

## Capítulo 4: Medidas de tempo

Docente: Valente A. Cuambe

Monitor: Bivar Garces

### 3 Sistemas de tempo

#### 3.1 Tempo atômico internacional (TAI)

No Sistema Internacional, a unidade fundamental do tempo atômico é o **segundo**. O *tempo* é definido como a duração de 9.192.631.770 períodos de radiação correspondentes à transição entre os dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de césio-133. Os padrões de frequência do feixe de césio de laboratório percebem o segundo com uma precisão atual de  $1.5 \times 10^{-14}$  Hz

O tempo atômico internacional é usado para identificar instantes únicos de tempo para eventos terrestres, e atende a necessidade actual de precisão, estabilidade a longo prazo e confiabilidade para a Astronomia. Ele pode ser distribuído por padrões precisos, para satélites de comunicação, sinais de rádio e sistemas de navegação como GPS, LORAN-C e OMEGA.

#### 3.2 Tempo dinâmico

O tempo dinâmico é a variável independente nas equações de movimento dos corpos no sistema solar; Sua unidade de duração é baseada nos movimentos orbitais da Terra, da Lua e dos planetas. Até 1998, era chamado *Ephemeris Time* (ET) e foi baseado no movimento **aparente do Sol**. Nesta teoria, o Sol "fictício" médio é suposto ter um movimento **sideral** uniforme para todos os tempos iguais ao movimento sideral médio que o Sol teve na época 1900 ET (1900 Jan 0.5).

Posteriormente, percebeu-se que esta variável independente depende do **sistema de coordenadas** usado como referência. Como resultado, dois argumentos de tempo dinâmico foram introduzidos tais como:

1. Tempo Dinâmico Terrestre (TDT) para um sistema de coordenadas cuja origem está no centro da Terra, e

$$TDT = TAI + 32.184 \text{ seg} \quad (1)$$

2. Tempo Dinâmico Baricêntrico (TDB) para um sistema de coordenadas cuja origem se situa no baricentro do sistema solar.

A fórmula aproximada que geralmente é usada para converter TDT para TDB,

$$TDB = TDT + 0^s.001658 \sin g + 0^s.000014 \sin 2g \quad (2)$$

$$g = 357^{\circ}.53 + 0.98560028 (JD - 2451545.0) \quad (3)$$

### 3.3 Tempo cívil

O sistema quotidiano de tempo é denominado **tempo cívil** e é exibido por um relógio comum. Este sistema de tempo é derivado de relógios atômicos que são extremamente precisos e que também geram sinais apropriados de tempo que são transmitidos em todo o mundo para permitir a sincronização.

Embora o tempo seja contínuo, por conveniência, nosso sistema de tempo civil é quantificado para estabelecer zonas horárias na Terra. Estas zonas horárias são definidas em termos de blocos de longitude, cada um desses blocos medem aproximadamente 15 graus (ou uma hora) de largura. Em Moçambique a zona horária é definida como GMT<sup>1</sup>+2h. No Reino Unido, o fuso horário local é centrado no meridiano de Greenwich como mostrado na Figura 1.

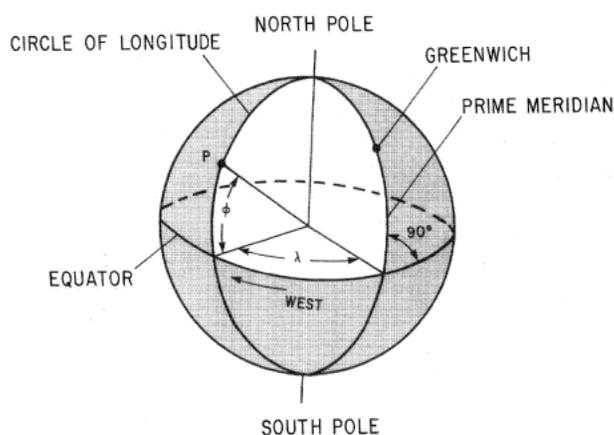


Figure 1: Esfera celeste

O tempo civil está ligado à **posição do Sol** no céu, de tal modo que o dia em um relógio de pulso corresponda a um dia solar.

No entanto, o **dia solar aparente** é o tempo entre trânsitos sucessivos do Sol através do meridiano de um observador. No entanto, o **tempo solar aparente**<sup>2</sup>, isto é aquele tempo medido por relógios de sol, não é um sistema de medição de tempo muito bom. Isso ocorre devido a órbita elíptica da Terra (Primeira Lei de Kepler na Figura 2), mas também pelo facto de que o eixo de rotação da Terra estar inclinado em cerca de  $\sim 23.5$  graus, isto é, o plano orbital da Terra está inclinado cerca de 23.5 graus em relação ao equador celeste (Veja Figura 3). Portanto, o uso deste sistema exigiria relógios que andam mais rápido em alguns dias e mais lento em outros.

A terra se move mais rápido ao longo de sua órbita quando está mais próximo do Sol do que quando está mais distante. Portanto, o Sol move-se mais de um grau por dia ( $\sim 1$  deg) ao longo da eclíptica em janeiro, quando a Terra está mais próxima do Sol e menos de um grau por dia ( $\leq 1$  deg) em Julho, quando a Terra está mais distante do Sol. Por este motivo, o dia solar aparente é mais longo em janeiro do que em julho.

<sup>1</sup>Greenwich Mean Time

<sup>2</sup> $LAT = LST - RA - 12h$

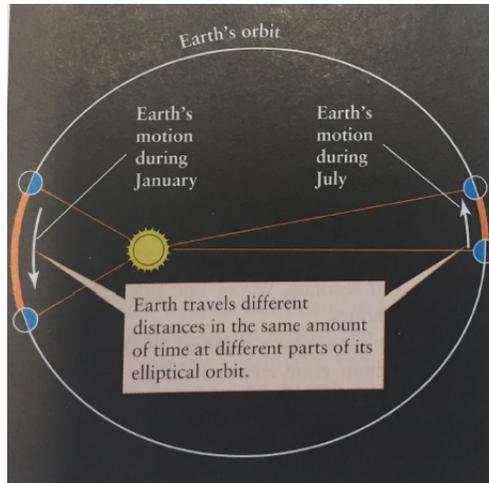


Figure 2: Movimento planetário

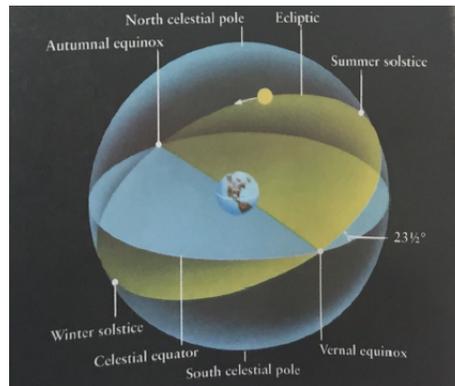


Figure 3: Plano orbital e ecliptica

Para definir o tempo civil, ao invés do Sol aparente (real), invocamos o Sol médio. Este é um objecto fictício que se movimenta ao longo do equador celeste a uma velocidade constante. Portanto, todos os dias medidos são iguais e têm exactamente 24 horas de duração. A diferença entre o tempo médio do sol e o tempo solar aparente é chamada de **equação do tempo** e varia em até 16.25 minutos ao longo do ano.

$$LAT = LMT + E, \quad (4)$$

onde  $LAT$  é o tempo solar aparente local e  $LMT$  é o tempo médio local e  $E$ —equação do tempo. Adicionando a equação de tempo ao Tempo Civil, dará o horário verdadeiro do Sol.

Portanto, o tempo medido pelo relógio de pulso é baseado no tempo solar médio para o nosso fuso horário em particular: daí o uso (por exemplo) do "Greenwich Mean Time (GMT)". Lembre-se, no entanto, que durante o verão, a maioria dos países utilizam o chamado horário de verão (sigla em Inglês  $BST^3$ ). Por exemplo, no Reino Unido é calculado usando a equação,

$$BST = GMT + 1 \text{ hora.} \quad (5)$$

---

<sup>3</sup>British summer Time

### 3.4 Tempo para os Astrónomos

Durante um ano, o Sol se "move" uma vez ao redor do céu ao longo da eclíptica (veja Figura 3), e se olharmos para o céu noturno a cada meia-noite, percebemos que as constelações se movem lentamente ao redor do céu à medida que o ano avança. Conseqüentemente, o tempo medido pelas estrelas distante e o tempo solar medido pelo Sol não pode ser igual. O tempo dos astrónomos é baseado com referência às estrelas de fundo e é denominado como **tempo sideral**.

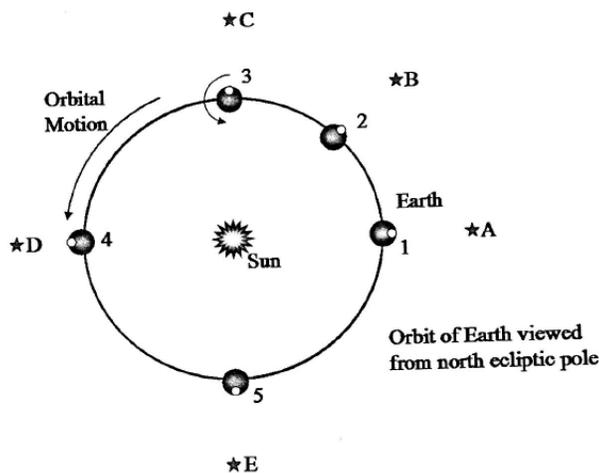


Figure 4: Sistema hipotético Terra-Sol em que o período de rotação da Terra é igual a um ano.

Para estabelecer a diferença entre o **tempo solar** e **tempo sideral**, suponha que o período de rotação da Terra seja igual a um ano. Essa consideração é mostrada na Figura 4, em que o ponto branco representa um ponto fixo na Terra.

À medida que a Terra se desloca em sua órbita sobre o Sol através dos locais marcados pelos números 1, 2, 3, 4 e 5 a rotação da Terra compensa o movimento orbital para que um observador localizado no ponto branco manteria-se sempre à meia-noite. Não haveria transito do Sol. Em contraste, o observador veria constelações diferentes no zênite como é mostrado esquematicamente como estrelas A, B, C, D e E, e veria também toda a esfera celeste girar uma vez ao longo do ano.

Então, observa-se que qualquer estrela transita uma vez por ano, enquanto que o Sol nunca transita. Considera-se que a taxa de rotação normal da Terra é de cerca 365 vezes por ano. Portanto, pelo mesmo argumento apresentado no início deste parágrafo, espera-se que o sol transite 365 vezes no ano, em comparação com 366 transitos da nossa estrela (escolhida como referencial inercial).

Esse argumento explica a diferença entre o tempo solar e o tempo sideral. A definição normal do **tempo sideral** é o tempo entre trânsitos sucessivos de uma estrela escolhida como padrão (ou convencionalmente o Primeiro Ponto de Áries), enquanto que o dia solar médio é definido como o tempo médio entre os trânsitos do Sol. Ao dividir o dia "extra" em cerca de 365 partes, pode-se calcular que o dia sideral que é cerca de 4 minutos antes de cada noite.

- Um dia solar é um pouco mais longo que o tempo de rotação da Terra;
- A velocidade angular do Sol:  $360^\circ/365.25\text{dias} = 0.9856^\circ d^{-1}$ ;
- Durante 365.25 dias a Terra gira 366.25 vezes;
- Portanto a rotação da Terra é :

$$R_T = 24h \times \frac{365.25}{366.25} = 23h56min \quad (6)$$

O ponto zero usado para o tempo sideral é o trânsito do Primeiro Ponto de Áries em Greenwich. **Greenwich Sideral Time** (GST) é o tempo sideral medido em Greenwich (Londres). Considera-se zero ("0") horas no horário solar ao meio-dia no momento do equinócio de Março (aproximadamente 21 de Março). Também zero ("0") horas à meia-noite no momento do equinócio de Setembro (aproximadamente 21 de Setembro) em Greenwich.

### 3.5 Tempo Sideral local e longitude

O **Greenwich Sidereal Time** (GST) é o horário local sideral para observadores localizados no meridiano de Greenwich em Londres. Os observadores localizados em outras longitudes terão seu próprio **Tempo Local Sideral** (LST). Esse tempo pode ser calculado a partir do GST usando a equação:

$$LST = GST + \lambda, \quad (7)$$

onde  $\lambda$  é a longitude<sup>4</sup> do observador e é medida em unidades de tempo a leste do meridiano de Greenwich. O LST é contínuo, e sem quantificação em fusos horários.

Isto significa que em qualquer lugar do mundo onde um indivíduo estiver observando a meia-noite local (medido pelo horário solar médio local, e não pelo tempo civil) no equinócio de Setembro (21 de Setembro), seu tempo local sideral (LST) será 0h. Um mês depois (em 21 de Outubro), o LST será 2h a meia-noite local, no dia 21 de Novembro o LST será 4h a meia-noite local, e assim por diante durante todo o ano.

Historicamente, as medidas de LST (das estrelas) e o conhecimento do GST foram cruciais para a navegação. O GST pode ser determinado usando *Ephemeris Time* ou *The Astronomical Almanac* - (estes manuais fornecem o GST à meia-noite para todos os dias do ano), desde que seja conhecida a hora local, a data e principalmente o GMT.

Este foi o pano de fundo da competição do século XVIII para inventar cronômetros precisos que poderiam ser usados a bordo de navios para fornecer medidas do GMT. Uma vez conhecido, os valores de GST e LST podem ser usados para determinar a longitude do observador usando Equation 7.

<sup>4</sup>A convenção internacional aprovada da IAU é que a longitude aumenta para o leste.

### 3.6 Relação entre LST, RA e ângulo horário

O **ângulo horário** (**Hour angle**–HA) de um corpo celeste é o ângulo medido na direcção Oeste em unidades de tempo, ao longo do equador celeste desde o meridiano do observador ao círculo de horas passando pelo corpo celeste. Portanto, representa o tempo (sideral) decorrido desde que esse objecto estava localizado no meridiano. Segue diretamente a partir desta definição que o LST é o ângulo horário do Primeiro Ponto de Áries (PPA). Esta equivalência é ilustrada na Figura 5, onde o HA de PPA é mostrado como a flecha preta (espessa) no equador, medida a partir do Oeste do meridiano local.

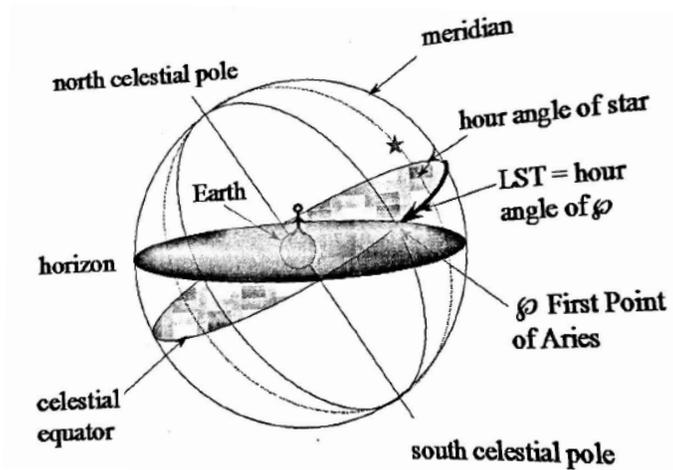


Figure 5: Esfera Celeste ilustrando a Equivalencia entre LST e HA do PPA.

A Figura 5 também mostra uma estrela (na direcção sudoeste da esfera celeste vista por um observador terrestre localizado no centro) apenas a curta distância a leste do Primeiro Ponto de Áries. A flecha preta clara entre o meridiano do observador e o círculo de horas que passa pela estrela marca o ângulo da hora da estrela.

A Figura 6 mostra uma vista por cima da figura anterior (Figura 5) que desloca perpendicularmente para o plano do equador celeste. Usando este diagrama, e com base na definição do Primeiro Ponto de Áries como o ponto Zero da *ascensão recta*–RA, pode-se deduzir uma relação entre o tempo sideral local, ascensão recta e o ângulo horário do objecto pelas equações abaixo,

Daí as relações:

$$LST = HA + RA \quad (8)$$

$$HA = LST - RA \quad (9)$$

$$RA = LST - HA \quad (10)$$

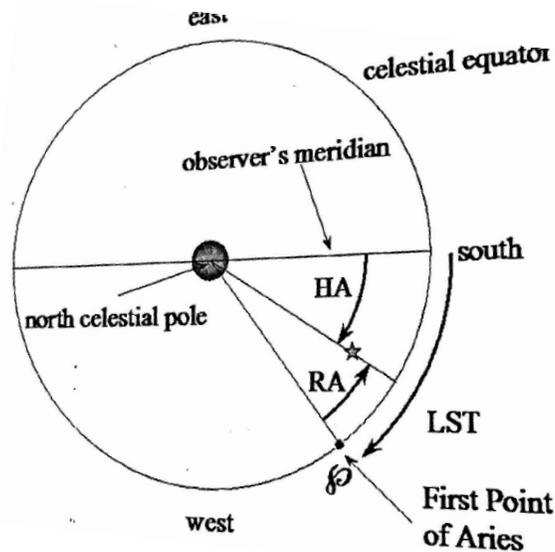


Figure 6: Projecção no plano equatorial da esfera celeste (Vista por cima).

### 3.7 Data Juliana (JD)

Para facilitar os dados cronológicos, os dias astronômicos começam ao meio-dia em Greenwich na Inglaterra. Esses dias são enumerados consecutivamente a partir de uma época que precede o período histórico. O dia juliano é expresso como um número inteiro, que indica o número completo de dias decorridos desde o início do período Juliano definido como o dia juliano zero, que começa no dia 1 de janeiro de 4713 A.C ao meio-dia em Greenwich, designado calendário proleptico juliano.

O calendário proleptico juliano é formado pela aplicação das regras do Calendário juliano antes da reforma de Julius César, e a Data Juliana (JD) especifica o instante particular de um dia, terminando o número do dia juliano com a fração do dia decorrido desde o meio-dia de Greenwich precedente. Por exemplo, o ano novo em 01/01/2000, às 12h UTI ocorre, na data JD 2451545.0.

Para calcular o número de dias Julianos procede-se da seguinte forma:

1. Expresse a data como Y M D, onde Y é o ano, M é o número do mês (Jan = 1, Feb = 2, etc.) e D é o dia do mês.
2. Se o mês for janeiro ou fevereiro, subtraí-se 1 do respectivo ano para obter um novo Y, e adiciona-se 12 ao mês para obter um novo M.
3. Por conveniência ignore a parte fracionária nos cálculos.

Assim:

$$A = Y/100 \quad (11)$$

$$B = A/4 \quad (12)$$

$$C = 2 - A + B \quad (13)$$

$$E = 365.25 \times (Y + 4716) \quad (14)$$

$$F = 30.6001 \times (M + 1) \quad (15)$$

$$JD = C + D + E + F - 1524.5 \quad (16)$$

**Note 1.** Calcule o dia juliano de 14 de Outubro de 1984.

**Solução:**

$$A = 1984/100 = 19 \quad (17)$$

$$B = 19/4 = 4 \quad (18)$$

$$C = 2 - 19 + 4 = -13 \quad (19)$$

$$E = 365.25 \times (1984 + 4716) = 2\,447\,175 \quad (20)$$

$$F = 30.6001 \times (10 + 1) = 336 \quad (21)$$

$$JD = -13 + 14 + 2\,447\,175 + 336 - 1524.5 \quad (22)$$

$$JD = 2\,445\,987.5 \quad (23)$$

As datas julianas para diferentes épocas do ano juliano são:

$$1900 \text{ January } 0.5 = JD2415020.0 \quad (24)$$

$$1925 \text{ January } 0.5 = JD2424151.0 \quad (25)$$

$$1950 \text{ January } 0.5 = JD2433282.0 \quad (26)$$

$$2000 \text{ January } 0.5 = JD2451544.0 \quad (27)$$

$$2050 \text{ January } 0.5 = JD2469807.0 \quad (28)$$

$$2100 \text{ January } 0.5 = JD2488069.0 \quad (29)$$

Por definição, um século juliano tem 36 525 dias, de modo que a duração média dos anos quase corresponde à translação da Terra, e um dia é definido como 86 400 segundos de tempo atômico internacional (TAI). Isto, é:

$$1 \text{ ano juliano} = 365,25 \text{ dias} = 8\,766 \text{ horas} = 525\,960 \text{ minutos} = 31\,557\,600 \text{ segundos}$$

$$1 \text{ dia} = 24 \text{ horas} = 1\,440 \text{ minutos} = 86\,400 \text{ segundos}$$

Os principais ciclos astronômicos são o dia, mês e ano, respectivamente baseado na rotação da Terra sobre seu eixo de simetria, a revolução da Terra sobre o Sol e a revolução da Lua sobre a Terra.

O ano tropical, que é baseado no período orbital da Terra em torno do Sol, é definido como o intervalo médio entre equinócios verais; corresponde ao ciclo das estações e é dada por (Laskar, 1986):

$$1ano\ tropical = 365^d.2421896698 - 0.00000615359T - 7.29 \times 10^{-10}T^2 + 2.64 \times 10^{-10}T^3 \quad (30)$$

em que  $T = (JD - 2451545.0)/36525$ , JD é o número de dias julianos.

## 4 Exercícios

1. Considerando 15:00 o tempo sideral local, qual é o ângulo horário de uma estrela com RA = 13:30? (*Resp: 1.5 h*)
2. Qual é a ascensão recta de um objecto localizado no meridiano de Greenwich?
3. Qual seria o tempo sideral local quando a estrela Regulus (também chamada de  $\alpha$  Leo) estiver localizada no meridiano do observador? Em que data Regulus transitaria (estando no meridiano) a meia noite local?
4. Usando a data juliana- JD actual (dia de hoje), e a hora universal (UT), calcula o tempo real do Sol ( $T$ ) usando a equação:

$$T = \frac{(JD + UT/24 - 2451545.0)}{365.25} \quad (31)$$

## Definições de coordenadas e termos posicionais

**Esfera Celeste:** uma esfera imaginária centrada na Terra e a qual estrela, etc., pode ser considerada fixada para fins de medições posicionais

**Pólos celestes (*Norte e Sul*):** a projeção do eixo de rotação da Terra para a Esfera celeste.

**Equador celeste:** a interseção da projeção do equador da Terra com a Esfera celeste.

**Eclíptica:** o grande círculo na Esfera celeste representando o caminho anual aparente do sol visto da Terra.

**Solstício:** as duas vezes no ano em que o Sol está diretamente acima do horário no meio-dia nos trópicos de Câncer ou Capricórnio.

**Equinox:** as duas vezes no ano em que o Sol está diretamente acima do cabeçalho ao meio-dia e todos os pontos do globo têm o mesmo dia e noite.

**Círculo de horas:** um grande círculo na esfera celeste que passa pelos pólos celestiais norte e sul.

**Zenite:** o ponto na Esfera celeste diretamente sobre o observador.

**Meridiano:** o grande círculo que passa pelos pólos celestiais norte e sul e o zênite do observador. Este é um caso especial de círculo de horas.

**Altitude:** o ângulo entre um objecto celeste e o horizonte do observador, em unidades angulares (com sinal positivo acima do horizonte) medido ao longo do grande círculo através do objeto e do zênite.

**Azimuth:** a medida angular da posição de um objecto no plano horizontal, medido a partir do norte em direção a leste.

**Ascensão recta (RA):** a distância angular de um corpo celeste medido para o leste ao longo do equador celeste em unidades de tempo desde o Primeiro Ponto de Áries até o círculo de horas passando pelo corpo.

**Declinação (Dec):** a distância angular (norte– positivo , sul– negativo) de um objecto medido a partir do equador celeste ao longo do círculo de horas passando pelo objecto.

**Primeiro Ponto de Áries:** é a interseção do equador celeste e da eclíptica no ponto onde o Sol se move do sul para o norte em Março de cada ano. Define o ponto zero da Ascensão Recta.

**Equinócio Vernal:** ou o equinócio de Março. Este é o momento até 21 de Março correspondente ao momento em que o Sol é localizado no Primeiro Ponto de Áries. Nesse período a noite dura 12 horas.

**Ângulo horário (HA):** o ângulo medido para o oeste ao longo do equador celeste em unidades de tempo desde o meridiano do observador até ao círculo de horas que passa pelo objecto celeste.

**Precessão dos Equinócios:** o movimento lento e contínuo para o oeste dos equinócios ao longo da Eclíptica resultante do movimento précessional de 26.000 anos do eixo de rotação da Terra. A RA e Dec de um objecto celeste, portanto, muda muito devagar com o tempo ao longo dos anos.

**Estrelas circumpolares:** estrelas que nunca se colocam abaixo do horizonte do observador.

**Parallax:** o ângulo em segundos de arco pelo qual estrelas próximas parecem se mover contra as estrelas de fundo como resultado do movimento da Terra sobre o Sol.

## Definições relativas ao tempo

**Tempo Sidereal:** é o tempo medido em relação às estrelas que são consideradas fixas na Esfera celeste.

**Dia Sidereal:** tempo entre transitos sucessivos do PPA através do meridiano do observador. 1 Dia Sidereal = 23h56m4.091s do Tempo Solar Médio. O dia Sidereal começa com a passagem do Primeiro Ponto de Áries através do Meridiano do Observer.

**Greenwich Sidereal Time (GST):** o tempo Sidereal, medido no meridiano de Greenwich.

**Tempo Sidereal Local (LST):** o Tempo Sidereal na localização de um observador é igual ao ângulo da hora do Primeiro Ponto de Áries.

**Tempo solar aparente:** o tempo medido pelo movimento do Sol real, isto é, tempo medido com um relógio de sol.

**Mean Sun:** um Sol fictício que viaja ao longo do Equador celeste a velocidade constante, e é a base do tempo civil que mantém na Terra. Relógios atômicos muito precisos são usados para calcular o sol médio.

**Tempo solar médio:** tempo medido em relação ao sol médio.

**Equação do Tempo:** a diferença entre Tempo Solar Médio e Tempo solar aparente.

**Tempo médio de Greenwich (GMT):** o tempo médio solar medido no meridiano de Greenwich.

**Tempo Universal (UT):** tempo médio especificado com precisão por astrônomos em todo o mundo. É aproximadamente igual a GMT.