

O NOVO QUILOGRAMA E A GRANDE REVOLUÇÃO NA METROLOGIA

E desta maneira farás: de trezentos côvados o comprimento da arca, e de cinquenta côvados a sua largura, e de trinta côvados a sua altura.

Gênesis 6:15

Este artigo foi encomendado pelo Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas. Uma versão provavelmente mais jornalística e acessível ao grande público será publicada no Portal do CBPF

Metrologia até a Revolução Industrial

A metrologia – ciência da medição – teve início na Suméria, não se sabe quando, e há cinco milênios já havia se espalhado pelo Oriente Médio. Medições de comprimento eram indispensáveis para as edificações e divisão da terra, e medições de volume e peso, para o comércio e a coleta de impostos, então pagos em espécie – grãos, vinho, azeite. A unidade mais importante para a medição de comprimento era o cúbito, também chamado côvado. Esta, como outras unidades de comprimento, era antropomórfica. O cúbito era a distância entre a extremidade do dedo médio e o final do cotovelo, mas nas diversas civilizações e ao longo dos séculos foi criada uma variedade de cúbitos, dentro dela o cúbito duplo. Na bíblia, a palavra cúbito aparece inúmeras vezes, o que leva estudiosos a buscar incansavelmente o valor do cúbito bíblico.

No Egito, as proporções entre partes das edificações, dentre elas as pirâmides, eram regidas por rígidos cânones artísticos, muitas vezes sagrados, o que levou os egípcios a aprimorarem suas medidas de comprimento. Talvez já por volta de 3,000 a.C, criaram o cúbito real, dividido em sete palmos – palmo era a largura da palma da mão em seu término e início dos quatro dedos longitudinais. O palmo era dividido em quatro dígitos. O dígito continha subdivisões, envolvendo números racionais, cujo significado ainda não é entendido. Em sítios arqueológicos, foram encontrados pelos menos uma dúzia de cúbitos reais feitos de granito. Os comprimentos nessa coletânea variam de 523,5 mm a 529 mm. O exame do interior das pirâmides, até hoje bem conservado, mostra que os egípcios mediam comprimento com precisão de duas partes por mil. A figura 1 exibe parte de um cúbito real.



Figura 1 – Foto de um cúbito real egípcio

O Sistema Internacional de Unidades

Em 1793, uma comissão formada pela Academia Francesa de Ciências propôs o Sistema Métrico, também chamado Sistema MKS, que trouxe importantes inovações. A primeira foi abandonar unidades antropomórficas de medidas. Na mecânica newtoniana, qualquer grandeza pode ser expressa em termos de três grandezas básicas, uma de comprimento, outra de massa e a outra de tempo (duração). Foram então definidas unidades para cada uma dessas grandezas, o metro (símbolo m), o quilograma (símbolo kg) e o segundo (símbolo s). O metro foi definido como um décimo de milionésimo da distância entre o Polo Norte e o equador. O grama, um milésimo do quilograma (kg), como a massa de um centímetro cúbico de água pura à temperatura de 4 °C. O segundo foi definido de modo que a duração do dia sideral fosse 86.400 s. Tais unidades, proclamaram triunfalmente seus criadores, eram para sempre e para todos. Para sempre significava que não mudariam com o tempo, e para todos significava que poderiam ser reproduzidas por quem tivesse como medir a distância do polo ao equador, a massa de 1 cm³ de água e a duração do dia sideral. Mas, para efeitos práticos, foram criados protótipos físicos dessas unidades. Uma barra de platina – protótipo do metro –, um cilindro também de platina – protótipo do quilograma – e um relógio cujo tic dura 1 s foram construídos e são preservados em um museu perto de Paris. Em 1889, o sistema métrico passou a ser denominado Sistema Internacional de Unidades (SI), após ter recebido a adesão de 30 nações. Os protótipos do metro e do quilograma foram substituídos por outros de liga de irídio-platina, e 30 cópias foram enviadas aos trinta países, além da França, então membros da chamada Convenção do Metro. Foram ainda criados o Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM) e a Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM).

Mas os fatos revelaram ser mais complicados que os pressupostos do SI. Descobriu-se que a forma e as dimensões da Terra mudam com o tempo, e por isso uma comissão que repetisse as elaboradas medições realizadas entre 1793 e 1799 da distância entre o Polo Norte e o equador chegaria a outro protótipo do metro. Hoje se sabe que o original está cerca de 200 micrometros menor do que o prescrito pela definição – parte dessa diferença deve-se a erros nas medições feitas naquela época. Também o protótipo do kg é instável e já perdeu 50 microgramas desde que foi construído. Mas o SI tem suas virtudes inegáveis. Uma delas é a adoção do sistema decimal para as subdivisões e múltiplos das unidades: metro, decímetro (0,1 m), centímetro (0,01 m), quilômetro (1000 m), e por aí vai. A outra é o estabelecimento de unidades de medidas aceitas e entendidas por muitas nações, o que facilita o comércio, principalmente o de componentes industriais padronizados internacionalmente.

A surpreendente generalidade das unidades mecânicas

No século 19, foram investigados os fenômenos elétricos e magnéticos, finalmente englobados numa teoria geral, o eletromagnetismo. Muitas grandezas aparecem no eletromagnetismo, tais como carga elétrica (q), corrente elétrica (I), tensão elétrica (V), resistência elétrica (R) campo elétrico (E), campo magnético (B), capacitância (C) e indutância (L). Todas essas grandezas podem ser expressas em termos de m, kg e s. No século vinte, novos avanços, tais como a relatividade e a física quântica, preservaram essa

extraordinária capacidade das três unidades básicas da mecânica newtoniana de expressar todas as novas grandezas. Entretanto, a construção da termodinâmica e da mecânica estatística, que se referem a fenômenos ocorrentes em sistemas de muitas partículas, requereu a introdução de duas novas grandezas irreduzíveis à mecânica: a temperatura termodinâmica (T) e a quantidade de substância, que se refere ao número de entidades elementares (átomos ou moléculas) de uma dada porção de matéria. Foram então definidos a escala Kelvin (K) de tal modo que o ponto triplice da água, no qual os estados sólido, líquido e gasoso coexistem, tenha temperatura de 273,16 K, e o mole – também chamado constante de Avogadro –, que é o número de átomos contidos em 0,012 kg de carbono-12. A intensidade luminosa, relacionada ao fluxo de fótons, tem sua própria unidade de medida, a candela. Com base nessas seis unidades básicas do SI, podemos expressar o valor de qualquer grandeza já descoberta nas ciências naturais.

Metrologia de alta precisão e definição de novas unidades de medida

Nos últimos três quartos de século, as medições, principalmente na física, tornaram-se crescentemente precisas, o que tem gerado uma metrologia de alta precisão. O objetivo dos metrologistas tem sido definir unidades de medida a partir de fenômenos naturais universais facilmente acessíveis. O primeiro grande passo para isso foi a seguinte definição do segundo, feita em 1967:

1 s = 9 192 631 770 períodos da radiação correspondente à transição entre os dois níveis eletrônicos fundamentais do átomo césium-133.

O segundo passo foi a atribuição, em 1983, de um valor exato para a velocidade da luz

$$c = 299\,792\,458 \text{ m/s.}$$

Dada a definição do segundo enunciada anteriormente, este valor postulado de c equivale a uma nova definição do metro. Mas a ciência continuou avançando, e com ela são criadas novas portas para a metrologia.

Dois novos fenômenos quânticos de natureza macroscópica foram descobertos, que envolvem constantes universais independentes da forma e do tamanho dos corpos em que os referidos fenômenos são observados, o que ofereceu uma oportunidade ímpar para novas definições de unidades de medidas. O primeiro deles foi o efeito Josephson, previsto teoricamente em 1962 pelo físico britânico Brian David Josephson – na época estudante na Universidade de Cambridge – e comprovado experimentalmente no ano seguinte pelo físico teórico Philip W. Anderson e seu pós-doutorando, o físico experimental John Rowell, nos Laboratórios Bell. O efeito Josephson manifesta-se quando dois supercondutores A e B são separados por uma fina barreira isolante. Se uma voltagem fixa V é aplicada entre os dois supercondutores, uma corrente elétrica oscilatória, com frequência também fixa f , aparece no circuito, a qual é proporcional a V . A constante de proporcionalidade – hoje chamada constante de Josephson – tem valor dado por $K_J = 2e/h$, onde e é a carga elementar (a carga do próton ou, com sinal trocado, a carga do elétron) e h é a constante de Planck, que define a energia de um fóton em termos da sua frequência.

O segundo efeito quântico macroscópico é o efeito Hall quântico, descoberto pelo físico alemão Klaus von Klitzing em 1980. Ele é a versão quântica do efeito Hall ordinário, descoberto em 1879 pelo físico Edwin Hall. O efeito Hall é o aparecimento de uma voltagem transversa – chamada voltagem Hall – num corpo que transporte uma corrente perpendicular a um campo magnético aplicado a ele. Transverso, neste caso, significa ortogonal tanto à corrente quanto ao campo magnético. O efeito Hall quântico aparece quando a corrente é transportada por um gás bidimensional de elétrons, se o campo magnético aplicado for suficientemente intenso e a temperatura do condutor for suficientemente baixa. Nesse caso, a voltagem Hall é quantizada em termos da chamada constante de von Klitzing, dada por $R_K = h/e^2$.

Em 1988, o CIPM propôs que se adotasse para as constantes de Josephson e de von Klitzing valores definidos exatamente e que eles fossem usados para as calibrações do volt (símbolo V e unidade de voltagem) e do ohm (símbolo Ω e unidade de resistência elétrica). Os valores convencionados para as duas constantes são

$$K_{J-90} = 483597,9 \text{ GHz/V},$$

$$R_{K-90} = 25\,812\,807 \, \Omega.$$

Tais valores foram adotados pela CGPM em 1990 e são mundialmente usados para a calibração do volt e do ohm. Eles não significam uma mudança das unidades do SI de unidades, pois isso significaria negar o caráter fundamental de uma constante referente ao eletromagnetismo.

A balança de Kibble e o grande salto no SI

Apesar dos avanços da metrologia, ficamos até recentemente presos à definição inconveniente do kg, que requer um protótipo físico instável. O instrumento de medidas que permitiu a maior das revoluções no SI foi a balança de Kibble, de longa história. Sua precursora foi a balança de Ampere, inventada no século 19 pelo famoso Lorde Kelvin para definir o Ampere (símbolo A e unidade de corrente elétrica) em unidades MKS. A balança de Ampere mede a força entre duas bobinas percorridas pela mesma corrente. Essa força é proporcional à corrente nas bobinas, e a balança permite a realização do Ampere pela medição da força. A balança de Ampere tem um grande inconveniente: a força entre as bobinas depende também da suas formas e tamanhos. Em 1975, o metrologista britânico Bryan Kibble propôs importantes modificações na balança de Ampere com as quais pode-se medir o peso de um corpo por meio da medição de uma corrente e uma voltagem. Num dos braços da balança, fica o corpo cujo peso se pretende medir, e no outro uma bobina submetida a um campo magnético estático e uniforme, percorrida por uma corrente elétrica I . O campo magnético exerce uma força na bobina que é proporcional ao produto do valor do campo pela corrente na bobina; a corrente é variada até que as forças nos dois braços se equilibrem. Numa etapa adicional do processo de medição, a bobina move-se com velocidade v precisamente estabelecida e o campo magnético gera uma voltagem V em seus terminais. Com esse procedimento, o valor do campo magnético, e a forma e as dimensões da bobina ficam eliminadas das equações que descrevem o funcionamento da balança. A massa do corpo pode então ser calculada em termos de V , I , v e o valor g da aceleração local da gravidade. Foi necessário um extraordinário esforço para se aprimorar a balança até que se atingisse a precisão necessária para a definição do novo kg, chamado quilograma

elétrico. Há hoje diversas balanças de Kibble precisas em diversos países. A figura 2 mostra a balança existente no Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia (National Institute of Standards and Technology – NIST).

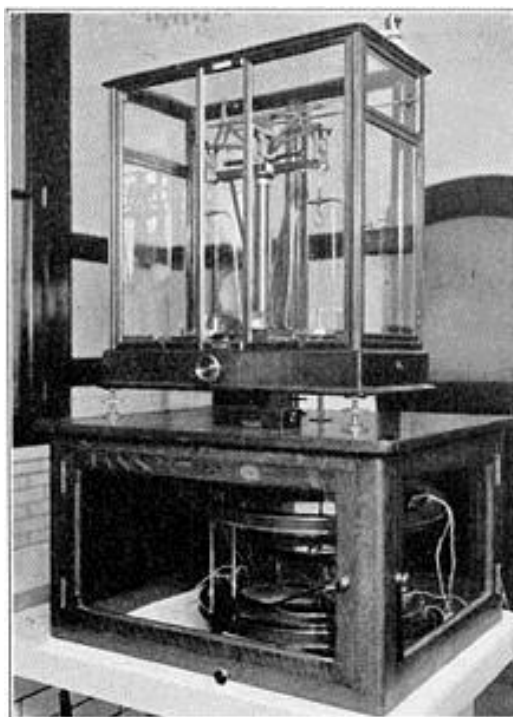


Figura 2 – Foto da balança de Kibble do NIST

Em 16/11/2018 foi decidida, na CGPM, a adoção do novo kg e ao mesmo tempo de valores exatos para quatro constantes universais, listadas a seguir

Constante de Planck: $h = 6,626\ 070\ 15 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \times \text{kg} / \text{s}$

Carga elementar: $e = 1,602\ 176\ 634 \times 10^{-19} \text{ kg} \times \text{m}^2 \times \text{s}^{-3}$

Constante de Boltzmann: $k = 1,308\ 649 \times 10^{-23} \text{ kg} \times \text{m}^2 \times \text{s}^{-2} \times \text{K}^{-1}$

Constante de Avogadro: $N_A = 6,022\ 140\ 76 \times 10^{23}$

A constante de Boltzmann é um fator que converte temperatura K em energia expressa em unidades MKS. Com a decisão, que valerá a partir de 20/05/2019 – 20 de maio é Dia Mundial da Metrologia –, quase todas as grandezas importantes poderão ser medidas, em unidades do SI, com precisão de pelo menos dez partes por bilhão, o que equivale a medir a circunferência da Terra com incerteza de 0,4 m. Uma exceção importante é a constante gravitacional G , cuja medida ainda tem incerteza de algumas partes por cem mil. As unidades do SI, a partir de 2019, serão definidas a partir das constantes universais c , e , h e k . As constantes de Josephson e de von Klitzing poderão ser calculadas exatamente a partir

dos valores exatos postulados para e e h , e os valores K_{J-90} e R_{K-90} convencionados para elas ficarão revogados.

Alaor Chaves
Professor Emérito da UFMG