



FACULDADE • DE • CIÊNCIAS UNIVERSIDADE • DE • LISBOA



Escalas de Tempo



V. B. Mendes

1. INTRODUÇÃO



A noção de tempo é fundamental em Geodesia Espacial, dado que a generalidade das observáveis utilizadas pelas técnicas de posicionamento espacial são função do **intervalo de tempo** decorrido entre uma dada **época** de referência e a época correspondente ao instante de ocorrência da observação ou medição. No entanto, a medição

de um intervalo de tempo só tem sentido se as épocas consideradas se referirem a uma mesma **escala de tempo**.

A medição do tempo, inicialmente baseada na observação de fenómenos de carácter astronómico, evoluiu nas últimas décadas de forma notável (sobre a evolução das escalas de tempo ver, por exemplo, Marques [1991]), devido à introdução dos relógios atómicos (a figura acima representa um desses relógios, um *maser* de hidrogénio desenvolvido pela NASA – *National Aeronautics and Space Administration*). Apesar disso, as escalas de natureza astronómica continuam a ser essenciais, em especial na ligação entre diferentes sistemas de coordenadas. É necessário, pois, conhecer com rigor a relação existente entre as diversas escalas de tempo usadas em Geodesia Espacial: tempo rotacional, tempo atómico e tempo dinâmico.

Tempo Rotacional

O tempo rotacional baseia-se no movimento de rotação da Terra (daí a denominação de rotacional) e pode ser determinado a partir de observações de estrelas, satélites e fontes rádio extragalácticas.

O tempo rotacional engloba duas formas distintas, o **tempo sideral** e o **tempo universal** (ou **solar**). Ambas as formas podem ser relacionados através de fórmulas rigorosas e o uso de uma ou de outra é apenas uma questão de conveniência. O tempo rotacional é utilizado na transformação entre um sistema de coordenadas inercial e um sistema de coordenadas terrestre e permite conhecer a orientação da Terra no espaço.

Define-se **tempo sideral aparente local** (LAST – *Local Apparent Sidereal Time*) como o ângulo horário do ponto vernal verdadeiro referido ao meridiano (astronómico) do lugar; se o meridiano de referência for o meridiano de Greenwich, obtém-se o **tempo sideral aparente de Greenwich** (GAST – *Greenwich Apparent Sidereal Time*). A posição do ponto vernal é afectada pela nutação do eixo de rotação da Terra, que introduz desigualdades periódicas irregulares no tempo sideral aparente, e pelo movimento de precessão. Se introduzirmos o conceito de ponto vernal médio, que sofre apenas os efeitos de precessão, podemos definir o **tempo sideral médio local** (LMST – *Local Mean Sidereal Time*) e o **tempo sideral médio de Greenwich** (GMST – *Greenwich Mean Sidereal Time*), como o ângulo horário do ponto vernal médio referido ao meridiano do lugar e de Greenwich, respectivamente. A diferença entre os tempos sideral aparente e médio é a **equação dos equinócios**:

$$\text{Eq.E.} = \text{GAST} - \text{GMST} = \text{LAST} - \text{LMST} = \Delta\psi \cos \varepsilon', \quad (1)$$

onde $\Delta\psi$ é a nutação em longitude e ε' a obliquidade verdadeira da eclíptica. A equação dos equinócios varia periodicamente, com uma amplitude máxima de cerca de 1^s .

Até 1956, a unidade fundamental de tempo era o **dia solar médio**, que se define como o intervalo de tempo decorrido entre duas passagens consecutivas pelo meridiano do lugar de um Sol fictício, que percorre o equador com movimento uniforme. O movimento verdadeiro do Sol não é uniforme, dado que: (1) o

movimento da Terra em torno do Sol é variável; (2) os planos do equador celeste e da eclíptica não sãooplanares.

Denomina-se **tempo solar médio** (MT – *Mean Time*) ao intervalo de tempo decorrido entre o instante correspondente à passagem inferior do Sol médio num dado meridiano e o instante considerado. De igual modo, o **tempo solar verdadeiro** (TT – *True Time*) é o intervalo de tempo decorrido entre o instante correspondente à passagem inferior do Sol verdadeiro num dado meridiano e o instante considerado. Numericamente, o tempo solar corresponde ao ângulo horário do Sol (h_{MS} ou h_{TS} , consoante se trate do Sol médio ou verdadeiro) acrescentado de 12^h :

$$TT = h_{TS} + 12^h, \quad (2a)$$

e

$$MT = h_{MS} + 12^h. \quad (2b)$$

A diferença entre o TT e o MT constitui a **equação do tempo**:

$$Eq.T. = TT - MT. \quad (3)$$

A equação do tempo é uma função periódica, que pode atingir 16 minutos, e corresponde à sobreposição de duas componentes: correcção pelo facto da órbita da Terra não ser circular (**equação da excentricidade**), de período anual, e correcção pelo facto dos planos do equador e eclíptica não coincidirem (**equação da obliquidade**), de período semestral.

De particular importância é o **tempo solar médio de Greenwich** (GMT – *Greenwich Mean Time*) ou **tempo universal** (UT – *Universal Time*), correspondente ao ângulo horário do Sol médio referido ao meridiano de Greenwich:

$$UT = (h_{MS})_{\text{Greenwich}} + 12^h. \quad (4)$$

Embora corrigido da não-uniformidade do movimento aparente do Sol em torno da Terra, o UT sofre no entanto das irregularidades devidas às variações no movimento de rotação da Terra, provocadas pela acção das marés, ventos e movimentos no interior do núcleo terrestre. Para além disso, é necessário ter em consideração o movimento irregular do eixo de rotação da Terra em relação à crosta terrestre (movimento do pólo). Existem 3 formas de tempo universal: UT0, UT1 e UT2.

O **UT0** corresponde ao UT observado num determinado lugar e é por isso referido ao eixo de rotação instantâneo, afectado do movimento do pólo e das variações no movimento de rotação da Terra. O **UT1** corresponde ao UT0 corrigido do efeito do movimento do pólo, referido ao Pólo Terrestre Convencional (CTP – *Conventional Terrestrial Pole*). A diferença entre o UT1 e o UT0, em segundos de tempo, é dada por (ver, por exemplo, Torge [1980]):

$$UT1 = UT0 - \frac{1}{15} (x_p \sin \Lambda + y_p \cos \Lambda) \tan \Phi, \quad (5)$$

onde x_p e y_p são as coordenadas do pólo instantâneo em relação ao CTP (em segundos de arco) e Λ e Φ são a longitude e latitude astronómicas do lugar (em radianos), respectivamente.

Finalmente, o **UT2** corresponde ao UT1 corrigido das irregularidades periódicas anuais e semi-anuais do movimento de rotação da terra. A diferença entre o UT2 e o UT1, em segundos, é dada por (e.g. Marques [1991]; IERS [1996]):

$$UT2 - UT1 = 0.0220 \sin 2\pi t - 0.0120 \cos 2\pi t - 0.0060 \sin 4\pi t + 0.0070 \cos 4\pi t, \quad (6)$$

sendo t dado por

$$t = 2000.000 + (MJD - 51544.03) / 365.2422, \quad (7)$$

onde MJD é a data Juliana modificada¹.

¹ Para trabalhos de carácter científico, é usual referenciar as épocas a um tipo de calendário em que os dias são contados continuamente a partir de uma data de referência e onde não existe o conceito de mês ou ano. Este conceito foi introduzido por Josephus Justus Scaliger, no século XVI. A época de referência utilizada corresponde às 12^h de tempo universal do dia 1 de Janeiro do ano de 4713 a.C. A **data juliana** (JD – *Julian Date*) é definida como o número de dias solares médios decorridos desde essa data de referência. A época padrão adoptada pela União Astronómica Internacional (IAU – *International Astronomical Union*), designada por **J2000.0**, corresponde às 12^h UT1 do dia 1 de Janeiro do ano 2000 [Kaplan, 1981]:

$$J2000.0 = 0.5^d \text{ Janeiro } 2000 = JD \, 2451545.0.$$

Para certas aplicações, e por questões de comodidade, criou-se a **data juliana modificada** (MJD – *Modified Julian Date*), referida às 0^h UT1, e que se obtém da data Juliana subtraindo 2400000.5 dias:

$$MJD = JD - 2400000.5.$$

De entre as diversas formas de UT, o UT1 é o mais utilizado, uma vez que nos permite conhecer a orientação angular instantânea da Terra no espaço.

O UT pode ser considerado como uma forma especial de tempo sideral, sendo obtido a partir da relação

$$\boxed{UT = h_{MS} + 12^h = GMST - \alpha_{MS} + 12^h}, \quad (8)$$

onde h_{MS} e α_{MS} representam, respectivamente, o ângulo horário e a ascensão recta do Sol fictício. O tempo sideral médio de Greenwich às 0^h UT1 obtém-se a partir da seguinte expressão [Kaplan, 1981]:

$$\boxed{GMST_{0^h UT1} = 24110^s.54841 + 8640184^s.812866T_u + 0^s.093104T_u^2 - 6^s.2 \times 10^{-6}T_u^3}, \quad (9)$$

onde T_u é o número de séculos Julianos de 36525 dias de tempo universal decorridos desde as 12^h UT1 do dia 1 de Janeiro do ano 2000, isto é,

$$\boxed{T_u = \frac{JD - 2451545.0}{36525}}, \quad (10)$$

onde JD é a data Juliana (UT1) do instante considerado.

A razão entre um intervalo de tempo UT1 e GMST, decorrido entre duas épocas é dado por [Kaplan, 1981]:

$$\boxed{r = \frac{UT1}{GMST} = 0.997269566329084 - 5.8684 \times 10^{-11}T_u + 5.9 \times 10^{-15}T_u^2} \quad (11)$$

e a razão inversa por

$$\boxed{\frac{1}{r} = \frac{GMST}{UT1} = 1.002737909350795 + 5.9006 \times 10^{-11}T_u - 5.9 \times 10^{-15}T_u^2}. \quad (12)$$

Tempo Atómico

Um relógio atómico baseia-se na frequência da radiação electromagnética emitida por um átomo ou molécula quando transita de um estado de alta energia para um estado de menor energia. O primeiro relógio atómico (1949) baseava-se na radiação da molécula de amónio a 23.870 GHz. Desde 1967, a frequência de radiação do átomo de cézio foi adoptada para a definição do segundo do Sistema Internacional (SI): *duração de 9 192 631 770 períodos de radiação correspondente à transição entre dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de Césio 133*. O segundo SI, ao nível do mar, é a unidade fundamental do **tempo atómico internacional** (TAI – *Temps Atomique International*), antigamente mantida pelo Serviço Internacional da Hora (BIH – *Bureau International de l'Heure*) e agora a cargo da Secção do Tempo do Serviço Internacional de Pesos e Medidas (BIPM – *Bureau International des Poids et Measures*) e do Comité Central do Serviço Internacional de Rotação da Terra (IERS/CB – *International Earth Rotation Service/Central Bureau*). Na prática, esta escala de tempo corresponde a uma média ponderada das leituras individuais de diversos relógios atómicos (mais de 200) em laboratórios espalhados por todo o globo (várias dezenas). Muitos destes laboratórios, por sua vez, produzem várias escalas atómicas independentes: escalas de tempo atómico local. O BIPM publica regularmente (circular T) as diferenças entre os diversos tempos atómicos locais e o TAI (<http://tycho.usno.navy.mil/latestcircT>). O TAI coincidia com o UT1 no dia 1 de Janeiro de 1958.

A velocidade de rotação da Terra diminui de forma variável, em cerca de 1^s por ano, em relação às escalas de tempo uniformes definidas pelos relógios atómicos (o TAI é cerca de seis ordens de magnitude mais estável do que o UT1 [IERS, 1996]). Para relacionar o tempo atómico com a rotação da terra, é necessário introduzir o conceito de **tempo universal coordenado** ou UTC. A unidade de tempo fundamental do UTC é a mesma do TAI, o que torna esta escala de tempo uma escala híbrida. De forma a manter certa aproximação com o UT1, o UTC sofre

periodicamente uma adição ou subtração de segundos intercalares ("*leap seconds*"), decisão da responsabilidade do IERS. Deste modo, são satisfeitas as seguintes condições: (1) a diferença entre o TAI e o UTC (DAT) é um número inteiro de segundos; (2) a diferença entre o UT1 e o UTC, DUT1, nunca excede 0.9 segundos, em valor absoluto [IERS, 1996]:

$$\text{DAT} = \text{TAI} - \text{UTC}$$

$$\text{DUT1} = |\text{UT1} - \text{UTC}| < 0.9^{\text{s}}$$

Às 0^h UTC do dia 1 de Julho de 2012, a diferença entre o TAI e o UTC passou a ser de 35^s, conforme anunciado no Boletim C, Nº 43, do IERS (<http://hpiers.obspm.fr>). O valor do DUT1 a ser transmitido com os sinais horários é anunciado no Boletim D do IERS, com uma precisão de 0.1^s.

Tempo GPS

Os sinais transmitidos pelos satélites que constituem o Sistema de Posicionamento Global (GPS – *Global Positioning System*) são referidos a uma escala de tempo atómico própria, denominada **escala de tempo GPS** (GPST – *Global Positioning System Time*). Esta escala de tempo é obtida a partir de leituras dos relógios das estações de controlo GPS operacionais (cf. Módulo GPS) e dos próprios relógios a bordo dos satélites (no período anterior a Junho de 1990 era utilizado apenas um único relógio atómico de uma das estações de controlo GPS). Existem várias gerações de satélites GPS, denominadas como blocos. Os satélite GPS do Bloco II transportam quatro relógios atómicos (césio ou rubídio), um dos quais é seleccionado para controlar a frequência e tempo padrão na geração dos sinais GPS. Os relógios atómicos dos satélites GPS estão sincronizados com o sistema de tempo GPS apenas aproximadamente, de modo a evitar ajustamentos constantes. Para determinar a diferença entre um dado relógio a bordo e o GPST (que pode atingir cerca de 1 milissegundo), o Sistema de Controlo Operacional do GPS e o Observatório Naval dos Estados Unidos da

América (USNO – *United States Naval Observatory*) determinam, para uma dada época, o desfasamento, a deriva linear e, no caso dos relógios de rubídio, a taxa de variação da deriva inerente a cada relógio. Estes parâmetros são posteriormente injectados nos diferentes satélites e incluídos na mensagem de navegação enviada ao utilizador.

O GPST foi idealizado de forma a manter-se próximo do UTC, e coincidia com este às 0^h UTC do dia 6 de Janeiro de 1980, como se mostra na Tabela 1. No entanto, contrariamente ao UTC, o GPST não sofre a introdução de segundos intercalares. Às 0^h UTC do dia 1 de Julho de 2012, a diferença GPST-UTC era de 16^s (mais uma fracção de microsegundo, que vai variando de dia para dia).

Uma dada época GPS é identificada no GPST como o número de segundos decorridos desde as 0^h GPST do Domingo imediatamente anterior, denominados **segundos GPS**. Para resolver a ambiguidade inerente a esta medição introduziu-se o conceito de **semana GPS**, numeradas consecutivamente a partir do dia 6 de Janeiro de 1980 (época padrão GPS). As semanas GPS são expressas por ciclos de 1024 semanas, devido ao facto da mensagem de navegação reservar apenas 10 bits para representar a semana GPS; assim, no fim da semana 1023 (que ocorreu em 21 de Agosto de 1999), a numeração da semana GPS voltou a 0, sendo da responsabilidade do utilizador a consideração dos ciclos de semanas GPS decorridas. O próximo ciclo durará até ao dia 6 de Abril de 2019.

Tabela 1 - Variação histórica das diferenças entre algumas escalas de tempo atômico.

DATA (O ^h UTC)	TAI-UTC (segundos)	GPST-UTC (segundos)
6 Jan. 1980	19	0
1 Jul. 1981	20	1
1 Jul. 1982	21	2
1 Jul. 1983	22	3
1 Jul. 1985	23	4
1 Jan. 1988	24	5
1 Jan. 1990	25	6
1 Jan. 1991	26	7
1 Jul. 1992	27	8
1 Jul. 1993	28	9
1 Jul. 1994	29	10
1 Jan. 1996	30	11
1 Jul. 1997	31	12
1 Jan. 1999	32	13
1 Jan. 2006	33	14
1 Jan. 2009	34	15
1 Jul. 2012	35	16
1 Jul. 2015	36	17
1 Jan. 2017	37	18