

MEMÓRIAS
DA
ACADEMIA DAS CIÊNCIAS
DE
LISBOA

CLASSE DE CIÊNCIAS

TOMO XLV

Sistemas de medida de tempo

JOSÉ JOAQUIM PEREIRA OSÓRIO



ACADEMIA DAS CIÊNCIAS
DE LISBOA

LISBOA • 2018

Sistemas de medida de tempo

JOSÉ JOAQUIM PEREIRA OSÓRIO

jposorio@fc.up.pt

1. INTRODUÇÃO

No estado actual de desenvolvimento da nossa civilização, quando numa competição desportiva os recordes são batidos ao centésimo do segundo, quando se programa a chegada de um ATV (Automated Transfer Vehicle) à ISS (International Space Station) em órbita à volta Terra com velocidade de 27584 km/h, quando a distância da Terra à Lua com precisão centimétrica é avaliada pelo tempo de ida e volta de um feixe de raios laser, torna-se clara a importância fundamental de um **Sistema de Medida de Tempo (SMT)**. A exactidão no conhecimento de uma Época – instante da ocorrência de qualquer fenómeno físico observável, ou na avaliação de um Intervalo de Tempo – tempo decorrido entre duas épocas, fica fortemente condicionada pelo SMT utilizado. Inversamente, a escolha de um SMT para avaliação de uma Época ou de um Intervalo de Tempo depende do tipo de problema em causa: Um relógio com a exactidão de 10^{-3} segundos é suficiente para avaliar tempos em competições desportivas enquanto a manobra de aproximação de dois veículos espaciais requer o conhecimento do tempo com a exactidão de 10^{-6} segundos; a determinação do tempo que os raios LASER demoram a atingir os reflectores na Lua e a regressar à Terra exige uma exactidão na medida do tempo de 10^{-9} segundos.

Qualquer SMT é baseado num fenómeno físico periódico observável. Dependendo desse fenómeno, assim teremos diferentes SMT.

2. CARACTERÍSTICAS DE UM SISTEMA DE MEDIDA DE TEMPO

Um SMT deverá satisfazer as seguintes condições:

- Capacidade de gerar um intervalo unitário constante;
- Continuidade de operação permitindo relacionar épocas afastadas;
- Possibilidade de acumulação desses intervalos de modo a definir uma época;
- Facilidade de acesso ao sistema.

Há ainda a necessidade de fixar uma origem para o SMT.

A materialização de um SMT é baseada na observação de um fenómeno periódico no âmbito da Astronomia ou da Física Atómica. O período do fenómeno observado é a escala medida para o Sistema em causa. Uma fracção ou um múltiplo dessa escala definem a Unidade de Tempo escolhida, hoje em dia um **Segundo (1s)**. Maiores unidades de tempo, como dias, semanas, anos ou séculos, resultam da acumulação dos segundos. A caracterização da origem do SMT é **conseguida através da fixação de um acontecimento. A origem do SMT e a forma como os segundos são**

acumulados em unidades maiores dá origem a um Calendário. Para o nosso dia-a-dia somos sensíveis ao Calendário Gregoriano, cuja origem é o nascimento de Cristo e em que os segundos são acumulados em minutos, horas, dias, meses, anos, séculos e milénios. Mas, neste calendário, os meses não têm todos o mesmo número de dias, o mesmo acontecendo com os anos, por causa dos anos bissextos. Assim, no calendário Gregoriano, relacionar duas épocas muito afastadas no tempo conduz a um exercício de contagem não muito agradável. A Astronomia recorre ao calendário Juliano onde os segundos são acumulados em dias de 86400 segundos e cuja origem é bem mais remota do que o nascimento de Cristo, permitindo assim relacionar, facilmente, por uma simples subtracção, fenómenos astronómicos muito afastados no tempo. Pelo contrário, no calendário do GPS (Global Positioning System) os segundos são acumulados em semanas de 604800 segundos e a sua origem coincide com as 0 horas do dia 6 de Janeiro de 1980. Este calendário, para além de relacionar duas épocas afastadas através de duas simples subtracções, evidencia a importância que o segundo tem para os utilizadores do SMT associado a este calendário.

3. TIPOS DE SISTEMAS DE MEDIDA DE TEMPO

De acordo com o fenómeno periódico observado para a materialização do Sistema, os SMT dividem-se em três grandes grupos:

- Sistemas de Medida de Tempo Baseados na Rotação da Terra;
- Sistemas de Medida de Tempo Baseados no movimento de Corpos Celestes;
- Sistemas de Medida de Tempo Baseados em fenómenos da Física Atómica.

Os primeiros e mais naturais SMT são baseados na Rotação da Terra. Como a velocidade angular de rotação da Terra não é constante, **o intervalo unitário que geram também não é constante**, ou seja, a unidade de tempo **não é compatível com o grau de exigência imposto em muitas das aplicações** da vida moderna. Contudo, ao estarem ligados à sucessão natural dos dias e das noites ou, por outras palavras, à presença do Sol acima do plano do horizonte, continuam a desempenhar um papel importante na medição do tempo.

Os sistemas baseados no movimento de Corpos Celestes terão certamente uma origem remota, quando o corpo celeste utilizado era o nosso satélite natural, a Lua. Contudo, serão as leis de Kepler, as observações astronómicas iniciadas por Galileu e, finalmente, o advento dos computadores na segunda metade do século passado, que vão facilitar a materialização de um SMT, com uma unidade, de elevada exactidão, obtida por cálculos no âmbito da astrodinâmica. O problema destes SMT é, obviamente, **a dificuldade de acesso ao Sistema.**

A realização **precisa e acessível** do Segundo tornou-se possível, na década de 50 do século passado, com o desenvolvimento de padrões de frequência baseados na energia da transição quântica de átomos. Com efeito, o conhecimento da quantização da energia atómica permitiu o desenvolvimento de relógios governados pelas frequências naturais de ressonância de átomos convenientes tais como os de **Césio**, de Rubídio ou de Hidrogénio.

4. SISTEMAS DE MEDIDA DE TEMPO BASEADOS NA ROTAÇÃO DA TERRA

A materialização destes Sistemas é baseada num conceito simples: Escolhida uma referência no Espaço, que não participe na rotação da Terra, **1 Dia** será o intervalo de tempo decorrido entre duas passagens superiores consecutivas, dessa referência, no Meridiano do observador. Tratando-se do **Ponto Vernal**, o sistema e a escala observada são designados, respectivamente, por **Tempo Sideral** e **Dia Sideral**. Se a referência for o centro da nossa estrela, isto é, o **Centro do Sol**, o sistema e a escala observada são designados por **Tempo Solar** e **Dia Solar**.

4.1 – Tempo Sideral

O ponto da Esfera Celeste que representa o nodo ascendente, no Equador Celeste, da trajectória anual aparente do Sol, relativamente ao fundo de estrelas, é designado por Ponto Vernal. Por outras palavras, o Ponto Vernal é o ponto da Esfera Celeste onde o Sol se projecta no Equinócio da Primavera e que pertence à intercepção do Equador Celeste com o plano da Eclíptica (Figura 1).

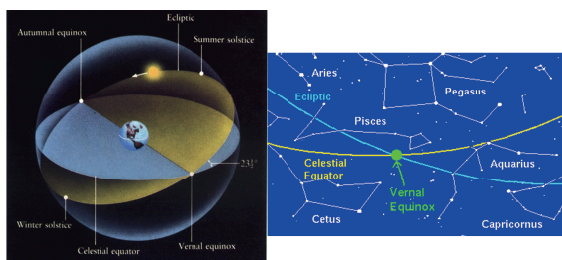


FIGURA 1
Ponto Vernal.

O Ponto Vernal é, portanto, a referência convencional para definir **1 Dia de Tempo Sideral** e seus submúltiplos:

1 Dia Sideral – Intervalo de tempo entre duas passagens superiores sucessivas do Ponto Vernal num mesmo Meridiano.

$$1 \text{ Segundo de Tempo Sideral} = \frac{1}{86400} \times 1 \text{ Dia Sideral}$$

O segundo (s) de Tempo Sideral tem como múltiplos o minuto (m) e a hora (h) de acordo com o sistema sexagesimal.

Como o ângulo horário de um astro é avaliado ao longo do Equador Celeste, em sentido retrógrado, a partir do Meridiano do observador, o Tempo Sideral mede, portanto, o **ângulo horário do Ponto Vernal**. O SMT assim obtido é designado por **Tempo Sideral Local (TSL)**. O TSL é importante para que um astrónomo possa saber com exactidão o instante em que as estrelas e outros corpos celestes passam no seu Meridiano. Mas, para efeito de uma avaliação rigorosa do Tempo Sideral e da sua publicação em Almanques e Efemérides Astronómicas, permitindo que em qualquer ponto da Terra seja possível conhecer o TSL, torna-se necessário reduzir todos os valores a um mesmo meridiano. Esse meridiano é, naturalmente, o Meridiano de Greenwich, origem da avaliação da longitude de um lugar. Assim, representando por TSG_r o Tempo Sideral de Greenwich (Figura 2), a sua relação com o TSL envolve, simplesmente, a longitude:

$$\text{TSL} = \text{TSG}_r + \lambda_e \quad (4.1)$$

onde se representa por λ_e a longitude do lugar, contada positivamente para Este.

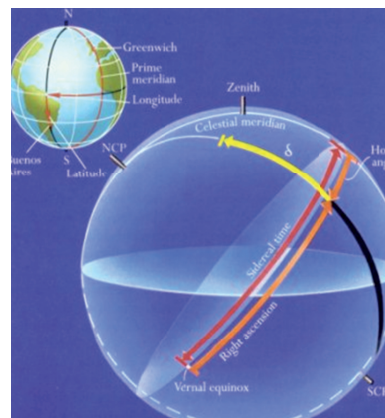


FIGURA 2
Tempo Sideral de Greenwich.

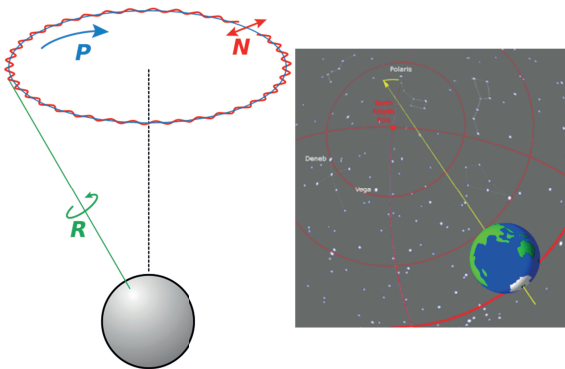


FIGURA 3
Precessão e Nutação Astronómicas.

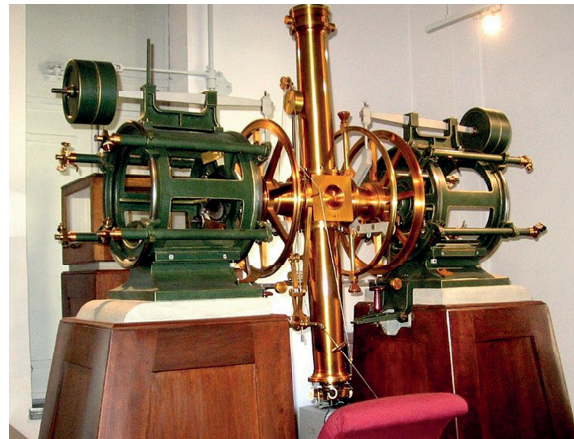


FIGURA 4
Círculo Meridiano.

Será possível construir um relógio que conserve o segundo de TS como acabou de ser definido? Por outras palavras, será possível construir um relógio mecânico que, todos os dias, marque, rigorosamente, 0h 0m 0s no preciso instante em que o Ponto Vernal está a passar no Meridiano desse lugar? A resposta é não. Com efeito, o eixo de rotação da Terra apresenta, relativamente ao fundo de estrelas, dois movimentos periódicos, devidos aos conhecidos fenómenos de Precessão e Nutação Astronómicas (Figura 3). Os modelos matemáticos para a Precessão e a Nutação **são desenvolvidos e actualizados sob a responsabilidade do IERS** (International Earth Rotation and Reference Systems Service) e aprovados pela IAU (International Astronomical Union) durante as suas Assembleias Gerais que se realizam de três em três anos.

Nestas condições, designa-se por Ponto Vernal verdadeiro de uma determinada época, o nodo ascendente da Eclíptica verdadeira, dessa época, no Equador verdadeiro dessa mesma época. Estes dois planos estão em movimento devido à Precessão e à Nutação. O SMT materializado a partir de observações das passagens Meridianas do Ponto Vernal verdadeiro é designado por Tempo Sideral Aparente (TSA). O Tempo Sideral Aparente Local (TSAL) e o Tempo Sideral Aparente de Greenwich (TSAGr) continuam a estar relacionados pela expressão (4.1). Estas duas formas de TSA podem ser obtidas a partir da observação de passagens meridianas de corpos celestes de ascensão recta conhecida (Figura 4).

O intervalo de tempo designado por Dia Sideral Aparente não é, portanto, constante, apresentando variações devidas à Precessão e à Nutação Astronómicas. Mas, enquanto a Precessão introduz uma variação da duração do Dia Sideral sempre no mesmo sentido, logo, de fácil modelação, o efeito da Nutação Astronómica na duração do dia Sideral é periódico e de período curto, o que torna este efeito incompatível com a materialização de um relógio. Assim, corrigindo do efeito da Nutação Astronómica as coordenadas do Ponto Vernal e dos corpos celestes observados, o SMT resultante é designado por **Tempo Sideral Médio (TSM)**. Este Ponto Vernal calculado, designado por Ponto Vernal Médio ou Equinócio Médio, continua a ser dinâmico, mas agora apenas por efeito da Precessão Astronómica. Tal como anteriormente, dependendo do Meridiano a que está referida a origem do Dia Sideral Médio, teremos o TSM local (TSM_L) e o TSM de Greenwich (TSM_{Gr}), continuando a ser a expressão (4.1) a relacionar os dois.

A unidade fundamental do Tempo Sideral Médio é o Dia Sideral Médio, intervalo de tempo entre duas passagens superiores sucessivas do Ponto Vernal Médio num mesmo Meridiano. Continua a ser dividido em 86400 partes, dando origem a 1s de Tempo Sideral Médio que, por sua vez, em acumulação, de acordo com o sistema sexagesimal, tem como múltiplos o minuto e a hora.

A diferença entre o Tempo Sideral Aparente e o Médio é designada por **Equação dos Equinócios, que pode ser representada por uma função periódica complexa com amplitude máxima de cerca de 1 segundo**. A Equação dos Equinócios representa a ascensão recta do Equinócio Médio referida ao Equador e Equinócio Verdadeiros. Os seus valores diários, que permitem relacionar estes dois SMT, estão disponíveis em qualquer Almanaque Astronómico bem como na secção do Tempo no portal da internet do IERS; os programas, em C, para o seu cálculo encontram-se disponíveis na página da IAU Standards Of Fundamental Astronomy (SOFA). A Equação dos Equinócios tem como termo de primeira ordem a Nutação em Longitude:

$$TSAL = TSML + \nabla\psi\cos(\varepsilon) + O(10^{-4}s) \quad (4.2)$$

onde se representa por $\nabla\psi$ a componente da Nutação em longitude e por ε a obliquidade da Eclíptica. Os termos da ordem de $10^{-4}s$ são modelados por uma série que envolve a longitude do nodo ascendente da Lua e a longitude média do Sol.

Como resultado do movimento de translação da Terra, a diferença dos tempos de passagem do Equinócio e do Sol num mesmo meridiano aumenta, diariamente, cerca de 4 minutos (Figura 5).

Consequentemente, no Equinócio da Primavera, quando o Sol se encontra no Ponto Vernal, passam os dois simultaneamente no Meridiano do observador, mas, seis meses depois, o desfaseamento das suas passagens será já de 12 horas. Esta situação faz com que o Tempo Sideral seja pouco cómodo para utilização na vida corrente, organizada na sucessão natural dos dias e das noites. Por isso, o Tempo Sideral é, **essencialmente, usado** no domínio da Astronomia.

4.2 – Tempo solar

Para definir o Tempo Solar é necessário escolher como referência para origem dos dias o centro geométrico do disco solar e, além disso, considerar o movimento aparente do Sol em relação à Terra. Este movimento é a ilusão óptica resultante do movimento de translação da Terra em volta do Sol e, como tal, regido pelas leis de Kepler. Assim, neste movimento aparente, o Sol descreve, aproximadamente, uma elipse de excentricidade da ordem de 0.01673, estando a Terra num dos focos. De acordo com a lei das áreas, esse movimento aparente do Sol não é uniforme, sendo mais rápido no pericentro, ponto onde a Terra e o Sol estão mais próximos. Na prática, este efeito traduz-se pela presença do Sol 185 dias/ano no Hemisfério Norte e apenas 180 dias/ano no Hemisfério Sul. Este movimento é, ainda, perturbado pela acção dos outros planetas sobre a Terra, em especial os de maior massa e os mais próximos. O que acabou de ser exposto evidencia, desde logo, que a escolha do Centro do Sol como referência para a

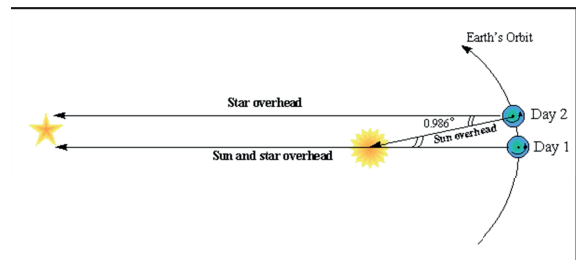


FIGURA 5
Movimento de Translação da Terra.



FIGURA 6
Relógio de Sol.

materialização de um dia irá conduzir a um sistema não uniforme, o **Tempo Solar Verdadeiro**, incompatível com um relógio; corrigindo o ângulo horário do Sol destas irregularidades o SMT associado é designado por **Tempo Solar Médio**. Na escala de Tempo Solar Aparente ou Tempo Solar Verdadeiro é avaliado o ângulo horário do Sol Verdadeiro. Os seus valores podem ser modelados pela soma de um polinómio de segundo grau no tempo (variável independente das equações da dinâmica) com termos periódicos que traduzem a sua variação devida à excentricidade da órbita e à acção gravitacional dos planetas. O **Dia Solar Verdadeiro** é o intervalo de tempo entre duas passagens superiores sucessivas do Sol no meridiano do observador e cada época dessa passagem superior é designada por Meio-Dia Solar Local (LAN – Local Apparent Noon); representa o instante em que o Sol está mais alto no horizonte do observador. Mas o LAN tem uma variação diária significativa que torna o Tempo Solar Verdadeiro sem qualquer interesse para os Sistemas de Conservação da Hora. Contudo, nos nossos dias, em que o buraco do ozono permite a entrada, na atmosfera terrestre, de radiação solar prejudicial à nossa pele, a tomada de consciência da aproximação desse instante é importantíssima para a saúde humana. Também a orientação dos painéis solares para a produção de energia solar deve ter em conta o LAN. O Tempo Solar Verdadeiro é, no fundo, a informação que nos é dada pelos bem conhecidos relógios de Sol (Figura 6).

Para a obtenção do Tempo Solar Médio é necessário definir um Sol fictício, isto é, um Sol que tenha, no Plano do Equador, um movimento uniforme ou, por outras palavras, um Sol cuja derivada do ângulo horário em ordem ao tempo seja constante. Esse Sol fictício é designado por Sol Médio e o seu ângulo horário por Tempo Solar Médio. O modelo matemático para o ângulo horário do Sol

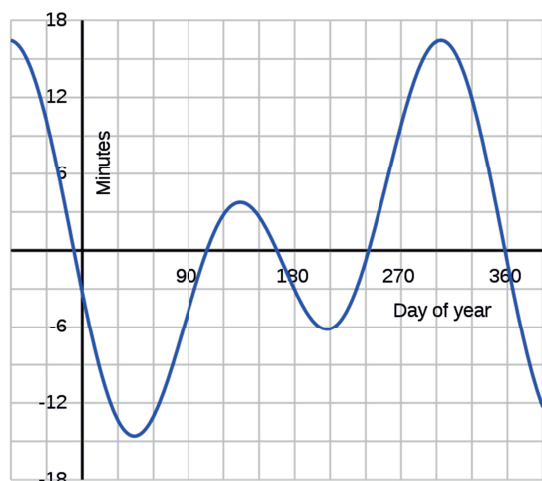


FIGURA 7
Gráfico da Equação do Tempo.

Médio obtém-se retirando o termo de segundo grau no tempo e os termos periódicos no modelo do ângulo horário do Sol Verdadeiro. Esses termos retirados constituem a designada Equação do Tempo:

Equação do Tempo = Tempo Solar Verdadeiro
– Tempo Solar Médio

A Equação do Tempo assume valores positivos e negativos. Os seus valores são publicados na forma de tabelas ou gráficos (Figura7) e o seu cálculo pode ser obtido no software disponibilizado no SOFA ou no IERS Conventions Center. Como ao fim de um ano tudo se repete, o valor médio da Equação do Tempo durante um ano deverá ser zero.

Define-se **Dia Médio** como o intervalo de tempo necessário para que o ângulo horário do Sol Médio aumente de 2π , isto é, o intervalo de tempo compreendido entre duas passagens superiores sucessivas do Sol Médio no mesmo meridiano.

A Unidade de Tempo, o Segundo, foi definida com base na rotação da Terra como $1/86400$ da duração do dia solar médio.

A relação entre o dia solar médio e o dia sideral médio é dada por:

1 dia solar médio = 1.002 737 909 35 dias siderais médios

= 24h 3m 56.555s de tempo sideral médio

4.2.1 – Tempo Universal – UT0 e UT1

Analogamente ao que foi referido para o Tempo Sideral, há, também, necessidade de conhecer universalmente o Tempo Solar Médio avaliado a partir de um meridiano convencional. De novo, esse meridiano é o Meridiano de Greenwich.

O Tempo Médio de Greenwich, com a origem do dia no seu anti-meridiano, designa-se por **Tempo Universal (UT – Universal Time)**, ou seja, o UT é contado a partir das 0 horas (meia-noite) tendo por unidade a duração do dia solar médio

$UT = 12h + \text{Ângulo Horário de Greenwich do Sol Médio}$

Presentemente, é considerado em duas formas, UT0 e UT1.

UT0 é a forma do UT que, inicialmente, era obtido, em qualquer lugar, por observações ópticas e fotográficas do movimento diurno de estrelas; essas observações têm vindo a ser substituídas por medidas VLBI (Very Long Baseline Interferometry) para **rádios fontes extragalácticas**, os Quasars.

No início da década de 20 do século passado, o desenvolvimento da transmissão de sinais de tempo, via rádio, criou a oportunidade para unificar as medidas de Tempo Universal. Com esse objectivo, foi criado o Bureau Internacional da Hora (BIH), com sede no Observatório de Paris. Começou a operar em 1912, embora os seus Estatutos fossem oficialmente aprovados apenas em 1919. As suas actividades incluíam não só a determinação e a disseminação da hora mas, também, áreas próximas como a Rotação da Terra, os Sistemas de Referência e, mais tarde, o Tempo Atómico.

O UT0 foi inicialmente conservado por relógios de pêndula (Figura 8). O avanço tecnológico das observações (Figura 9), por um lado, e, por outro, a evolução dos relógios para osciladores de quartzo (Figura 10) levaram os astrónomos a detectar variações no UT0 devidas ao movimento do pólo terrestre.

Este movimento é avaliado num referencial no qual a parte sólida da Terra se considera fixa, ou seja, um referencial centrado e fixo na Terra (ECEF – Earth Centered, Earth Fixed reference frame) e tem uma grandeza da ordem de alguns metros ($0.1 \approx 3m$). Este movimento,

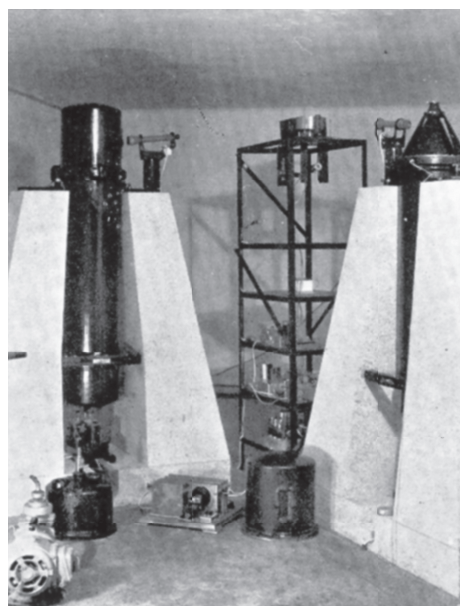


FIGURA 8
Relógios de Pêndula do Observatório Astronómico
“Prof. Manuel de Barros”.

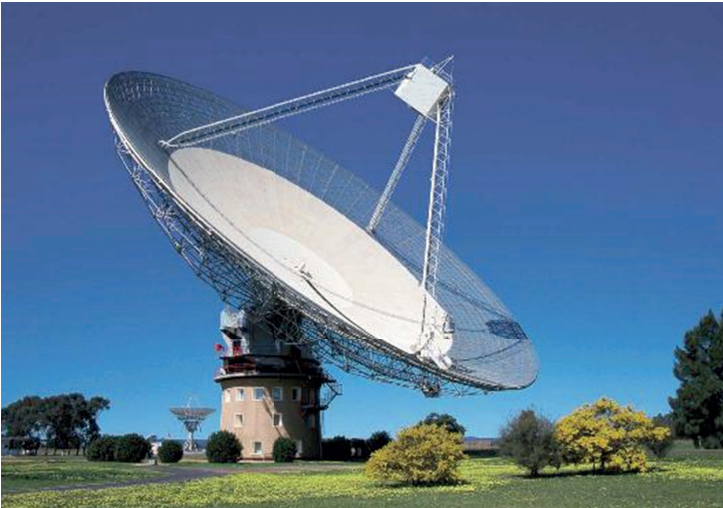


FIGURA 9
Radiotelescópio.

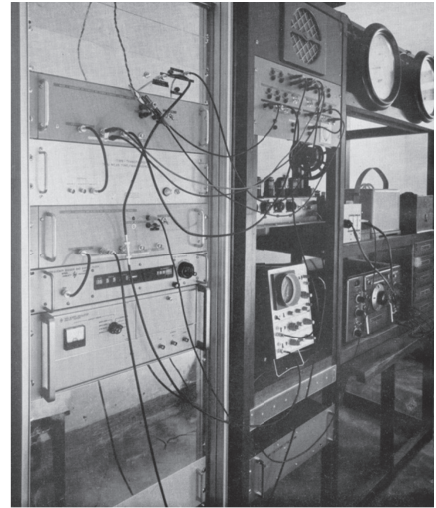


FIGURA 10
Sinais de Tempo a partir de Relógio de Quartzo.

monitorizado no Centro de Orientação da Terra do IERS, está ilustrado na Figura 11. As coordenadas, em segundos de arco, do pólo verdadeiro, relativamente ao **pólo médio de 1900.0** estão **publicadas, desde 1962, nos boletins A e B do IERS, disponíveis**, em versão digital, na internet.

Dada a influência do movimento do pólo terrestre nas determinações do UT0, reconheceu-se a necessidade de introduzir uma nova escala de Tempo Universal, o UT1, mais uniforme.

O UT1 começou por ser uma versão melhorada do UT0, em que a longitude da estação de observação era corrigida do movimento do pólo. Porém, como a derivada em ordem ao tempo do ângulo horário do Sol Médio é a velocidade angular de rotação da Terra, ω , a definição do UT1 foi alterada.

Presentemente, na sequência de Resoluções da União Astronómica Internacional, na sua Assembleia Geral no ano 2000, UT1 é definido como

uma função linear de θ , Ângulo de Rotação da Terra (ERA – Earth Rotation Angle). ERA é o ângulo geocêntrico entre as direcções de dois pontos no plano do Equador: um, na esfera celeste geocêntrica, designado por Origem Intermédia Celeste (CIO), que não participa da rotação da Terra; outro, à superfície da Terra, designado Origem Intermédia Terrestre (TIO), rodando, naturalmente, com a Terra. Como, $d\theta/dt = \omega$, o UT1 é, então, definido a partir do ERA. Os valores de UT1, assim determinados, **têm uma precisão da ordem dos** microsegundos.

As unidades de tempo acumulam-se segundo o Calendário Gregoriano adoptado por uma grande parte dos Países. Neste calendário, que

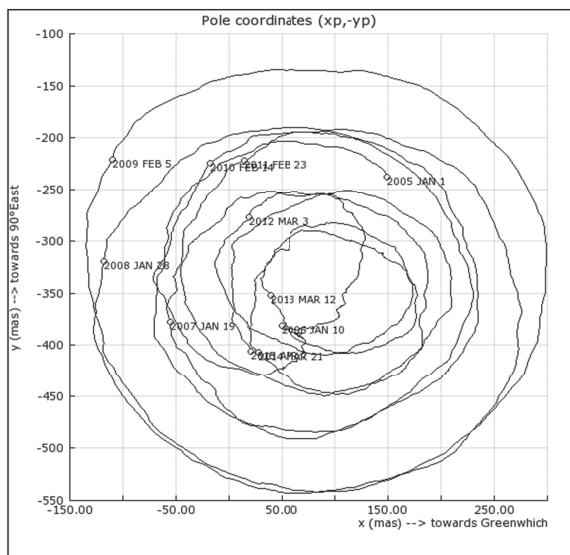


FIGURA 11
Movimento do Pólo.

nos é tão familiar, calcular intervalos de tempo entre épocas afastadas não é, como foi já referido, tarefa fácil.

Em muitas aplicações, torna-se conveniente utilizar uma contagem contínua de dias, em vez do calendário civil, para o cálculo de intervalos de tempo. Frequentemente, é usada a Data Juliana (JD).

O Dia Juliano é representado pelo número de dias decorridos desde o meio-dia médio de Greenwich de 1 de Janeiro do ano 4713 A.C. A JD de um dado instante é o dia Juliano seguido da fracção de dia decorrida desde o meio-dia anterior. A Data Juliana Modificada (MJD) é uma versão abreviada da JD

$$\text{MJD} = \text{JD} - 2\,400\,000.5$$

Em qualquer Almanaque Astronómico está publicada a MJD às 0h de cada dia do calendário Gregoriano.

4.3 – Precisão deste tipo de Sistemas de Medida de Tempo

Todos os SMT baseados na Rotação da Terra, que se acabou de descrever, têm a sua importância e são utilizados de acordo com o problema em causa. Na sua definição e materialização foram sendo ultrapassadas as irregularidades introduzidas na definição do Segundo tendo em linha de conta os fenómenos naturais que os afectam e cada um desses SMT surgiu com o intuito de melhorar o anterior. Assim, partindo do Tempo Sideral Aparente, passou-se ao Tempo Sideral Médio tendo em linha de conta a Nutação Astronómica e separando-os pela Equação dos Equinócios; introduziu-se o Tempo Solar para evitar a troca periódica do dia com a noite a que nos conduziria um Sistema de Tempo Sideral a avaliar o nosso dia-a-dia. Corrigiu-se o Tempo Solar Verdadeiro das irregularidades introduzidas, na duração do Dia Solar, pela excentricidade da órbita da Terra e pela acção gravitacional dos outros planetas do Sistema Solar passando-se ao Tempo Solar Médio através da Equação do Tempo. Definiu-se um Tempo Universal; a materialização do Dia Solar por observações astronómicas em estações distribuídas por toda a Terra permitiu definir o UT0; a substituição das observações ópticas e fotográficas por observações VLBI para Quasars, permitiu detectar irregularidades no Dia Solar, de acordo com a longitude do observatório, compatíveis com o Movimento do Pólo. Passou-se ao UT1 entrando em linha de conta com este movimento. De acordo com as Resoluções aprovadas na Assembleia Geral da IAU em 2000, o UT1 passou a ser determinado como uma função linear do Ângulo de Rotação da Terra, ERA.

A questão que naturalmente se levanta é sobre a precisão de 1s de UT1. Ele terá sempre a mesma duração ao longo dos anos? A resposta é não, pois a velocidade Angular de Rotação da Terra não é constante e está com tendência a diminuir de uma forma não uniforme e não modelável, pelo menos até agora. Como consequência desta aceleração angular negativa e irregular, o intervalo de tempo que define um Dia de UT1 será cada vez mais longo o que afecta a duração do Segundo, definido como 1/86400 do Dia Solar. A avaliação desta nova irregularidade é caracterizada por um parâmetro designado por Comprimento do Dia (LOD – Length Of Day) e que representa a diferença entre a duração de um dia e a sua duração nominal, avaliada em milissegundos de UT1 (Figura 12). Nestas condições, um relógio fornecendo o segundo de UT1 apresenta uma incerteza de ± 3 milissegundos / dia.

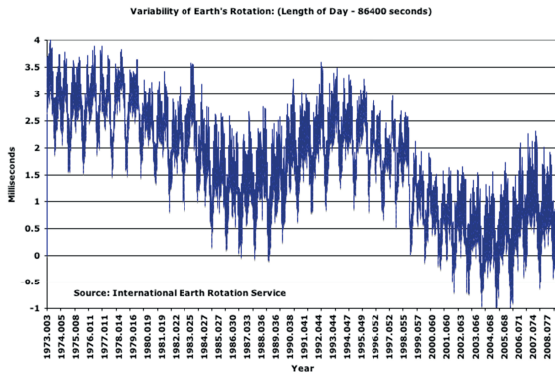


FIGURA 12
Gráfico da variação do Comprimento do Dia.

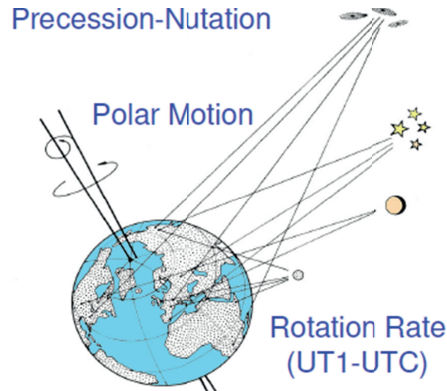


FIGURA 13
Parâmetros da Orientação da Terra.

É, sem dúvida, o Tempo Solar o que mais se ajusta à organização da nossa vida, toda ela muito influenciada pela sucessão natural dos dias e das noites, como foi já referido. Porém, o desenvolvimento de novas tecnologias, nomeadamente nos processos de conservação da hora, revelou claramente irregularidades no movimento de Rotação da Terra (Figura 13), ou seja, a **impossibilidade de obter uma unidade de tempo constante, mesmo com o UT1.**

5. SISTEMAS DE MEDIDA DE TEMPO BASEADOS NO MOVIMENTO DE CORPOS CELESTES

5.1 – Tempo de Efemérides (ET)

No princípio da década de 30, do século passado, as discrepâncias entre as posições calculadas de astros do Sistema Solar e as suas posições observadas, bem como os desenvolvimentos na tecnologia dos Relógios, nomeadamente os Relógios de Quartzo, rapidamente mostraram que a Rotação da Terra não era uniforme, isto é, a velocidade angular, ω , não era constante. O Sistema de Tempo baseado na Rotação da Terra, utilizado até então, não era uniforme, ou seja, não permitia gerar uma unidade de Tempo constante. Os Osciladores de Quartzo foram os primeiros mecanismos de Conservação da Hora a exceder a exactidão da própria Terra.

Foi, então, introduzido um novo Sistema de Tempo “uniforme”, baseado no movimento orbital de astros do Sistema Solar, designado por **Tempo de Efemérides (ET)**, que entrou em utilização em 1956, de acordo com as Resoluções da IAU na sua Assembleia Geral de 1952. Como variável independente das equações da Dinâmica, criava, naturalmente, um sistema uniforme.

Definido pelo movimento orbital da Terra em volta do Sol, o Tempo de Efemérides foi inicialmente determinado a partir de observações da Lua, com uma câmara especial, desenvolvida, em 1951, no Observatório Naval de Washington.

O **Segundo de Efemérides** foi definido como a fracção **1/31,556,925.9747 do Ano Trópico** (intervalo de tempo para que a longitude eclíptica do Sol aumente 360°).

Não sendo de fácil acesso, foi essencialmente utilizado nas efemérides dos corpos do Sistema Solar, não tendo interesse nas aplicações da vida corrente. Por isso mesmo, o ET nunca foi distribuído por sinais horários; era, apenas, acessível através da publicação das diferenças para o UT1.

A invenção em 1955 do relógio atômico de césio levou a que, a partir de 1959, a materialização secundária do tempo de efemérides passasse a ser feita com este tipo de relógios, embora a definição de 1s de ET fosse mantida.

5.2 – Tempo Dinâmico Terrestre (TDT) e Tempo Dinâmico Baricêntrico (TDB)

Reconhecendo que o ET não tinha em linha de conta a Teoria da Relatividade e que eram introduzidas, devido à dilatação do tempo, discrepâncias da ordem de 2×10^{-3} segundos entre o tempo próprio de um relógio em repouso relativamente à superfície da Terra e o tempo coordenado de um Sistema de Referência com origem no centro de massa do Sistema Solar, a UAI, na sua XVI Assembleia Geral (Grenoble, 1976) decidiu que, a partir de 1 de Janeiro de 1984, o ET seria substituído por duas novas escalas de tempo:

- Tempo Dinâmico Terrestre (TDT) ou, abreviadamente, **Tempo Terrestre (TT)**, quando os movimentos dos Corpos Celestes e dos Satélites Terrestres (Figura 14) forem avaliados num Sistema de Referência Geocêntrico (origem no centro de massa da Terra);
- **Tempo Dinâmico Baricêntrico (TDB)**, para movimentos dos Corpos Celestes e das sondas interplanetárias avaliados num Sistema de Referência Baricêntrico (origem no centro de massa do Sistema Solar, próximo do centro de massa do Sol).

Com 1 Segundo materializado por relógios atômicos e com o 1 Dia de 86400 segundos ao nível do Geóide, o TT é a variável independente nas efemérides geocêntricas.

Por razões de continuidade o TT foi considerado coincidente com o ET em 1 de Janeiro de 1984.

O TDB é uma escala de tempo coordenado relativista, que tem em linha de conta a dilatação do tempo, utilizado no cálculo de órbitas e efemérides astronómicas de planetas, asteróides, cometas e sondas interplanetárias dentro do Sistema Solar (Figura 15).

A Época de Referência de dados astrométricos modernos, designada J2000.0, é 2000 Janeiro 1, 12^h TT (JD 2451545.0 TT).

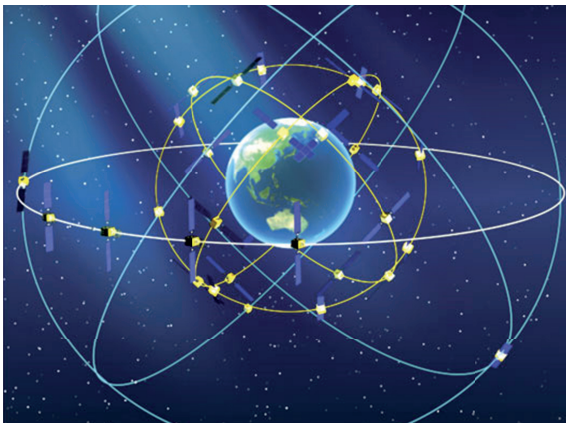


FIGURA 14
Órbitas Geocêntricas.

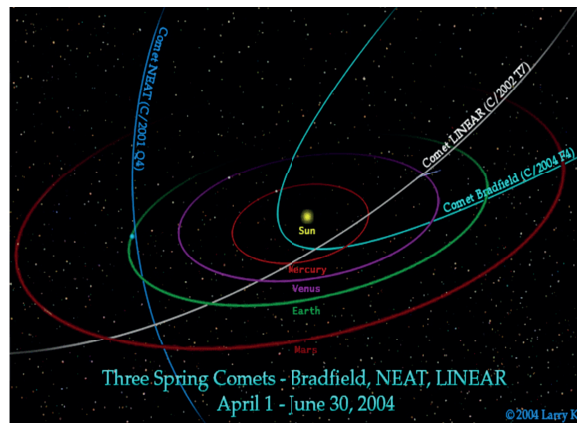


FIGURA 15
Órbitas Heliocêntricas.

6. SISTEMAS DE MEDIDA DE TEMPO BASEADOS EM FENÓMENOS DA FÍSICA ATÓMICA

De acordo com as leis da Mecânica Quântica os átomos só podem apresentar um número discreto de estados energéticos associados à nuvem electrónica. Um campo electromagnético com uma frequência adequada permite que um electrão salte de um nível energético para outro mais elevado. Inversamente, quando um electrão, num átomo excitado, passa de um nível energético para outro inferior emite radiação electromagnética. A frequência, (ν), da radiação capaz de produzir estas transições hiperfinas (associadas à interacção do momento magnético do núcleo com o momento magnético dos electrões) é designada por frequência de ressonância e é directamente proporcional à energia a ela associada, ($E_2 - E_1$), sendo a constante de proporcionalidade a constante de Plank (h):

$$\frac{E_2 - E_1}{\nu} = h \quad h = 6.62606957(29) \times 10^{-34} \text{J.s}$$

Um relógio atómico utiliza esta quantização da energia atómica e baseia-se no princípio de que numa amostra pura de átomos de um isótopo, de um mesmo elemento, a frequência de ressonância é a mesma para todos os átomos. É possível avaliar a frequência da energia destas transições e os átomos de Césio ($^{133}_{55}\text{C}$), com uma distribuição electrónica por níveis energéticos dada por 2, 8, 18, 18, 8, 1, são dos que apresentam melhores condições para estas medidas: 54 dos seus electrões completam níveis energéticos, de acordo com as leis de distribuição electrónica, não influenciando, portanto, as transições energéticas do 55º electrão, sozinho na última camada. Na Tabela Periódica de Elementos, pertencem ao mesmo grupo do Césio (grupo IA) o Rubídio ($^{87}_{37}\text{Rb}$) (2, 8, 18, 8, 1) e o Hidrogénio (^1_1H) com um único electrão e, por isso mesmo, também estes, utilizados na construção de relógios atómicos.

Depois de vários anos de investigação, dois astrónomos do Observatório Naval dos Estados Unidos (USNO) e dois astrónomos do Laboratório Nacional de Física (Teddington, Inglaterra) determinaram, em 1955, a relação entre a frequência na transição no átomo de **césio e o segundo de ET**. Determinaram o movimento orbital da Lua em volta da Terra em função do tempo medido por um Relógio Atómico. O valor encontrado diferia significativamente do ET, estabelecido por Markowitz, responsável pelo Serviço do Tempo no USNO. Então, Markowitz e Essen (Figura 16) colaboraram na determinação do melhor valor para a frequência de transição hiperfina no átomo de césio e, em

1958, apresentaram o valor de 9 192 631 770 ciclos/segundo.

Na 13ª Conferência do Comité Internacional de Pesos e Medidas, em 1967, foi definida, pela primeira vez, a Unidade de Tempo do Sistema Internacional de Unidades, o Segundo (SI), em função do Tempo Atómico (TA) em vez do movimento da Terra:

1 Segundo de TA é a duração de 9 192 631 770 períodos da radiação correspondente à transição entre os dois níveis hiperfinos do estado fundamental dos átomos de Césio 133.

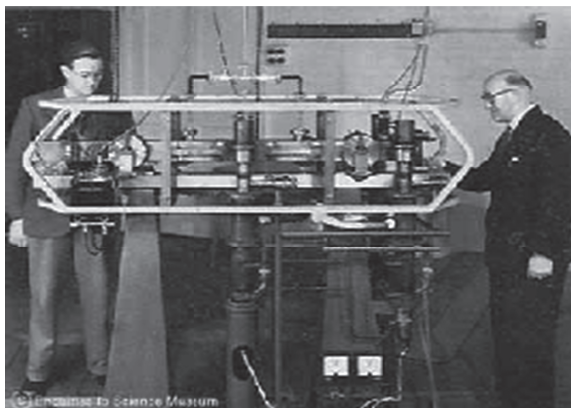


FIGURA 16
Relógio Atómico de Césio em 1955 (Essen, NPL).

6.1 Relógios Atômicos

O Esquema de funcionamento dos **Relógios Atômicos** está representado na Figura 17.

De um forno é emitido um feixe de átomos neutros de césio que irá passar por dois campos magnéticos não homogêneos. O primeiro magneto faz sair os átomos com spin anti-paralelo, enquanto os de spin paralelo, isto é, a mesma direcção de spin do núcleo e do electrão, passam para um campo magnético uniforme, a denominada cavidade de interacção, onde são excitados pela energia de uma microonda fornecida por um Oscilador de Quartzo. Quando a frequência desta microonda iguala a da transição natural dos átomos, isto é, em condições de ressonância, ocorre uma mudança de estado por absorção ou emissão estimulada, dependendo do estado inicial dos átomos. Depois do feixe passar por um segundo campo magnético não homogêneo, apenas os átomos que sofreram transição são enviados para o Detector e, daí, de novo, para a cavidade de interacção, passando pelo Oscilador de Quartzo. Se a frequência do sinal aplicado não é exactamente igual à frequência da transição dos átomos de césio, não ocorrerá qualquer transição e não haverá sinal à saída do Detector. Então, a frequência do cristal de quartzo do oscilador é regulada até que seja recebido sinal à saída do Detector. Neste momento, sabe-se que a frequência do oscilador é igual à frequência de transição dos átomos de césio, isto é, tem-se acesso ao **Tempo Atómico**.

A utilização generalizada do Tempo Atómico nos mais variados domínios da vida moderna tem provocado um considerável desenvolvimento na concepção e na materialização de Relógios Atômicos, nomeadamente no que respeita à sua Exactidão e às suas Dimensões. A Figura 18 mostra a rápida evolução *dos Relógios de Césio* (Cs), no *National Bureau of Standards (NBS)*, nos Estados Unidos, até 1988, posteriormente designado por *National Institute of Standards and Technology (NIST)*, Figura 19.

Um novo avanço na exactidão dos relógios atômicos foi dado pela introdução de um Sistema de Arrefecimento por LASER (Figura 20). Os Relógios de Césio Arrefecidos por LASER

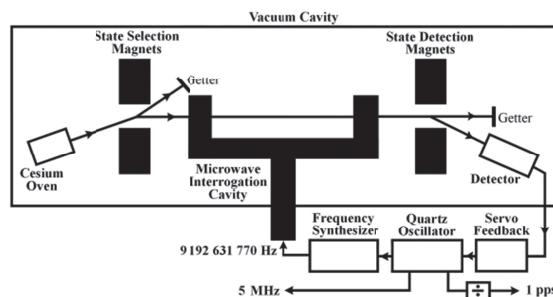


FIGURA 17
Diagrama de um padrão de frequência de Césio.



FIGURA 18
Relógios de Césio no NBS.



FIGURA 19
Relógios de Césio (NIST7) e de Rubídio (GPS).

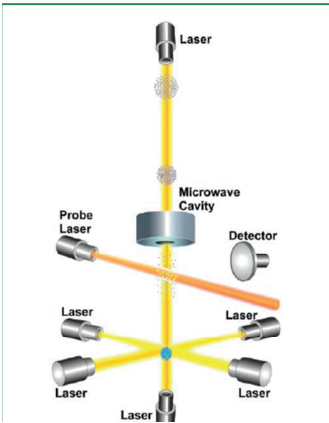


FIGURA 20
Diagrama de uma Fonte de Césio que utiliza o arrefecimento por laser.

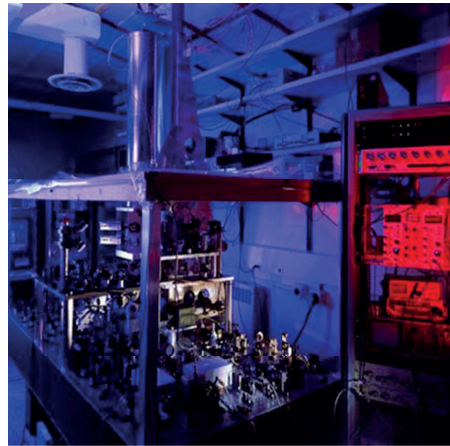


FIGURA 21
NIST CsF1

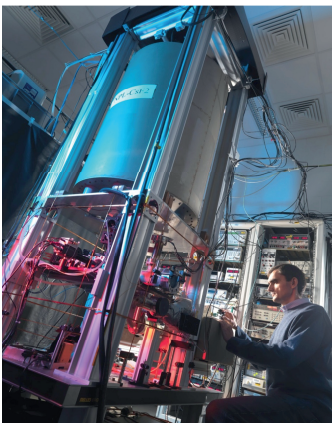
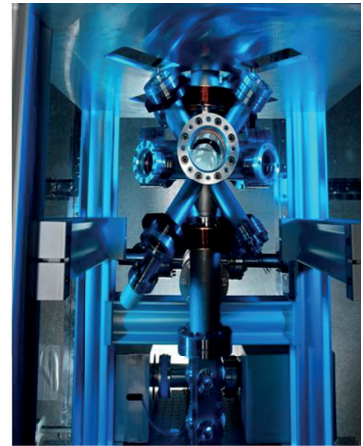


FIGURA 22
NPL CsF2

desenvolvidos nos Estados Unidos, *NIST CsF1*, e em Inglaterra, *National Physical Laboratory (NPL), NPL CsF2*, estão representados, respectivamente, nas Figuras 21 e 22.

Como se disse anteriormente, assiste-se a um desenvolvimento permanente dos padrões de tempo atômico, no que respeita à exactidão, o que está bem representado no gráfico da Figura 23.

Entretanto, o Prémio Nobel da Física, em 1989, foi atribuído, metade, a Norman F. Ramsey (Harvard University) “for the invention of the separated oscillatory fields method and its use in the hydrogen maser and other atomic clocks”, a outra metade, em conjunto, a Hans G. Dehmelt (University of Washington) e Wolfgang Paul (University of Bonn) “for the development of the ion trap technique”. Na sequência dessas e outras investigações surgiu o padrão de frequência utilizando o Hidrogénio, o MASER (Microwave Amplification by Simulated Emission of Radiation) de Hidrogénio. O esquema de funcionamento deste Relógio Atômico está representado na Figura 24. Como

é habitual neste tipo de situação, os primeiros exemplares tinham grandes dimensões (Figura 25), tendo vindo a ser progressivamente reduzidas a ponto de, actualmente, os Masers de Hidrogénio serem os Relógios Atômicos que equipam os Satélites do Sistema Galileo (Figura 26).

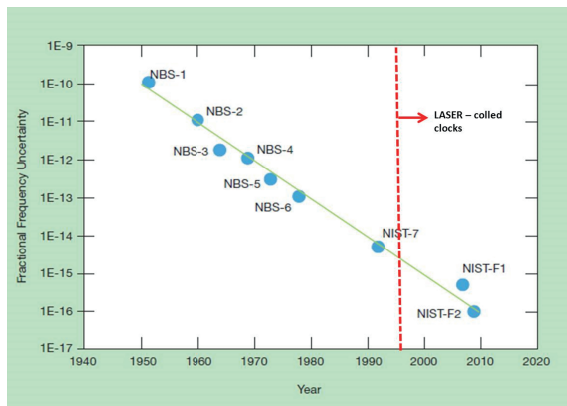


FIGURA 23
Incerteza nos padrões de frequência do NIST.

é habitual neste tipo de situação, os primeiros exemplares tinham grandes dimensões (Figura 25), tendo vindo a ser progressivamente reduzidas a ponto de, actualmente, os Masers de Hidrogénio serem os Relógios Atômicos que equipam os Satélites do Sistema Galileo (Figura 26).

Uma experiência a bordo da Estação Espacial Internacional (*International Space Station – ISS*) combina a excelente estabilidade de período curto do MASER de Hidrogénio com a exactidão e a estabilidade de período longo do relógio de Césio arrefecido por LASER (Figura 27).

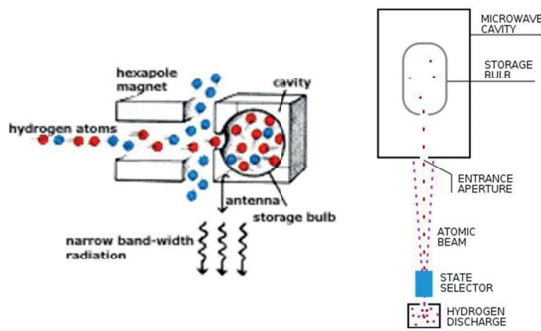


FIGURA 24
Diagrama de um Maser de Hidrogénio.

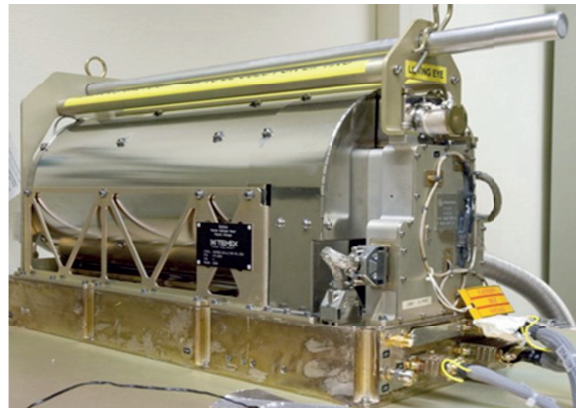


FIGURA 25
Grandes dimensões dos primeiros masers de Hidrogénio.

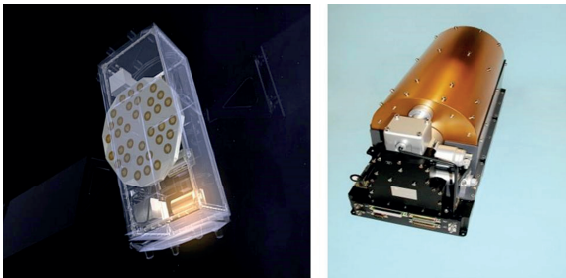


FIGURA 26
Masers de Hidrogénio dos satélites Galileo.

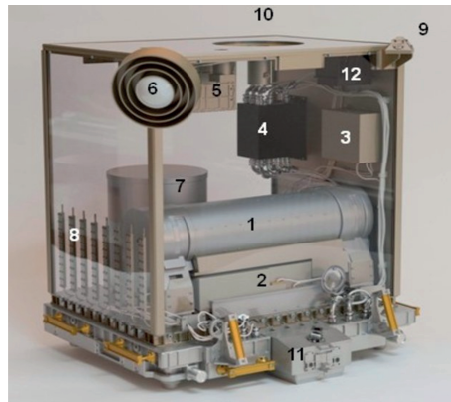


FIGURA 27
ACES – Atomic Clock Ensemble in Space – a bordo da ISS (Projecto PHARAO).

Em resumo, podemos dizer que, em Janeiro de 2013, a exactidão estava reduzida a cerca de 3×10^{-15} o que significa que não há perda ou ganho de 1s em mais de 100 milhões de anos.

6.2 Tempo Atómico Internacional

O **Tempo Atómico Internacional (TAI)** é mantido pela Secção do Tempo do Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM), em Paris, com base nas informações de um grande número dos mais avançados relógios atómicos em diferentes Laboratórios. Até 31 de Dezembro de 1987, aquela responsabilidade estava atribuída ao Bureau Internacional da Hora (BIH), isto é, **até aquela data, os assuntos** do Tempo eram tratados no âmbito da Astronomia, passando, então, para o domínio dos Padrões Internacionais.

O TAI é calculado como uma média pesada da informação de mais de 300 Relógios individuais. Assim, o TAI é uma escala de tempo formada estatisticamente para utilização internacional. A Época de início do Sistema TAI coincidiu com a Época de UT1 em 1 de Janeiro de 1958. Devido ao atraso

na Rotação da Terra, a diferença entre as duas Escalas está a aumentar, como se reconhece nos seguintes dados de observação:

$$\begin{aligned} \text{TAI} - \text{UT1} &= +6.^{\text{s}}1 \text{ on January 1, 1968} \\ &= +16.^{\text{s}}4 \text{ on January 1, 1978} \\ &= +23.^{\text{s}}6 \text{ on January 1, 1988} \\ &= +30.^{\text{s}}8 \text{ on January 1, 1998} \\ &= +31.^{\text{s}}9 \text{ on January 1, 2001} \\ &= +32.^{\text{s}}3 \text{ on January 1, 2003} \end{aligned}$$

6.3 Tempo Universal Coordenado

Em muitas aplicações, nomeadamente na Navegação, torna-se necessária uma escala de tempo, por um lado, muito uniforme e, por outro, tanto quanto possível adaptada ao UT1, ou seja, à Rotação da Terra. Com esse objectivo, foi introduzida, em 1972, uma solução de compromisso, o **Tempo Universal Coordenado (UTC)**. UTC e TAI diferem de um número inteiro, n , de segundos (leap seconds – segundos intercalares)

$$\text{UTC} = \text{TAI} - n(1\text{s})$$

Os segundos intercalares podem ser introduzidos sempre que necessário, no final dos meses de Dezembro e Junho. Esses segundos são introduzidos de modo a que a diferença, em valor absoluto, não exceda os 0.9 segundos

$$\begin{aligned} \text{DUT1} &= | \text{UT1} - \text{UTC} | \\ &\leq 0.9 \text{ segundos} \end{aligned}$$

A unidade do UTC mantém-se o Segundo Internacional (SI).

O DUT1 é distribuído pelos Boletins do Serviço Internacional da Rotação da Terra e dos Sistemas de Referência (IERS). Este Serviço, ligado à União Astronómica Internacional (UAI), é o responsável pela introdução ou não dos Segundos Intercalares. O Tempo dos sinais horários de muitos Países, Hora Legal desses Países, refere-se ao UTC. Presentemente, $\text{UTC} - \text{TAI} = -35$ segundos, desde 1 de Julho de 2012, 0^h UTC, estando já decidido não haver qualquer segundo intercalar em Dezembro de 2013. De salientar, tendo em atenção o que fica exposto, que o UTC, embora muito utilizado na

vida corrente, é um SMT que apresenta descontinuidades (Figura 28).

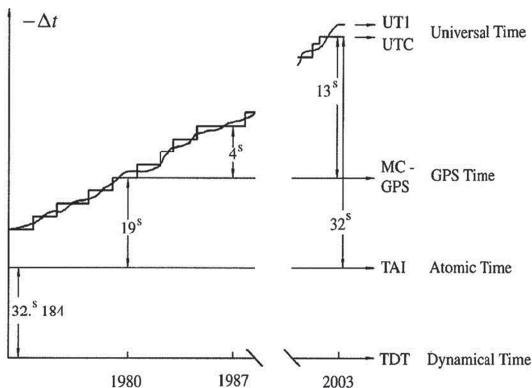


FIGURA 28
Comparação entre os diferentes SMT.

6.4 Tempo GNSS

Os Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS), *GPS*, *GLONASS*, *Compass/Beidou* e *Galileo*, são verdadeiras constelações de Relógios Atómicos em movimento em volta da Terra. Cada um dos Sistemas cria o seu próprio Tempo Atómico, com pequenas diferenças para o Tempo Atómico Internacional. Como a mensagem recebida dos Satélites inclui a informação de Tempo, os respectivos Sistemas são de muito fácil acesso.

O SMT associado ao GPS (**Tempo GPS**) foi posto a coincidir com o UTC às 0h do dia 6 de Janeiro de 1980. Nesse instante, o TAI já estava adiantado relativamente ao UTC em 19 segundos. Como no Tempo GPS não são introduzidos segundos intercalares, pois é mais vantajosa uma escala de tempo contínua, a diferença entre o Tempo GPS e o TAI mantém-se constante, enquanto, em 2013, o UTC já estava atrasado, relativamente ao Tempo GPS, em 16 segundos.

7. CONCLUSÃO

Os diferentes aspectos que intervêm na definição e na materialização dos Sistemas de Medida de Tempo constituem uma área em permanente desenvolvimento (Figura 29).

Actualmente, os dois Sistemas de Medida de Tempo com maior interesse são o UT1 e o TA, estando em curso intensa discussão sobre a eventual eliminação dos Segundos Intercalares no UTC. A tomada de uma decisão está, neste momento, adiada para a Assembleia Geral da UAI em 2015.

Considera-se, também, uma possível redefinição, a curto prazo, do Segundo de Tempo Atómico, como consequência do desenvolvimento constante dos padrões de frequência, como, por exemplo, padrões de frequência ópticos Optical Lattice Clocks –e Ion Optical Clocks –(Figura 30). **É tão grande o interesse e a actualidade deste assunto que** o Prémio Nobel da Física em 2012 foi atribuído a Dave Wineland, do NIST Time and Frequency Division, Estados Unidos, e ao Francês Serge Haroche, da Sorbonne, “*for ground-breaking experimental methods that enable measuring and manipulation of individual quantum systems*”, com aplicações no desenvolvimento de Relógios Atómicos Ópticos.



FIGURA 29
Linha do Tempo na evolução dos Relógios.

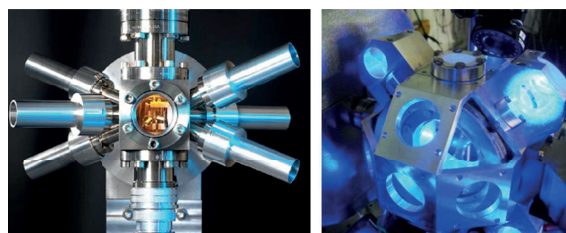


FIGURA 30
Padrões de frequência ópticos.

BIBLIOGRAFIA

Capitaine, N. and McCarthy, D. D., *The IAU Recommendations on Reference Systems and their Applications*, Observatoire de Paris, May 2004.

Capitaine, N. and Wallace, P. T., *High precision methods for locating the celestial intermediate pole and origin*, A&A 450, 855–872, 2006.

Lombardi, M. A., Heavner, T. P. and Jefferts, S. R., *NIST Primary Frequency Standards and the Realization of the SI Second*, The Journal of Measurements Science, Vol.2 No. 4, December 2007.

Petit, G. and Luzum, B., (eds.), *IERS Conventions (2010)*, IERS Technical Note No. 36, 2010.

Seeber, G., *Satellite Geodesy* – 2nd completely revised and extended edition, Walter de Gruyter, Berlin, 2003.

The Astronomical Almanac for the year 2013, U.S. Government Printing Office, 2012.

http://syrtel.obspm.fr/iauWGnfa/NFA_Glossary.html

<http://tycho.usno.navy.mil>

<http://www.iers.org>

<http://www.iau.org/science>

<http://www.nist.gov/pml/div688/>

(COMUNICAÇÃO APRESENTADA À CLASSE DE CIÊNCIAS
NA SESSÃO DE 7 DE NOVEMBRO DE 2013)