

O segundo - ontem, hoje e amanhã

Carlos Pires

Instituto Português da Qualidade
carlosp@ipq.pt

Resumo

A medição do tempo encontra-se na vanguarda da metrologia. A exatidão de um relógio atómico ganha uma ordem de grandeza a cada 10 anos e, atualmente, a incerteza relativa associada a valores atribuídos a um padrão primário de tempo anda próximo de 10^{-16} . Graças a este nível de incerteza, todas as outras unidades do Sistema Internacional de unidades (SI), que dependem do tempo ou da frequência, são melhoradas. Desde o início deste século, a investigação no domínio da metrologia do tempo tem como base as transições ópticas em átomos frios que, associados a pentes de frequência, produzidos por lasers de femtossegundo, dão origem a relógios ópticos com incertezas relativas na ordem do 10^{-18} . Será este o futuro da grandeza tempo, que levará a uma redefinição do segundo, ou será apenas um produto da investigação em que a definição do segundo continuará a atual.

Ontém

À data, o segundo, unidade da grandeza tempo no SI, define-se tomando o valor numérico fixado da frequência do cézio, $\Delta\nu_{Cs}$, a frequência da transição hiperfina do estado fundamental do átomo de cézio 133 não perturbado, igual a 9 192 631 770, quando expressa em Hz, unidade igual a s^{-1} .

Praticamente em toda a história da civilização humana, foram os movimentos dos astros que deram a localização ao longo de um dia. Até à década de 50 do século XX, eram os astrónomos quem definiam o tempo e poucas pessoas fora da comunidade científica se preocupavam com a medição desta grandeza. O segundo era definido como uma parte em 86 400 de um dia solar médio, com a suposição, não declarada, de que a duração de um dia solar médio não variava. Havia uma atitude mais “despreocupada”, na definição do tempo, contrariamente à definição de outras grandezas físicas. No final do séc. XVIII, os fundadores do sistema métrico, partindo do princípio, que continuou a guiar os seus sucessores, de que as unidades não deveriam ser arbitrarias, manifestaram a sua expectativa de que no futuro fosse possível criar um sistema de unidades internacional, “À tous les temps, à tous les peuples”. Em 1875, com a assinatura da *Convenção do Metro*, 17 países, incluindo Portugal, acordaram para a criação de um sistema de unidades de medida igual para todo o mundo. Foram iniciados esforços no sentido da construção de novos pro-

tótipos internacionais do metro e do quilograma, não tendo sido considerada, nesta altura, a conceção de um padrão relacionado com o *segundo internacional*. No final do séc. XIX, existiam versões locais para o dia solar médio, o que era suficiente para todas as atividades. Pouco importava que o tempo na cidade do Porto estivesse adiantado em relação à cidade de Bragança, em alguns minutos. Foi com o desenvolvimento do telégrafo e dos caminhos de ferro que, em países como os EUA e o Canadá, se chegou a acordo sobre o *tempo comum* a utilizar em ambos os países. Assim, em 1883, ambos os países foram divididos em zonas temporais, em que cada zona tinha uma determinada hora e diferia das zonas adjacentes em exatamente uma hora. A ideia foi adotada no ano seguinte e o nosso planeta foi dividido em 24 zonas com 15 graus de longitude, a Oeste e a Este de Greenwich. A base do tempo mundial seria o dia solar médio no Observatório Real de Greenwich, ficando conhecido por *Greenwich Mean Time* ou GMT (fig. 1).



Fig. 1 - Royal Observatory em Greenwich, GMT foi o padrão de tempo até 1972.

Dado que esta nova definição causou alguma perturbação no horário das observações astronómicas, uma vez que o dia mudava a meio do turno de trabalho em que estas observações eram realizadas, o GMT foi substituído por uma nova definição, o Tempo Universal (UT), como sendo o dia solar médio no meridiano de Greenwich, com início à meia noite. Pela primeira vez, o mundo tinha uma clara e inequívoca escala de tempo e com a qual todos concordavam. O UT é baseado no dia solar médio que, por sua vez, é determinado por observações astronómicas, sendo o dia dividido em 86 400 segundos, relacionando a unidade do tempo, o segundo, com o movimento de rotação da Terra.

Acontece que o movimento de rotação da Terra não é constante, existem fatores, alguns conhecidos à data, que provocam irregularidades na sua rotação, tais como:

- os movimentos de precessão e de nutação, causados pela gravidade do Sol e da Lua;
- as marés dos oceanos, causadas pela atração gravitacional da Lua, provocam uma desaceleração gradual da velocidade de rotação da Terra, e transformam a sua energia rotacional em calor;
- a oscilação polar, diferente da precessão, os polos da Terra têm um movimento anual em torno do eixo real.

Além do dia se estar a *alongar*, e com ele a hora, o minuto e o segundo, esta alteração não é, porém, uniforme - o dia é menor no Verão do que no Inverno e existe o movimento dos polos, fatores estes que permitem concluir que o movimento de rotação da Terra não seria a melhor *escolha* como referência para a definição do segundo.

Desde finais do séc. XIX, início do séc. XX, que a posição do Sol pode ser determinada pela fórmula de Newcomb, e é publicada, para efeitos práticos, em tabelas (conhecidas por efemérides) que permitem obter a posição do Sol em qualquer instante. Em 1956, foi recomendada uma nova base de tempo, o Tempo Efeméride (*Ephemeris Time* – ET), na qual se definia o segundo efeméride (SE) como sendo a fração $1/31\,556\,925,974\,7$ do ano trópico para janeiro 0 de 1900, às 12:00 *Ephemeris Time* (o ano trópico é o intervalo de tempo que o Sol, em seu movimento aparente pelo céu, leva para partir de algum dos quatro pontos que definem as estações e retornar ao mesmo ponto, por exemplo, é o tempo entre duas passagens pelo equinócio de Primavera) [1].

Em 1960, o ET começou a aparecer em tabelas astronómicas e, também esse ano, o SI foi criado pela 11.ª Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM) do Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM).

Hoje

Atualmente, os relógios dividem o dia solar médio em intervalos, *mais convenientes*, expressos em horas, minutos e segundos. Podem ser ajustados ao dia solar médio, a partir de um relógio padrão que, por sua vez, tem o tempo derivado das observações astronómicas. Utilizados desta forma, os relógios são, de facto, padrões secundários de tempo que mantêm uma escala de tempo, entre calibrações periódicas.

Na altura em que o segundo efeméride se tornou oficialmente a unidade de tempo do SI, em 1960, já alguns laboratórios geravam escalas de tempo atómicas, assim designadas dado que tinham como padrões relógios atómicos, permitindo obter o segundo a partir dos valores de frequência emitidos por átomos. Já, em 1879, Sir William Thomson (mais tarde conhecido como Lord Kelvin) mencionou que os átomos podiam ser utilizados como padrões de frequência.

Foram realizados diversos projetos para relacionar o segundo efeméride à transição do átomo de cézio para a definição do segundo do SI. Os relógios atómicos, em pouco minutos, conseguiram realizar o segundo do SI com um nível de exatidão tal, que levaria cerca de um ano de observações da Lua para se atingir o mesmo nível e exatidão.

Em 1964, a CGPM adotou uma definição provisória do segundo do SI baseado no tempo atómico: o padrão a ser utilizado é a transição entre os dois níveis hiperfinos, $F = 4, m_F = 0$ e $F = 3, m_F = 0$, do estado fundamental, $^2S_{1/2}$, do átomo de cézio 133, não perturbado por campos externos, cujo valor atribuído é de 9 192 631 770 Hz.

Com os relógios atómicos a revelarem-se uma fonte geradora fiável e prática, em 1967, na 13.ª CGPM, foi adotada a *nova* definição do segundo: o segundo é a duração de 9 192 631 770 períodos da radiação correspondente à transição entre os dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de cézio 133.

O segundo deixou de estar relacionado com a duração do dia, com os movimentos dos planetas e deixou de ser necessário recorrer à observação astronómica para se obter um padrão de tempo, marcando assim o fim do *tempo astronómico* [2].

Com os relógios atómicos e com a nova definição do segundo, em 1971, a 14.ª reunião da CGPM designou a escala de tempo atómico do *Bureau International de l'Heure*, como *Temps Atomique International* (TAI), que atualmente é a escala de referência mundial. O TAI é uma escala de tempo contínua, calculada pelo BIPM tendo por base as melhores realizações do segundo no SI. Foi igualmente recomendada uma nova forma de Tempo Universal Coordenado (UTC), ligada ao TAI, para ser utilizada na distribuição de sinais de tempo. O UTC é uma escala de tempo definida pelo BIPM, com a mesma unidade do TAI, mas diferindo em alguns segundos (fig. 2). Atualmente, o UTC é a base do tempo civil, substituindo a escala GMT, mantida em consonância com o movimento de rotação da Terra, dado por UT1, e quando ocorrem alterações na duração do dia que provoquem diferenças superiores a 0,9 s entre o UTC e o UT1, é introduzido ou suprimido 1 segundo, designado por segundo intercalar.

O valor da frequência que maximiza o processo de fluorescência e provoca o maior número de transições de estado é 9 192 631 770 Hz, o valor da frequência utilizada para definir o segundo [4]. Por exemplo, desde 2012 que o Instituto Nacional de Metrologia de Itália (INRIM) mantém uma fonte de céσιο, para a realização do segundo do SI, com uma incerteza-padrão relativa, do tipo B, cujo valor é $1,7 \times 10^{-16}$.

Transferir tempo e frequência

Em metrologia, a transferência de tempo (TT) ou a transferência de frequência (TF) tem como principais objetivos comparar escalas de tempo UTC (k) (Tempo Universal Coordenado no local de índice k), em locais diferentes, e disseminar a unidade de tempo, o segundo. Atualmente, o BIPM recomenda que a TT seja efetuada com recurso a satélites dos Sistemas de Posicionamento Global por Satélite (*Global Navigation Satellite Systems* - GNSS) ou a satélites geoestacionários [5].

Desde o início dos anos 90 que a TT e a TF são realizadas com recurso a técnicas de transferência que utilizam satélites, nomeadamente as técnicas de *Common View* e *Two Way Satellite Time And Frequency Transfer* (TWSTFT). Ambas permitem transferir frequências com valores de estabilidade da ordem de 300 ps, o que corresponde a uma resolução relativa em frequência de 4×10^{-15} por dia [6] [7], e transferir tempos com valores de incerteza que, na melhor das hipóteses, serão da ordem de 1 ns [8]. Em 2003, foi possível efetuar a transferência de frequências, através dos padrões primários de tempo do *National Institute of Standards and Technology* (NIST) para o *Joint Institute for Laboratory Astrophysics* (JILA), Instituto com gestão conjunta do NIST e da Universidade do Colorado, com uma resolução relativa de 4×10^{-15} em 1 s [9], com recurso a fibra óptica. Esta realização impulsionou o aparecimento de uma nova técnica de TT e TF.

Na Europa, a primeira experiência do género ocorreu em 2005, em França, onde foi utilizada uma fibra óptica para disseminar um padrão de tempo, numa distância de 43 km, com uma incerteza relativa de 10^{-17} , num tempo de integração de um dia [10].

Além da utilização de satélites, já muito difundida para a transferência de tempo e frequência, as soluções de fibras ópticas estão a surgir muito rapidamente como uma alternativa. Assim, em 2012, na 19.^a reunião do Comité Consultivo do Tempo e Frequência (CCTF) do BIPM, foi recomendado o desenvolvimento de uma rede de fibras ópticas para TT e TF [11]. Desde então, a utilização de fibras ópticas, para fins metro-lógicos, tem aumentado, muito devido à incapacidade que os sistemas de transferência de

tempo, que recorrem a satélites, apresentam face aos requisitos para efetuar a comparação de relógios. O principal requisito de um laboratório de tempo consiste na comparação da escala de tempo local com a escala de tempo pela qual o resto do mundo se rege.

Atualmente estão a ser efetuados em todo o mundo estudos sobre TT, e principalmente sobre TF, e especialmente na Europa onde os Institutos Nacionais de Metrologia (NMI) se estão a ligar por fibra óptica, de forma a compararem as respetivas escalas de tempo, em substituição dos sistemas atuais.

A transferência de tempo pode ser efetuada de 3 formas: *one-way*, *two-way* e *common view* [12]. No método *one-way*, é enviado um sinal de tempo para um local remoto, onde é comparado com a escala de tempo nesse local, assumindo que é conhecido o atraso do respetivo percurso. No método *two-way*, existe uma troca de sinais de tempo entre dois locais distintos. Ambos funcionam como recetores e emissores. Este método baseia-se no facto do percurso percorrido pelos sinais de tempo ser o mesmo em ambos os sentidos. Isto é, se se verificar a simetria do atraso de ambos os sinais, não é determinante conhecer os efeitos que contribuem para o atraso deste sinal. No método *common view*, várias estações observam o mesmo sinal de tempo transmitido por uma fonte e medem o tempo que o sinal demora a chegar ao observador. De seguida, os observadores comparam as medidas e subtraem-nas, sendo este o método mais utilizado para transferir tempo entre os diferentes laboratórios de tempo e o BIPM.

Rastreabilidade do segundo

Na verdade, o tempo é calculado e disponibilizado ao mundo pelo BIPM, com base em dados recolhidos de cerca 80 NMI, que mantêm e desenvolvem cerca de 500 relógios mantidos em condições metrológicas. Coletivamente, estes relógios permitem a construção da escala de tempo de referência internacional (UTC) e individualmente realizam o segundo do SI ao mais alto nível.

Mensalmente, o BIPM recolhe os dados das diferenças entre as realizações locais do UTC, UTC(k), e o UTC. Com estes dados, é criado um relógio “médio”, isto é, calcula-se uma média ponderada dos dados de cada UTC(k), de acordo com a estabilidade que cada UTC(k) apresentou no ano anterior. Este relógio “médio” é conhecido como *Echelle Atomique Libre* (EAL). De seguida, esta escala de tempo é comparada com a duração do segundo no SI gerado pelos padrões primários de tempo, e é gerado o TAI. O segundo TAI corresponde ao segundo SI em uma parte em 10^{15} . De seguida, o TAI é convertido no UTC, sendo atualmente a diferença entre ambos de 37 s. Esta diferença pode variar, pois, é necessário manter a concordância entre o UTC e o movimento de rotação da Terra, $UT1 - UTC < 0,9$ s. Se a diferença for maior que 0,9 s, cabe à *International Earth Rotation Service* (IERS) a decisão de introduzir ou não o segundo intercalar, Figura 4.

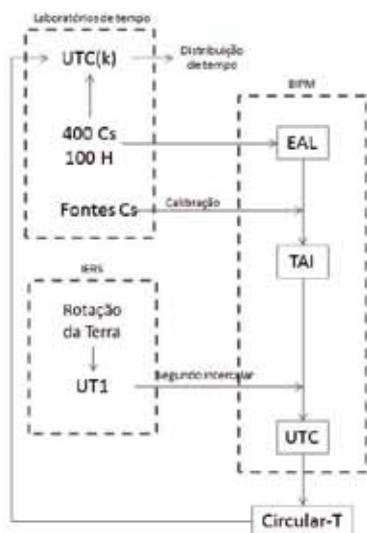


Fig. 4 - Esquema da realização do UTC.

Mensalmente a diferença entre os UTC(k) e o UTC é publicada pelo BIPM na Circular-T, sendo este o garante da rastreabilidade da realização prática do segundo, para todos os Laboratórios que contribuem para o TAI. Em Portugal, a escala de tempo de referência é designada por UTC(IPQ) e pode ser consultada mensalmente na Circular-T do BIPM [8].

O UTC (IPQ) é da responsabilidade do Laboratório de Tempo e Frequência do Instituto Português da Qualidade (IPQ), enquanto NMI de Portugal. O segundo, em Portugal, é realizado com recurso a 3 relógios comerciais de césio e a comparação com o UTC é feita com recurso a dois sistemas de transferência de tempo, um recetor GNSS e o sistema TWSTFT, Figura 5.



Fig. 5 - Laboratório de Tempo e Frequência do Instituto Português da Qualidade.

Nova definição do segundo

Com a entrada em vigor do *novo SI*, em maio de 2019, a unidade de tempo define-se: tomando o valor numérico fixado da frequência do césio, $\Delta\nu_{Cs}$, a frequência da transição hiperfina do estado fundamental do átomo de césio 133 não perturbado, igual a 9 192 631 770, quando expresso em Hz, unidade igual a s^{-1} . O segundo é utilizado na definição de outras unidades de base do SI, tais como o metro, o quilograma, o ampere, o kelvin e a candela.

Esta definição implica a relação exata $\Delta\nu_{Cs} = 9\,192\,631\,770$, de onde se pode obter a relação $1\,s = \frac{9\,192\,631\,770}{\Delta\nu_{Cs}}$. O efeito desta definição é que o segundo é igual à duração 9 192 631 770 períodos da radiação correspondente à transição entre dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de césio 133 não perturbado.

Amanhã

Os recentes relógios ópticos, padrões secundários de tempo e frequência, baseados em átomos de estrôncio ou itérbio, ou em iões de alumínio ou mercúrio, possibilitam a obtenção de valores de incerteza cerca de 100 vezes menores do que os dos atuais padrões primários de tempo. Os relógios ópticos utilizam transições a frequências maiores do que as frequências emitidas pelos átomos de césio, conseguindo subdividir o segundo, pelo menos, em mais do que 2 ordens de grandeza que os relógios de césio. O relógio óptico de estrôncio do NIST não teria ganho ou perdido um segundo se tivesse sido colocado em funcionamento há 13,8 mil milhões de anos atrás, na altura do

Big Bang [13, 14]. Segundo a teoria da relatividade geral de Einstein, um relógio próximo à superfície da Terra gera um segundo maior que um relógio que esteja afastado. Apesar de os relógios comerciais utilizados nos satélites do sistema GPS já terem em conta os efeitos da relatividade, a exatidão e a estabilidade de um relógio óptico [14] permitem verificar alterações em altitude de cerca de 1 cm.

A evolução tecnológica verificada pelo desenvolvimento dos relógios ópticos, nomeadamente os respetivos valores de incerteza, estabilidade e exatidão, está a suscitar a discussão sobre uma eventual redefinição do segundo do SI, baseada em transições ópticas ou mantendo-se o césio como átomo para o relógio de referência. O tempo dirá se estes avanços ocorrerão, mas parece certo que a medição do segundo só será mais exata no futuro.

Referências

- [1] “Ano Trópico”, [Online]. Available: https://pt.wikipedia.org/wiki/Ano_tr%C3%B3pico. [Acedido em 2019-07-17].
- [2] “Resolution 1 of the 13th CGPM”, 1967.
- [3] W. Riley, Handbook of Frequency Stability Analysis, Boulder, EUA: NIST Special Publication 1065, 2008.
- [4] “BIPM”, [Online]. Available: <https://www.bipm.org/metrology/time-frequency/units.html>. [Acedido em 2019-07-17].
- [5] BIPM, “Recommendation CCTF 3”, 2001.
- [6] D. Calonico, et al, “Light and the distribution of time”, doi: 10.1209/0295-5075/110/40001, 2015.
- [7] A. Bauch, et al, “Comparison between frequency standards in Europe and the USA at the 10^{-15} uncertainty level”, Metrologia, 43, 109 (2006).
- [8] “BIPM - Circular T”, [Online]. Available: <https://www.bipm.org/en/bipm-services/timescales/time-ftp/Circular-T.html>.
- [9] J. Y., et al, “Delivery of high-stability optical and microwave frequency standards over an optical fiber network”, J. Opt. Soc. Am. B, 20 (7), 1459-1467 (2003).
- [10] C. Daussy, et al, “Long-distance frequency dissemination with a resolution of 10^{-17} ”, 2005.
- [11] BIPM, “Consultative Committee for Time and Frequency (CCTF) Report of the 19th meeting”, 2012.
- [12] J. Levine, “A review of time and frequency transfer methods”, Metrologia, 45, S162-S174 (2008).
- [13] “NIST”, [Online]. Available: <https://www.nist.gov/pml/time-and-frequency-division/primary-standard-nist-f1>.
- [14] R. Wynands, et al, “Atomic Fountain Clocks”, Metrologia, 42, S64 (2005).



Carlos Miguel Sendas Pires, nasceu em Bragança em 1975. Licenciou-se em Engenharia Física pela Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa e, pela mesma faculdade, fez o mestrado em Engenharia Física. Em 2007, iniciou as suas funções no Laboratório de Velocidade do Laboratório Nacional de Metrologia, do Instituto Português da Qualidade, como Técnico Superior. Em 2015, assume as funções de Responsável Técnico pelo domínio do Tempo e da Frequência, tendo como principal função realizar e disseminar o segundo, bem como dar rastreabilidade à unidade a nível nacional, estando nomeado posteriormente como contact person no comité técnico da EURAMET TC-TF (Tempo e Frequência).