

# La mesura del temps

*Carme Jordi*

*Dept Astronomia i Meteorologia, UB-ICC/IEEC*

*8-maig-2012*

La mesura del temps sembla una cosa senzilla: les busques del rellotge marquen com va discorrent impassiblement. Darrera dels rellotges actuals, però, hi ha molts segles d'història, mètodes diferents de mesurar el temps, i lleis de la física que estableixen les relacions entre uns rellotges i uns altres.

La manera més senzilla de mesurar el temps és utilitzar un fenomen repetitiu i anar-ne comptant les repeticions. Aquesta forma de mesura es fa servir des d'èpoques immemorials, quan els nostres avantpassats feien servir la successió dels dies, mesos, o anys. El concepte del "dia" va lligat al temps que la Terra triga a girar sobre sí mateixa, el del "mes" al temps que la Lluna inverteix en completar una revolució entorn de la Terra, i finalment, el de l'"any" al temps que la Terra triga a fer una revolució completa entorn del Sol.

Actualment, s'utilitzen rellotges atòmics i el segon de temps que marquen està establert en el sistema internacional de mesures com a 9.192.631.770 períodes de la radiació electromagnètica corresponent a la transició entre dos nivells de l'estructura hiperfina de l'estat fonamental del cèssi 133. Tot i que sembla deslligat dels cossos celests, aquest segon també té una base astronòmica.

Anem pas a pas per a comprendre-ho.

## El dia i el temps universal

El primer graó en l'establiment de les diverses escales de temps va lligat al gir de la Terra sobre sí mateixa. Si hom imagina un instant de temps amb una alineació entre el Sol, un observador a la Terra i una estrella llunyana (instant 1 a la figura 1), quan la Terra hagi girat una volta sencera (360 graus) l'observador s'alinejarà altre cop amb l'estrella (instant 2 a la figura 1). Ara bé, la Terra gira entorn del Sol alhora que gira sobre sí mateixa, de manera que en aquest instant, l'observador no torna a alinear-se amb el Sol. Per alinear-se amb el Sol cal que transcorri una estona més (instant 3 a la figura 1). Per tant, si el dia es defineix com l'interval de temps entre dues alineacions successives amb una estrella (**dia sideri**) s'obté un dia més curt que si es defineix com l'interval de temps entre dues alineacions successives amb el Sol (**dia solar**).

El dia sideri té 24 hores sidèries, cadascuna amb 60 minuts sideris que tenen 60 segons sideris. El dia solar té 24 hores solars, cadascuna amb 60 minuts solars que tenen 60 segons solars. **24 hores solars corresponen a 24<sup>h</sup>3<sup>m</sup>56<sup>s</sup> sideris**. Per tant, un dia solar és més llarg que un dia sideri, i un segon solar és equivalent a 1,00273791 segons sideris.

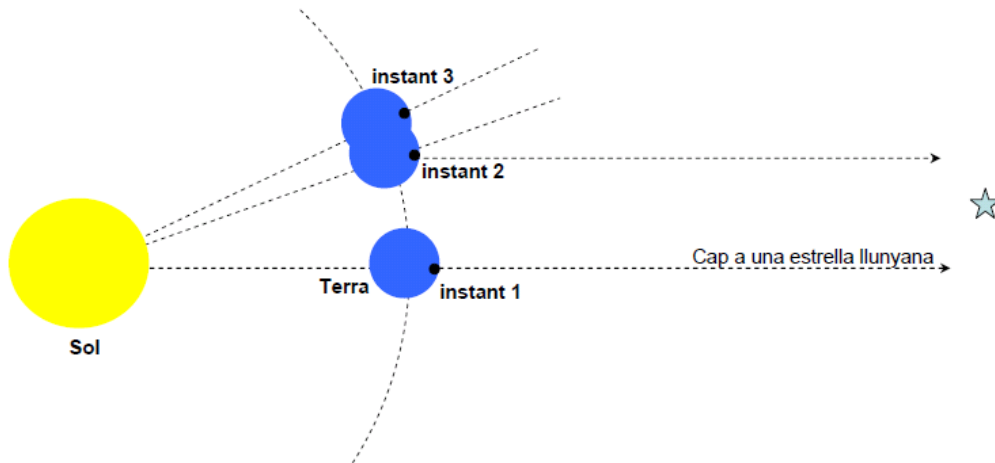


Figura 1: Si en un instant 1 hi ha una alineació Sol-Terra/observador-estrella, quan l'observador a la Terra torni a ser encarat cap a l'estrella, després d'una revolució de 360 graus, no estarà alineat amb el Sol, i quan torni a ser alineat amb el Sol a l'instant 3, no ho serà amb l'estrella. El temps entre l'instant 1 i 2 s'anomena "dia sideri" (alineacions amb un punt fix del cel) i el temps entre l'instant 1 i el 3 s'anomena "dia solar" (alineacions amb el Sol).

Un pas més. Els dies solars tindrien sempre la mateixa durada si la Terra es moguéssim uniformement al voltant del Sol (com seria el cas d'una òrbita circular), i l'eix de rotació sobre sí mateixa fos paral·lel a l'eix de translació al voltant del Sol .

Ara bé, la Terra es mou al voltant del Sol en una òrbita lleugerament el·líptica, i com a conseqüència té una velocitat diferent entorn del Sol en una època o una altra de l'any. A l'època 1 de la figura 2, cap a primers de gener, la Terra es mou més de pressa que a l'època 2, cap a primers de juliol. La durada del dia solar (temps entre dues alineacions successives d'un habitant amb el Sol) no és la mateixa a diferents èpoques de l'any. Per tant, les alineacions no es produeixen a intervals regulars, i el dia solar no és un interval de temps constant i uniforme.

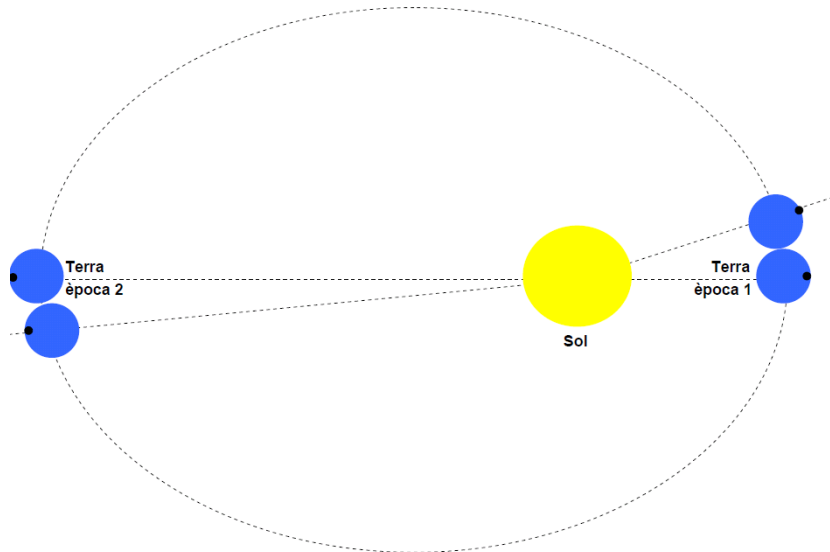


Figura 2: Moviment de la Terra al voltant del Sol en dues èpoques diferents de l'any. L'època 1 correspon a primers de geners, i l'època 2 a primers de juliol, i la velocitat de la Terra és més gran a l'època 1 que a la 2. L'interval de temps entre dues alineacions consecutives d'un observador amb el Sol (o dies solars) té durades diferents.

A més a més, com que la Terra es trasllada al voltant del Sol en el pla de l'eclíptica (vegeu figura 3) però rota sobre sí mateixa entorn d'un eix inclinat 23,5 graus, els eixos de translació i rotació no són paral·lels. Aquest no paral·lisme dels eixos i, com a conseqüència la no coincidència de l'equador i l'eclíptica (vegeu figura 3), provoca que l'interval de temps entre alineacions successives del Sol amb un observador a la Terra tampoc sigui uniforme, contribuint a afegir diferències a la durada del dia solar segons l'època de l'any.

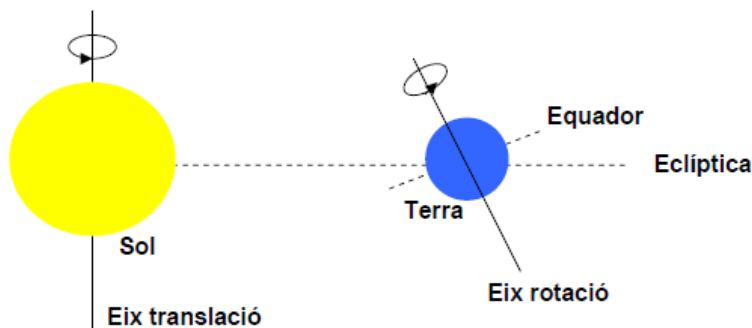


Figura 3: La Terra es trasllada a l'entorn del Sol seguint el pla de l'eclíptica i rota sobre sí mateixa entorn d'un eix inclinat 23,5 graus respecte de l'eix de translació. L'angle entre l'equador i l'eclíptica és també de 23,5 graus.

Per a poder tenir uns dies de durada constant, es va inventar un “**dia solar mitjà**”, que es correspon a un Sol imaginari, fictici, que recorre el pla de l’equador a velocitat constant al llarg de l’any. Dues alineacions successives d’un observador amb el Sol fictici és la mesura d’un dia solar mitjà. Aquest dia solar mitjà, té 24 hores solars mitjanes, cadascuna amb 60 minuts solars mitjans que tenen 60 segons solars mitjans. El Sol fictici i el Sol veritable no són el mateix, i per això l’hora que marquen els rellotges de Sol (a partir de l’ombra del Sol real) i l’hora que marquen els rellotges de polsera, o els senyals horaris emesos per la ràdio (relacionats amb el Sol fictici) no coincideixen del tot. La diferència entre els dos temps està ben establerta, s’anomena “**equació del temps**” i es correspon a la figura 4. Aquesta diferència de temps es pot veure de vegades dibuixada en els rellotges solars com a hodògrafa.

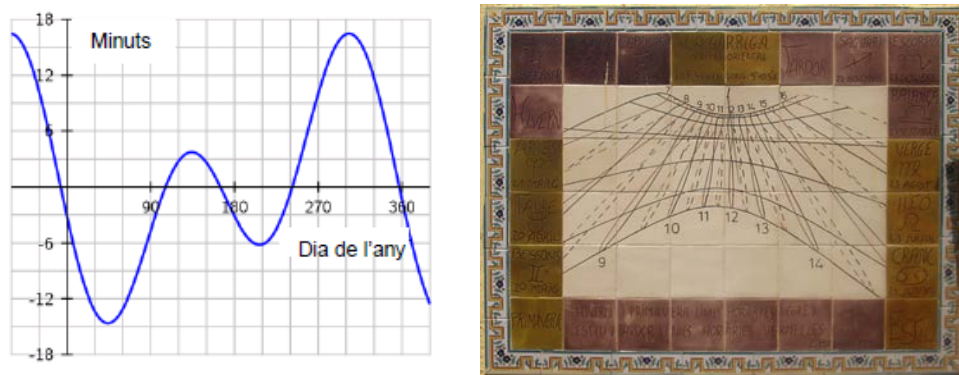


Figura 4: Esquerra: Equació de temps o diferència entre el temps solar veritable i el temps solar mitjà segons el dia de l’any. Dreta: Un rellotge de sol marca el pas del temps amb les ombres d’un estilet per la il·luminació del Sol veritable. L’equació del temps dibuixada com a hodògrafa en cadascuna les hores del rellotge permet transformar el temps solar veritable a temps solar mitjà (© Eduard Masana).

Aquest temps solar mitjà ha donat nom a una escala de temps anomenada **TEMPS UNIVERSAL (TU)** i és en la que es basa l’hora oficial dels diversos països. El temps universal no és res més que el temps solar mitjà a la longitud de l’Observatori de Greenwich a Anglaterra (és a dir el temps marcat pel Sol fictici vist per una persona al meridià de l’Observatori de Greenwich). Per a una persona situada més a l’est, aquella hora ja haurà passat, però per a una persona situada més a l’oest aquella hora encara haurà d’arribar. El migdia ocorre abans a Catalunya que a Galícia, i a la península abans que a les illes Canàries.

A efectes pràctics, els països adopten un temps oficial que difereix normalment en un nombre d’hores enteres amb el temps universal, en positiu si som més a l’est, i en negatiu si som més a l’oest. A Canàries van una hora endarrerits respecte de la península Ibèrica, perquè són més a l’oest. Europa, i altre cop per efectes pràctics, ha decidit que molts països es regeixin pel mateix horari tot i ser a l’est o a l’oest de Greenwich (Espanya té el mateix temps oficial que Alemanya o Itàlia, tot i ser més a l’oest que aquests països).

Deixant de banda aquests convenis entre països, la base de tots els temps oficial avui en dia, és l'escala del temps universal.

### ***La rotació de la Terra***

La durada del dia solar mitjà o dia en temps universal serà regular i constant sempre que la rotació de la Terra sobre el seu propi eix ho sigui. Si la Terra en un moment donat rota més ràpid, una persona a la superfície arribarà abans a alinear-se amb el Sol o l'estrella (vegeu figura 1) i per tant el dia serà més curt, mentre que si la rotació s'alenteix trigarà més a alinear-se i en conseqüència el dia serà més llarg.

De fet, la possibilitat que la rotació de la Terra no fos uniforme no es va plantejar fins al segle XVIII, i no va ser fins a la segona meitat del segle XIX que amb observacions continuades de la Lluna, els planetes i fenòmens com les ocultacions d'estrelles per la Lluna, eclipsis de Sol i Lluna, trànsits de Mercuri per davant del Sol, i d'altres efemèrides, es va deduir que realment la Terra no gira uniformement. L'efecte de les mareas (principalment degudes a la interacció amb la Lluna) tendeix a frenar una mica la rotació terrestre (a la vegada que fa que la Lluna s'allunyi de la Terra) i per tant a allargar el dia. A més d'aquesta lenta frenada, s'han detectat variacions de la durada del dia per efectes estacionals (estiu/hivern als hemisferis nord/sud) i efectes totalment impredecibles lligats a fenòmens geològics com són terratrèmols o erupcions de volcans.

Avui en dia l'organització *International Earth Rotation Service* (IERS) s'encarrega d'observar objectes extragalàctics molt allunyats, els quàsars, per deduir l'orientació de la Terra en tot moment, i per tant saber quin angle ha girat i si el dia s'ha allargat o escurçat (vegeu figura 5). Compaginant-ho amb observacions d'eclipsis de fa segles enrere, s'ha deduït que 500 anys aC el dia era uns 40 mil·lisegons més curt que ara, i que l'any 1200 el dia ja era una mica més llarg, només 10 mil·lisegons més curt que ara. Això correspon a un alentiment mitjà de la rotació de la Terra d'aproximadament 1,7 mil·lisegons cada segle i un rellotge basat en el dia ha acumulat un endarreriment de quasi 4,5 hores en 2500 anys.

Com que la rotació de la Terra no és constant, ni els rellotges basats en el temps sideri ni els basats en el temps solar són rellotges que marquin el pas del temps uniformement. No són per tant, bons rellotges ni escales de temps per a les equacions de la física. Cal fer un pas més i buscar alternatives per establir un temps deslligat de la rotació terrestre.

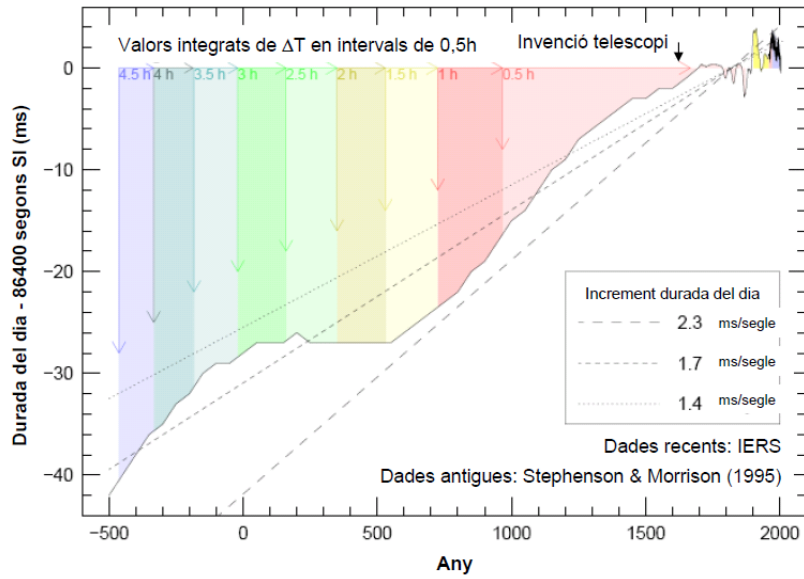


Figura 5. Variació de la durada del dia. Hi ha una tendència general de frenada d'aproximadament 1,7 mil·lisegons cada segle, a la qual es superposen variacions estacionals i d'altres totalment irregulars. Des de l'any 1987, les mesures continuades de l'orientació de la Terra fetes per l'IERS permeten de saber en cada moment la durada del dia.

### L'any i el temps atòmic internacional

Evidentment, un altre fenomen repetible utilitzat per mesurar el pas del temps des de segles enrere està lligat al moviment de la Terra al voltant del Sol. Aquesta unitat de temps és el que es coneix com a **any**. De la mateixa manera que es poden definir diversos "dies", també es poden definir diversos anys, tal com mostra la figura 6, segons quin punt de l'òrbita al voltant del Sol es prengui com a referència.

L'any sideri correspon a l'interval de temps entre dos alineaments consecutius del Sol amb la Terra i un punt fix de l'esfera celest (per exemple una estrella quieta o un objecte extragalàctic), és a dir el temps per recórrer 360 graus al voltant del Sol i és d'aproximadament 365,2564 dies solars mitjans.

L'any anomalístic correspon a l'interval de temps entre dos passos consecutius de la Terra pel periheli de l'òrbita al voltant del Sol (el periheli és el punt de l'òrbita on la Terra i el Sol són més propers entre ells). Com que la línia dels àpsides (afeli-periheli) avança amb el temps, l'interval de temps entre dos passos consecutius de la Terra pel periheli correspon a haver recorregut més de 360 graus, i per tant, és més llarg que l'any sideri, d'aproximadament 365,2596 dies solars mitjans.

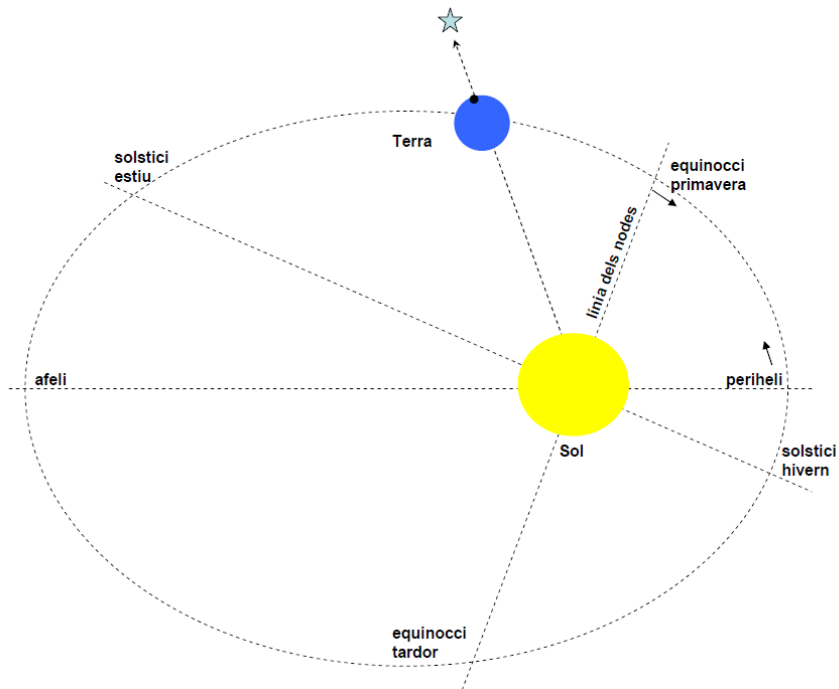


Figura 6. Moviment de la Terra al voltant del Sol i punts de referència respecte dels quals es mesura el pas del temps.

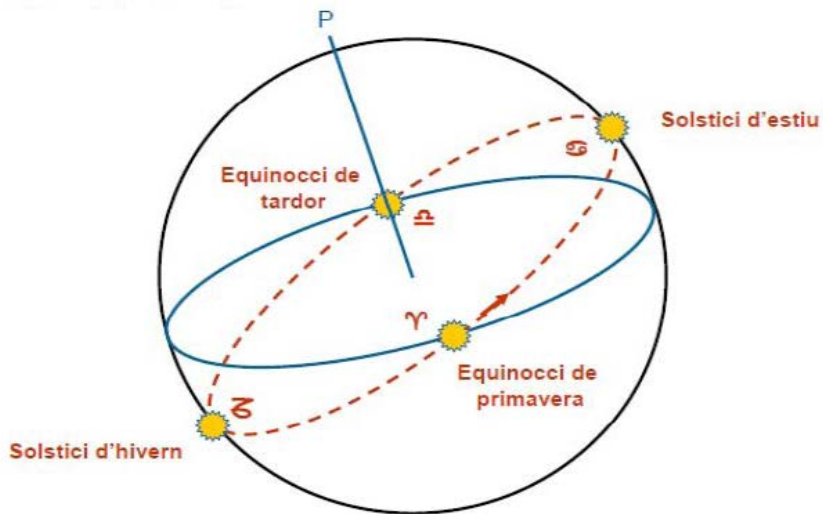


Figura 7. Representació de la volta celest amb l'eix de rotació de la Terra apuntant al Pol i perpendicular al pla de l'equador (en blau) i l'eclíptica (en traces vermelles) que és el pla de l'òrbita de la Terra al voltant del Sol, o de forma reflexa del Sol al voltant de la Terra al llarg de l'any. La representació és per a l'hemisferi nord.

L'**any tròpic** correspon a l'interval de temps entre dos passos consecutius de la Terra per l'equinocci de primavera (a la línia dels nodes entre l'eclíptica i l'equador, vegeu figura 7). La línia dels nodes es mou sobre de l'òrbita de la Terra per la precessió de l'eix de la Terra a raó de 50,29 segons d'arc per any de forma retrògrada. Per tant, l'any tròpic és més curt que l'any sideri perquè la Terra recorre menys de 360 graus, i és d'aproximadament 365,2422 dies solars mitjans.

Els equinoccis de primavera i tardor i els solsticis d'estiu i hivern són els que marquen els cicles de les estacions i amb elles el cicle vital de la vida animal i vegetal a la Terra. És, doncs, natural que el concepte d'any a la nostra vida comuna estigui lligat a la definició d'any tròpic. Ara bé, com que la Terra no és perfectament esfèrica, el Sol i la Lluna no són a l'equador i l'òrbita dels planetes no es mouen sobre el pla de l'eclíptica (el pla de l'òrbita de la Terra al voltant del Sol), hi ha un efecte gravitacional anomenat precessió que té com a conseqüència que l'eix de rotació no apunti sempre cap a la mateixa estrella i que la línia dels nodes es vagi desplaçant de forma retrògrada. La retrogradació de la línia dels nodes no és constant, i per tant, la durada de l'any tròpic no és sempre de 365,2422 dies solars mitjans. Per tant, l'any tròpic de forma genèrica tampoc no aporta una escala de temps uniforme per a les equacions de la física.

Els astrònoms de meitats del segle XX, preocupats com estaven per establir una escala de temps uniforme, van decidir d'agafar com a unitat de mesura la durada de l'any tròpic de les 12<sup>h</sup> del dia 31 de desembre del 1899 i que és de 31556925,9747 segons. No es tracta de la durada d'un any tròpic en general, perquè canvia d'un moment a un altre, sinó la durada d'un any tròpic en un moment concret. Aquesta durada no canvia. D'aquesta manera, van definir el **segon d'efemèrides** com a 1/31556925,9747 part de l'any tròpic de les 12<sup>h</sup> del dia 31 de desembre de 1899 i es va adoptar oficialment com a base per al comptatge del temps el 1952 amb el nom d'escala de **temps d'efemèrides**. Sent una escala uniforme en el temps, es pot extrapolar cap al passat, i se'n va definir l'origen en la coincidència (dins dels marges d'error de les mesures i les hipòtesis emprades) amb el TU a inicis del 1900.

A la dècada dels 1950 es van començar a construir rellotges basats en la radiació emesa en transicions d'electrons entre nivells atòmics i es van ajustar per marcar el pas del temps d'efemèrides. És la primera vegada que el temps no s'enregistrava amb observacions astronòmiques, tot i que el temps dels rellotges atòmics sí té un fonament astronòmic. La millora en l'estabilitat i fiabilitat d'aquests rellotges va fer que s'acabés establint l'escala de **temps atòmic internacional, TAI**, amb un segon de temps igual que el d'efemèrides. L'origen del TAI es va fixar a les 0<sup>h</sup> de l'1 de gener de 1958 en l'escala de temps universal TU i es va adoptar com a escala de temps a nivell mundial el 1972. Basant-se en aquests rellotges atòmics, l'any 1967 es va definir el **segon en el sistema internacional** de mesures com a "9.192.631.770 períodes de la radiació electromagnètica corresponent a la transició entre dos nivells de l'estructura hiperfina de l'estat fonamental del cèssi 133". La durada del segon del sistema internacional és la mateixa que la durada del segon del TAI, i la mateixa que la durada del segon d'efemèrides. Les durades dels segons són les mateixes, però la manera com es realitza la mesura del pas del temps en cadascuna d'aquestes escales és diferent (el temps



d'efemèrides a partir de les observacions astronòmiques i el temps atòmic internacional a partir dels rellotges atòmics).

Al primer de gener de 1958, l'escala de temps universal TU i l'escala de temps d'efemèrides diferien en 32,184 segons i per tant aquesta diferència va quedar també entre l'escala de temps d'efemèrides i l'escala TAI per a sempre més. Les dues escales tenen la mateixa durada del segon, però simplement tenen un desplaçament d'origen de 32,184 segons.

### *El temps universal coordinat*

Dels que s'han descrit fins ara, el temps d'efemèrides i el temps TAI (que materialitza amb rellotges atòmics el concepte del temps d'efemèrides) són escales de temps deslligades de les irregularitats de la rotació terrestre.

Per a les vides quotidianes, tanmateix, és pràctic utilitzar una escala de temps lligada a la successió d'hores de claror i foscor (és a dir el dia solar). Cal doncs un lligam entre l'escala uniforme del TAI (marcat pels nostres rellotges) i l'escala de temps universal TU (marcada per la posició del Sol mitjà). Com que TU va lligat a la rotació terrestre, les diferències entre TAI i TU van canviant amb el temps segons si la Terra frena o accelera la rotació.

Així, alhora que el 1972 s'adoptava l'escala de temps atòmic internacional com a escala a nivell mundial, es va definir una altra escala de temps, el **temps universal coordinat TUC**, com a pont entre les escales TAI i TU, i és en aquesta escala TUC en la que basem les hores oficials dels països (figura 8). Tal com es va definir:

- a) l'escala TUC i l'escala TU no han de diferir entre elles en més d'un segon, i
- b) la diferència entre les escales TUC i TAI serà sempre un nombre enter de segons del sistema internacional.

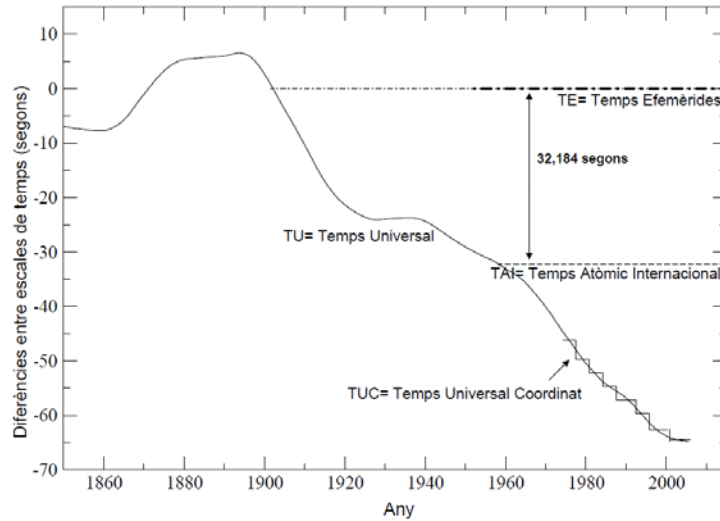


Figura 8. Representació de les diferències entre les diverses escales de temps al llarg dels anys. La diferència TE-TAI=32,184 segons és constant perquè les durades dels segons de efemèrides i del temps atòmic són iguals. El temps universal TU està lligat a la rotació no uniforme de la Terra i la diferència amb el TAI i el TE va variant irregularment (a trets generals augmenta perquè la rotació terrestre es frena). El temps universal coordinat TUC va resseguint el TU però introduint o restant segons sencers per tal que la diferència TAI-TUC sigui igual a un nombre enter de segons alhora que TU-TUC és menor que 1 segon.

D'aquesta manera, s'utilitzen rellotges atòmics amb segons del sistema internacional (seguint l'escala TAI), però afegint i restant segons de tant en tant, segons que hagi sigut la rotació terrestre, per ajustar aquests rellotges al temps solar TU. És similar a allò que fem cada quatre anys quan afegim un dia 29 de febrer per compensar que la durada de l'any tròpic no és de 365 dies solars sinó de 365,2422. Quan hem acumulat 4 vegades un quart de dia, afegim un dia més al calendari. D'aquesta manera cada quatre anys tornem a sincronitzar els dies amb els anys. La diferència entre aquest conveni d'anys de traspàs i l'escala de temps TUC és que la variació de la rotació de la Terra té components impredecibles, i no podem establir per endavant que cada cert nombre de dies o mesos haurem d'afegir o eliminar algun segon. Al contrari, calen les observacions astronòmiques continuades de l'*International Earth Rotation Service* per establir com la rotació terrestre ha variat i com s'han desviat les escales TUC i TAI entre elles. Per conveni, afegir o eliminar segons es realitza a les 24h del 30 de juny o el 31 de desembre. La taula 1 mostra les variacions introduïdes des del 1990.

Taula 1: Dates en les que s'ha introduït una variació a les escales de temps oficials per ajustar-se a l'escala de temps solar.

31-des-1990	+1s	30-juny-1997	+1s
30-juny-1992	+1s	31-des-1998	+1s
30-juny-1993	+1s	31-des-2005	+1s
30-juny-1994	+1s	31-des-2008	+1s
31-des-1995	+1s	30-juny-2012	+1s

## **Conclusió**

Actualment fem servir rellotges atòmics per mesurar com transcorre el temps i perquè ens donen una escala uniforme (TAI o TE) per a les equacions de la física. A la vida quotidiana fem servir, però, l'escala de temps universal coordinat TUC per poder ajustar el temps a la successió de períodes de claror i fosc (dies) i al canvi de les estacions (anys).

*Agraïments: L'autora vol agrair els comentaris d'Eduard Masana i Surinye Olarte que han ajudat a millorar la comprensió del text.*

---

### **Aclariments:**

No s'ha fet distinció entre dia sideri i dia sideral, ni entre les diverses escales de temps universal TU0, TU1 i TU2. Tampoc s'ha discutit el concepte físic de la relativitat del temps segons l'observador sigui a la superfície de la Terra, al geocentre, a l'heliocentre o al baricentre del sistema solar. Aquests conceptes avançats s'han considerat fora de l'objectiu d'aquest petit informe destinat al públic general.