹⁰ En este asunto, Mercurio resulta ser una excepción. Las últimas medidas de alta precisión que se han realizado de las posiciones de Mercurio no coinciden exactamente con las calculadas teóricamente. Esto se debe a su gran proximidad al Sol. Si se quieren obtener valores exactos de su posición, no es posible despreciar los efectos relativistas debidos a la enorme gravedad solar a la que está sometido el pobre y pequeño planeta. En este caso debería emplearse la mecánica relativista de Einstein. La mecánica newtoniana no proporciona valores exactos para este planeta, aunque sigue proporcionando valores muy aproximados. El error cometido resulta en realidad despreciable y solo se aprecia cuando se realizan mediciones muy precisas, por lo que generalmente se sigue empleando la sencillez y elegancia del modelo de sir Isaac frente al de don Alberto, mucho más complicado. Podríamos decir que el coste que supone tener resultados absolutamente precisos no compensa la consecuente complicación en los modelos correspondientes, esto me hace recordar las reglas de cálculo.

1.- Los planetas se mueven en órbitas elípticas, en uno de cuyos focos se encuentra el Sol.

2.- El radio vector que une cada planeta con el Sol, barre áreas iguales en tiempos iguales.

3.- La relación entre el cuadrado del periodo orbital de cualquier planeta y el cubo del semieje mayor de su órbita es constante para todos ellos.

Para el tema que nos ocupa es de especial importancia la segunda de las leyes enunciadas ya que cuando el planeta, la Tierra en nuestro caso, se encuentra en el punto más próximo al Sol¹², la velocidad de traslación es máxima, a partir de aquí va disminuyendo hasta encontrarse en el punto más alejado, donde la velocidad es mínima para ir aumentando nuevamente a medida que va acercándose otra vez al Sol.

La consecuencia inmediata de estas leyes es que la duración del día solar verdadero varía ligeramente a lo largo del año, ya que la porción de ángulo debida a la traslación de la Tierra es variable¹³.

En la práctica es necesario dar la misma duración a todos los días para lo cual se ideó un Sol imaginario o medio, considerando que la Tierra describe una órbita circular a velocidad constante y cuyos pasos diarios por el meridiano de referencia se produce a intervalos regulares de 24 horas. Este día se llama día solar medio y se obtiene como promedio de la duración del día solar verdadero sobre un periodo de un año¹⁴.

Para determinar la duración de un año se sigue un proceso algo más complicado, pero antes será necesario aclarar algunos conceptos.

El camino que recorre la Tierra alrededor del Sol, es decir su órbita, se llama eclíptica y está en un plano que, sin demasiada originalidad, se llama plano de la eclíptica¹⁵.

Visto desde la Tierra, esta permanece aparentemente inmóvil y es el Sol el que recorre en un año una órbita propia contra el fondo de estrellas fijas de la bóveda celeste. Por ello se define la eclíptica como la órbita aparente descrita por el centro del Sol en un año, a través de la bóveda celeste.

¹¹ Las leyes de Kepler, enunciadas en principio para los planetas, son válidas también para los satélites que giran alrededor de los planetas. En este caso el planeta alrededor del cual giran es el que ocupa uno de los focos de la elipse.

¹² Este punto se llama afelio, el más alejado se llama perihelio. Para la órbita de la Luna alrededor de la Tierra estos puntos se llaman apogeo y perigeo respectivamente

¹³ La duración del día sidéreo es siempre la misma. Sin embargo de haber considerado este como duración del día, estaríamos acumulando un error de 4 minutos diarios.

¹⁴ La duración del día solar verdadero coincide con la del día solar medio cuatro veces al año, aproximadamente hacia el 15 de abril, 15 de junio, 1 de septiembre y 25 de diciembre.

¹⁵ Los eclipses se producen cuando el Sol y la Luna, en sus movimientos aparentes, se encuentran simultáneamente en este plano, el plano de los eclipses, de aquí le viene el nombre.

El plano de la eclíptica está además inclinado respecto al plano del ecuador celeste, que es el plano que contiene también al ecuador terrestre, un ángulo aproximado de $23^{\circ} 27'$ ¹⁶. Esto se debe a que el eje de la Tierra no es perpendicular al plano de la órbita.

Los puntos en los que la eclíptica corta al plano del ecuador celeste se llaman equinoccios y se trata de dos puntos muy precisos. Cuando la Tierra se sitúa en el primero comienza la primavera y cuando lo hace en el segundo empieza el otoño¹⁷. El punto correspondiente al equinoccio de primavera tiene una importancia especial. Este punto también se llama punto vernal o primer punto de Aries y se representa con la letra griega γ .

Además de estos, existen otros dos puntos singulares en la órbita terrestre. Estos puntos son los que corresponden a las declinaciones¹⁸ máxima y mínima del Sol y se llaman solsticios. En el primero empieza el verano y en el segundo el invierno.

Análogamente a lo que ocurre con la duración del día, también la duración del año depende de la referencia que tomemos.

El intervalo de tiempo empleado por la Tierra para efectuar su recorrido alrededor del Sol, tomando como referencia una estrella fija, se llama año sidereal. Como aparentemente es el Sol el que se mueve contra el fondo de estrellas de la bóveda celeste se define también como el intervalo de tiempo empleado por el Sol para realizar una vuelta completa a la esfera celeste, tomando como referencia una estrella fija.

Si en lugar de tomar como inicio y final del recorrido anual del Sol una estrella fija, se toma como referencia el punto vernal γ , primer punto de Aries o equinoccio de primavera, el tiempo transcurrido entre dos pasos consecutivos del Sol por este punto se llama año trópico y no coincide exactamente con el año sidéreo debido a que el famoso punto γ no es un punto fijo en la esfera celeste.

Si el tiempo que contamos es el transcurrido entre dos pasos consecutivos del Sol (ya sabemos que quien se mueve realmente es la Tierra) por el perigeo, estaremos midiendo la duración del año anomalístico.

La sucesión de las estaciones, se rige por el año trópico por lo cual es este el que nos interesa considerar al establecer un calendario.

Una vez que ya sabemos medir exactamente el tiempo que dura un día solar medio y un año trópico, es decir, el tiempo que tarda la Tierra en dar una vuelta alrededor de sí

¹⁶ La oblicuidad de la eclíptica varía regularmente entre un mínimo de $21^{\circ} 58' 36''$ y un máximo de $24^{\circ} 35' 58''$. Actualmente este ángulo está disminuyendo a razón de $47''$ por siglo.

¹⁷ Por eso los meteorólogos anuncian en las noticias la entrada de las estaciones con una precisión de horas y minutos.

¹⁸ En astronomía se sigue un sistema de coordenadas similar al que se usa en la Tierra, pero en este caso la latitud recibe el nombre de declinación y la longitud se denomina ascensión recta. El ecuador en este caso es el ecuador celeste y el meridiano de referencia es el que pasa por el punto vernal o primer punto de Aries.

misma y alrededor del Sol, sería estupendo que uno fuera múltiplo exacto del otro, con lo que esto se terminaría aquí, pero lamentablemente y como era de esperar no es así.

El año trópico tiene una duración de 365,2422 días medios, es decir en cada año civil de 365 días cometemos un error por defecto de 0,2422 días. Al cabo de cuatro años el error ha sido de 0,9688 días. El error se corrige añadiendo un día al mes de febrero cada cuatro años. De este modo seguimos cometiendo un error, pero lo hemos reducido a 0,0312 días de más cada cuatro años.

Al cabo de 100 años el error cometido es de 0,78 días por exceso. Para compensar este nuevo error los años terminados en 00, aún siendo múltiplos de cuatro, no serán bisiestos.

Ya estamos llegando al final, pero sigue sin terminar de cuadrar el invento, ya que en las cuentas nos faltan 0,22 días cada cien años. Transcurridos cuatrocientos años el error cometido será de 0.88 días por defecto. Como ya podéis suponer el error se corrige nuevamente añadiendo un día cada cuatrocientos años, lo que se consigue fácilmente haciendo bisiestos los años que, aunque terminen en 00, sean un múltiplo de cuatrocientos¹⁹. Podríamos seguir, porque cada cuatrocientos años siguen faltando 0,12 días, es decir habría que hacer algo cada 3.334 años (añadir un día parece lo más fácil), pero no creo que vivamos para verlo, por lo que no debemos preocuparnos de momento²⁰.

En resumen y para terminar serán años bisiestos los años múltiplos de 4, excepto los que acaben en 00 y también los que, aunque terminen en 00, sean múltiplos de 400.

Por cierto, el año próximo es bisiesto. Suerte a todos.

Madrid, Mayo 2007

¹⁹ Los años 1.700, 1.800 y 1.900, pese a ser múltiplos de cuatro, no fueron bisiestos por acabar en 00, sin embargo el año 2.000, pese a terminar en 00 si fue bisiesto por ser múltiplo de cuatrocientos.

²⁰ Esto que parece tan elaborado y en realidad lo es, tuvo lugar en 1.563, cuando en el Concilio de Trento, el papa Gregorio XIII, fue aconsejado por sus expertos para que reformara el calendario juliano, vigente a la sazón, elaborado a su vez por Julio César, o mejor dicho por un astrónomo de Alejandría a su servicio llamado Sosígenes. Este había fijado la duración del año en 365 días y 6 horas por lo que se dispuso un año normal de 365 días, compensando el desfase añadiendo un día al mes de febrero cada cuatro años. Esta jornada recibió el nombre de bis-sextus, de donde procede la denominación de año bisiesto. En 1.582 se aprobó definitivamente la reforma. En aquellos días el año civil llevaba un adelanto sobre el año trópico de 10 días. Para solucionar este pequeño escollo se dispuso que el día siguiente al 5 de octubre de 1582, fuese el 15 de octubre del mismo año. Para que luego nos quejemos del cambio de hora. Este calendario es el que seguimos empleando actualmente.