

# A NOVA DEFINIÇÃO DO KILOGRAMA NO SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES SI

Marco Aurélio Diniz Maciel  
Instituto de Pesos e Medida do estado do Paraná  
Email: [marcomaciel@ipem.pr.gov.br](mailto:marcomaciel@ipem.pr.gov.br)

## RESUMO

A partir de 20 de maio de 2019, a unidade de massa do Sistema Internacional de Unidades (SI), o Quilograma, terá sua definição modificada. Deixará de ser o artefato metálico guardado na sede do Bureau Internacional de Pesos e Medidas – BIPM, em Sèvres, para ser baseado na constante de Planck ( $h$ ). Neste artigo, será descrito a necessidade desta mudança, bem como as medidas são realizadas utilizando uma balança de Kibble – Watt, um instrumento que permite comparar energia mecânica com eletromagnética usando duas experiências separadas. Além disso, será apresentado um breve histórico do SI, desde a sua criação até a 26ª Conferência Geral de Pesos e Medidas realizada em Versailles.

## INTRODUÇÃO

Realizar uma medida é fazer uma comparação. Para que a medida de algo possa ser entendida por todos é preciso que tenhamos um referencial para comparação. Esta é a origem de um sistema de unidades de uso internacional. Ao medirmos tempo todos utilizam o segundo (s), ao medirmos comprimento todos utilizam o metro (m) e ao medirmos massa todos usam o quilograma (kg) desde quando o Sistema Internacional de Unidades foi criado [1].

Ao usarmos tais convenções é preciso que todas estas unidades sejam bem definidas. Ao definirmos nosso padrão de unidade temos que ser cuidadosos para que ele obedeça a certos requisitos básicos. Primeiro um padrão não pode sofrer grandes variações, afinal ele é a referência e, quando sofre qualquer alteração, todo o resto é afetado [2]. No passado o comprimento era medido pelo tamanho do pé do rei. Este é um padrão inadequado, já que não apenas o tamanho do pé depende da idade, mas também cada rei tem um pé de tamanho diferente. O comprimento de um objeto, ora medido e documentado, poderia não mais servir quando viesse um novo rei. No momento em que isto tornou-se problemático foi necessário definir a unidade

de comprimento de uma forma mais constante na natureza, deixando então de ser baseado no corpo humano e passando a ser baseado no planeta Terra. No meio disto, foi criado o sistema métrico. Com ele, o metro e o quilograma passaram a ser definidos com base em artefatos mantidos de forma segura nas dependências do BIPM em Sèvres – França. Enquanto o metro foi definido como sendo a distância entre duas marcas de uma barra de uma liga de platina e irídio, o quilograma foi definido como a massa contida num bloco da mesma liga. Ambos artefatos ficaram sob custódia do BIPM. Muitas cópias deste padrão foram feitas e distribuídas por todos os países signatários da Convenção do Metro. Junto com metro e quilograma vieram muitas outras unidades essenciais para qualificação de grandezas fundamentais [3]. A Figura 1 é mostrado os artefatos metálicos para metro e quilograma.

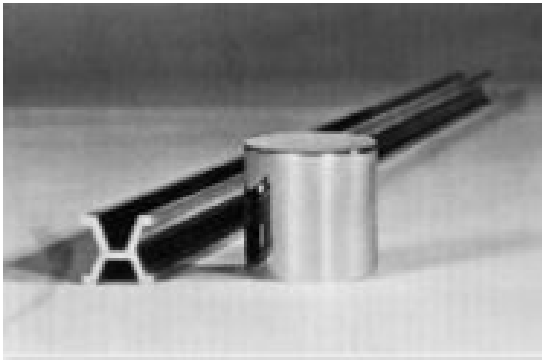


Fig. 1 – Padrão do Metro e do Quilograma.

Em 1789, com a Revolução Francesa, uma crescente necessidade de mudança envolveu toda a Europa, as velhas medidas baseadas em partes do corpo humano e elementos da natureza não atendiam as necessidades do comércio, construções, impostos e demarcação de terras. A necessidade de converter uma medida em outra era tão importante quanto a necessidade de converter uma moeda em outra. Com o desenvolvimento das civilizações eram necessárias unidades de medidas que não variassem com o tempo ou o lugar. Foi neste contexto que surgiu um sistema novo e universal de unidade de medidas, um sistema científico, não mais baseado em partes do corpo dos reis, e foi chamado de Sistema Métrico Decimal. Esse sistema foi constituído inicialmente por três unidades básicas: o metro, o litro e o quilograma.

Em 1799 o metro foi definido como sendo uma barra de platina de seção retangular, com 25,3 mm de largura e 4 mm de espessura, para 1 metro de comprimento de ponta a ponta. Na mesma época, foi confeccionado um padrão

de massa (quilograma) para representar o peso de  $1 \text{ dm}^3$  de água pura, na temperatura de  $4,44 \text{ }^\circ\text{C}$ . O quilograma foi representado por um cilindro de platina e irídio com diâmetro igual à altura de 39 mm. O problema é que, nos últimos 100 anos, ele perdeu 50 microgramas devido à interação com o ambiente. Então, como as balanças são calibradas por meio dele, isso pode interferir quando a precisão é elevada. A partir de maio de 2019, o quilograma será medido por meio da balança de Kibble, que compara energia mecânica à eletromagnética. Antes de explicar como funciona a balança, é importante ressaltar que nós sabemos que os eletroímãs geram um campo magnético cuja atração é proporcional à quantidade de corrente que passa pelas bobinas. Assim, é possível definir uma unidade de peso por meio da quantidade de energia requerida para neutralizar sua força. A constante de Planck ( $h$ ) é a grandeza responsável por relacionar peso e corrente elétrica.

Em 20 de maio de 1875 um tratado internacional conhecido como Convenção do Metro, foi assinado por 17 países, incluindo o Brasil. O Brasil participou da criação do Tratado, mas por falta de recursos ausentou-se no período de 1931 a 1953.

Este tratado estabeleceu as seguintes organizações para conduzir as atividades internacionais em matéria de um sistema uniforme de medidas:

- Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM), uma conferência intergovernamental de delegados oficiais dos países membros e da autoridade suprema para todas as ações;
- Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIPM), composta por cientistas e metrologistas que prepara e executa as decisões da CGPM e é responsável pela supervisão do Bureau Internacional de Pesos e Medidas;
- Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM), um laboratório permanente e centro mundial da metrologia científica, entre as suas atividades incluem o estabelecimento de normas de base e as escalas das quantidades de capital físico e manutenção dos padrões protótipo internacional, tais como o protótipo internacional do Quilograma – IPK.

Além disso, o BIPM tem por missão assegurar a unificação mundial das medições. Assim, é encarregado de:

- Estabelecer os padrões fundamentais e as escalas para a medição das principais grandezas físicas e de conservar os protótipos internacionais;
- Efetuar a comparação de padrões nacionais e internacionais;
- Assegurar a coordenação das técnicas de medição correspondentes;
- Efetuar e coordenar as medições das constantes físicas fundamentais relevantes para estas atividades.

A partir da criação destas organizações todo e qualquer assunto relacionado à medição são de responsabilidade da Convenção. Em 1889, a 1ª CGPM definiu os protótipos internacionais de metro e quilograma. Esta Conferência declarou que o quilograma é a unidade de massa, ele é igual à massa do protótipo internacional do quilograma. É um cilindro feito de uma liga cuja fração de massa de platina é de 90% e a fração de massa de irídio é de 10% mantido no ar sob três frascos no BIPM em Sèvres. Devido à inevitável acumulação de contaminantes nas superfícies, o protótipo internacional está sujeito a contaminações superficiais reversíveis que se aproximam de 1 µg por ano em massa. Por esta razão, O CIPM declarou que, enquanto se aguarda novas pesquisas, a massa de referência do protótipo internacional é aquela imediatamente após a limpeza e lavagem por um método especificado. A massa de referência assim definida é utilizada para calibrar padrões nacionais de liga de platina-irídio [4].

O tratado da Convenção do Metro foi revisto em 1921 e em 1960 tendo nesta última revisão ocorrida a redesignação do sistema, que abandonou a designação de Sistema Métrico para adotar a de Sistema Internacional de Unidades (SI).

Até 1960 ainda havia vários sistemas de unidades de medida espalhados pelo mundo. Essa grande quantidade de unidades fundamentais, por serem diferentes de uma região para outra, atrapalhavam o sistema de medidas e, conseqüentemente, o comércio [1].

## SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES (SI)

Em 1960, a 11ª Conferência Geral de Pesos e Medidas – CGPM instituiu o Sistema Internacional de Unidades – SI, sistema esse, que estabeleceu a cada grandeza somente uma unidade. A Conferência deu formalmente o nome de Systeme International d'Unites, simbolizado como SI (Sistema Internacional) e

o estabeleceu como padrão universal de unidades de medição. SI é um símbolo e não a abreviatura de Sistema Internacional. O SI é um sistema de unidades coerente, decimal, único, com poucas unidades de base, completo, simples e preciso, não degradável e universal. Ser coerente significa que o produto ou o quociente de quaisquer duas unidades é a unidade da quantidade resultante. Por exemplo, o produto da força de 1 N (Newton) pelo comprimento de 1 m (metro) é 1 J (Joule) de trabalho. No sistema decimal, todos os fatores envolvidos na conversão e criação de unidades são somente potências de 10. No SI, as únicas exceções se referem às unidades de tempo baseadas no calendário, onde se tem 1 dia 24 horas, 1 hora 60 minutos e 1 minuto igual a 60 segundos. No sistema, há somente uma unidade para cada tipo de quantidade física, independente se ela é mecânica, elétrica, química ou térmica. Joule é unidade de energia elétrica, mecânica, térmica ou química.

As sete unidades de base são separadas e independentes entre si, por definição e realização. Os tamanhos das unidades evitam a complicação do uso de prefixos de múltiplos e submúltiplos. O SI é completo e pode se expandir indefinitivamente, incluindo nomes e símbolos de unidades de base e derivadas e prefixos necessários. Ele é simples, de modo que os cientistas, engenheiros e público em geral podem usá-lo e ter noção das ordens de grandeza envolvidas.

Não possui ambiguidades entre nomes de grandezas e de unidades. O SI não se degrada, de modo que as mesmas unidades são usadas em épocas diferentes. Os símbolos e nomes de unidades formam um único conjunto básico de padrões conhecidos, aceitos e usados no mundo inteiro.

Oferece várias vantagens nas áreas de comércio, relações internacionais, ensino e pesquisas científicas, na Figura 2 mostra-se as unidades básicas do Sistema Internacional de Unidades, como estabelecido atualmente e as outras unidades que podem ser obtidas destas sete unidades de base.

Na 14<sup>o</sup> CGPM que ocorreu em 1971, foram selecionadas as unidades de base do SI, que são: metro, quilograma, segundo, ampère, kelvin, mol e candela, que correspondem às grandezas fundamentais: comprimento, massa, tempo, intensidade de corrente elétrica, temperatura, quantidade de matéria e intensidade luminosa. Nessa mesma conferência foram estabelecidos também, seus símbolos, unidades derivadas, unidades suplementares e prefixos [5].

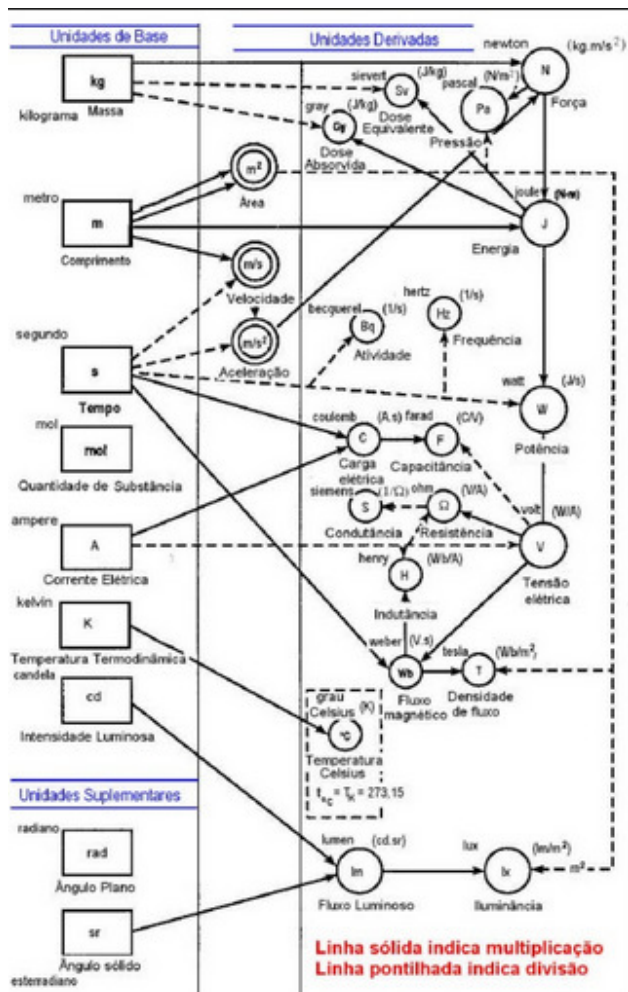


Fig. 02 – Unidades de base e derivadas do SI

Em 1961, foi criado o Instituto Nacional de Pesos e Medidas (INPM), que implantou a Rede Brasileira de Metrologia Legal e Qualidade, que deu origem aos atuais institutos estaduais de pesos e medidas - IPEMs, e instituiu o Sistema Internacional de Unidades (SI) em todo o território nacional.

Em 1973, nasce o Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial, o INMETRO, com o objetivo de fortalecer as empresas nacionais, aumentando a sua produtividade por meio da adoção de mecanismos destinados à melhoria da qualidade de produtos e serviços.

## O USO DE ARTEFATOS COMO PADRÕES DE UNIDADES

O sistema métrico de unidades e o estabelecimento de padrões internacionais acarretou um grande progresso para a humanidade. Passamos a fazer medidas que poderiam ser feitas em épocas diferentes e mesmo assim comparadas. O Sistema Internacional com unidades baseadas em artefatos foi

um grande avanço da ciência e da tecnologia. Porém, estes artefatos não são imutáveis. Estudos realizados por Stock, Barat, Davis, Picard e Milton mostraram que medidas periodicamente realizadas entre artefatos que usam cópias idênticas no começo do século XX apresentaram grandes variações [6]. Isso demonstrou que padrões e definições baseadas em artefatos também apresentam variações. A figura 03 mostra a evolução em massa desde a primeira calibração das cópias oficiais realizada em 1889 e as Verificações Periódicas realizadas em 1946, 1991 e 2014. As cópias oficiais n.º. 43 e 47 foram calibrados em 1946, as demais em 1889. O desvio de massa positivo de algumas das cópias oficiais em relação ao IPK, observado durante a 2ª e 3ª Verificação Periódica, não foi confirmado para o período de 1991 a 2014. A deriva do IPK detectada na Terceira Verificação Periódica dos protótipos nacionais do quilograma [4] é apresentada, invariavelmente, como motivação para redefinição do quilograma. As incertezas Tipo A padrão de cada um desses pontos de dados são: 3,2 µg (1889); 5,4 µg (1946); 2,3 mg (1991); cerca de 1 µg (2014). Todas as massas são mostradas como desvios de 1 kg.

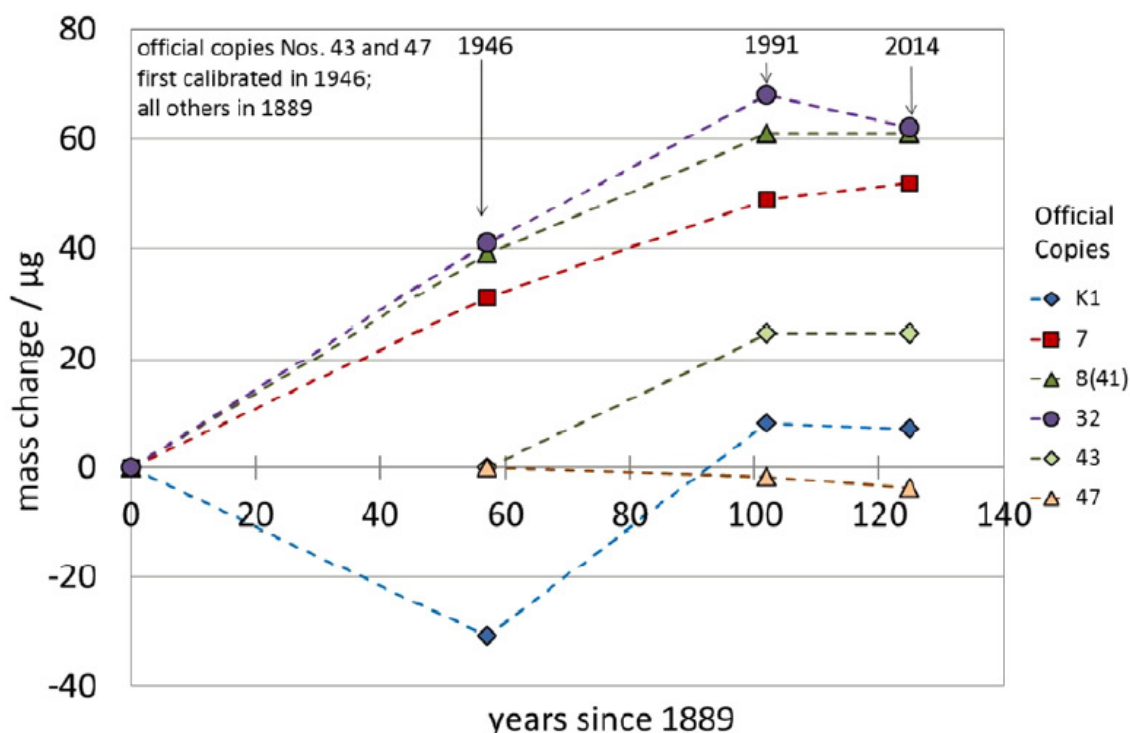


Fig. 03 – Evolução em massa desde a primeira calibração das cópias oficiais.

A fim de alterar esta situação, físicos começaram a buscar formas de definição baseada em valores que não se alteram no tempo. Os melhores candidatos

para isso são as constantes fundamentais, pois são valores associados a fenômenos naturais que nunca se modificam, sendo por isto observadas como constantes. A primeira das unidades do SI a passar por uma adequação foi o segundo. Inicialmente baseado nos movimentos de rotação e translação da Terra, o segundo passou a ser baseado na frequência da radiação eletromagnética necessária para efetuar eficientemente a transição entre os estados hiperfinos do átomo de Césio-133. O átomo de Césio não muda com o tempo e, portanto, a transição entre seus estados eletrônicos é uma constante. A chamada definição atômica do tempo teve sua realização consagrada com os Relógios Atômicos. Com o tempo, passamos a buscar novas definições para as demais unidades do SI. Em seguida veio a definição do metro, que deixou de ser a distância entre duas marcas do padrão mantido na França. Inicialmente foi definido com base no comprimento de onda da transição do átomo de Criptônio para, finalmente, ser definido em termos da velocidade da luz no vácuo [1]. Toda radiação eletromagnética, propaga-se no vácuo com a mesma velocidade ( $c = 299.792.458$  m/s). A velocidade da luz no vácuo é uma das grandezas mais constantes da natureza e base para muitos efeitos. Se já sabemos medir tempo tão bem, podemos usar o tempo aliado à velocidade da luz para definir que 1 m é a distância percorrida pela luz no vácuo no tempo  $t = 1/299.792.458$  segundos. Nas últimas décadas, tempo (segundo) foi definido na constante natural associada ao átomo de Césio e o comprimento (metro) foi definido baseado na constante da velocidade da luz no vácuo.

#### A NOVA DEFINIÇÃO DO kg

Diversos fatores favoreceram o processo de redefinição do quilograma, dentre eles destacam-se a vulnerabilidade da definição atual baseada em objeto físico; a maior estabilidade das unidades do SI ao serem definidas a partir de constantes fundamentais; a universalidade da realização da unidade a partir de experimentos que podem ser executados a qualquer momento, em qualquer lugar e com a maior exatidão possível; o interesse de redefinição de unidades em função de constantes fundamentais e a viabilidade de redefinir outras unidades de base implementando assim o novo SI. A figura 04 mostra a



representação gráfica do SI incluindo as unidades de medidas e as correspondentes constantes fundamentais que as definem.



Fig. 04 – representação gráfica do SI.

Utilizando a mesma filosofia praticada na definição do segundo e do metro, baseado em constantes fundamentais da natureza, após muitas considerações e debates, a constante escolhida para ser a base na definição do kg foi a constante de Planck ( $h$ ). A constante de Planck ( $h = 6,62 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg/s}$ ) aparece na natureza pela primeira vez na explicação da radiação de um corpo aquecido [7] pelo próprio Planck e é a quantidade fundamental na formação da mecânica quântica. Para um entendimento de como é possível definir o kg a partir da constante de Planck é importante entender a filosofia por trás da definição de uma unidade com base em uma constante natural. A figura 04 ilustra essa filosofia.

Utilizando os padrões existentes, determinamos da melhor forma possível a constante. Isto faz com que percorramos o caminho 1 do diagrama da figura 05. Uma vez que a constante  $h$  é determinada no melhor nível possível, ela passa então a ser definida como tendo um valor exato. No passo seguinte, usando a definição com este valor exato, tomamos agora o caminho 2 e passamos a determinar a unidade a partir da constante fundamental.

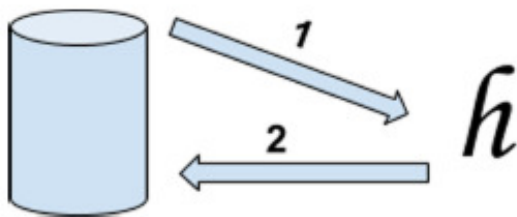


Fig. 05 – Definição de uma unidade de medida baseada em uma constante natural

O segundo ponto importante além da definição é a realização da unidade de medida. Esta parte é muito importante pois é a operação que permite, de fato, disponibilizar a unidade de medida de forma irrestrita para seu uso. No caso do kg esta realização é feita através da chamada balança de Kibble - Watt [9]. Ao explicar o funcionamento da balança está, ao mesmo tempo, demonstrando como é a conexão do quilograma com a constante  $h$ .

#### O PRINCÍPIO DA BALANÇA DE KIBBLE - WATT

Eletroímãs geram um campo magnético. Eles costumam ser usados em esteiras rolantes para mover objetos de metal na área de processamento ou purificação de minérios, assim como na separação de componentes metálicos presentes no lixo que podem ser reciclados. A atração do eletroímã, ou seja, a força que ele exerce, está diretamente relacionada à quantidade de corrente elétrica que passa por suas bobinas mostrada na figura 06. Existe, portanto, uma relação direta entre eletricidade e peso.

Os cientistas podem definir um quilograma, ou qualquer outra unidade de peso, em termos da quantidade de eletricidade necessária para neutralizar sua força. Há uma grandeza que relaciona peso à corrente elétrica, chamada constante de Planck - em homenagem ao físico alemão Max Planck, representada pelo símbolo  $h$ . Mas  $h$  é um número incrivelmente pequeno e, para medi-lo. Em meados dos anos 1970, o físico e metrologista inglês Bryan Kibble, do Laboratório Físico Nacional (NPL), em Teddington, Inglaterra, mostrou como a balança de Watt podia ser usada para medir tanto a massa de um objeto como a constante de Planck de modo muito preciso.

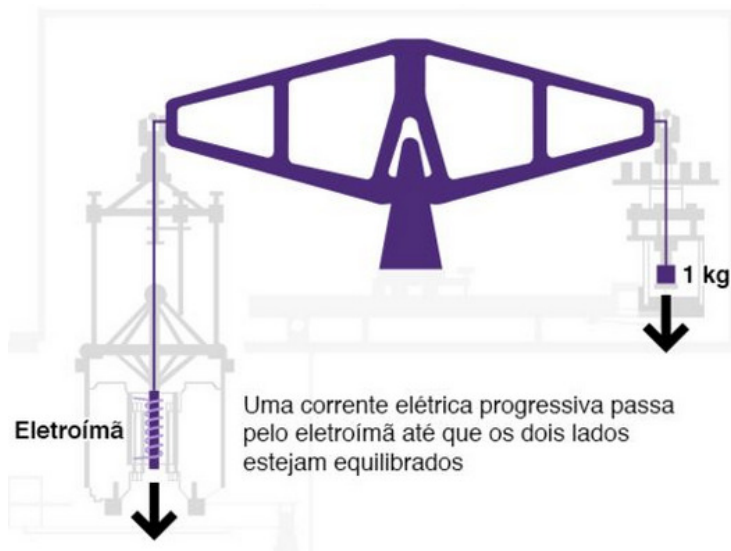


Fig. 06 – Princípio básico da balança utilizada para definir o Kilograma. Fonte: Laboratório Nacional de Física do Reino Unido – NPL

A balança de Kibble - Watt, como ficou conhecida, tem um eletroímã que pende para baixo de um lado e um peso do outro.

A corrente elétrica que passa pelo eletroímã é aumentada até que os dois lados estejam perfeitamente equilibrados. Essa maneira de medir o quilo não muda, tampouco pode ser danificada ou perdida, como pode acontecer no caso de um objeto físico. Além disso, uma definição baseada em uma constante - não um objeto - resultaria na medida exata do quilo, pelo menos em teoria, disponível para qualquer pessoa em qualquer lugar do planeta e não apenas para aqueles que têm acesso ao quilo original guardado na França.

Em um primeiro momento, coloca-se o objeto cuja massa será medida em um dos pratos da balança, que está imerso no campo magnético de um grande ímã. A ação da gravidade sobre essa massa gera uma força chamada peso, que faz o prato baixar. Como o prato está imerso no campo magnético do ímã, a passagem de uma corrente elétrica pela bobina instalada na base do prato produz uma força magnética (de mesma intensidade e sentido contrário) que se contrapõe à força-peso. Assim, mede-se com precisão a corrente elétrica que equilibra perfeitamente o prato – essa corrente é proporcional ao peso e, portanto, à massa. Para haver o equilíbrio, a força-peso tem de ser igual à força magnética, definida por uma constante multiplicada pela corrente. O problema, então, é determinar com alta precisão o valor da constante.

Kibble percebeu que, realizando outra medição, torna-se desnecessário conhecer o valor dessa constante. Em uma segunda operação, retira-se o objeto do prato e prende-se o fio que o sustenta a um motor, que faz a bobina se mover na vertical sempre com a mesma velocidade. O movimento da bobina no interior do campo magnético induz nela o surgimento de uma voltagem, proporcional à velocidade de deslocamento. Essa voltagem é definida pela velocidade de deslocamento dividida por uma constante, justamente aquela da primeira etapa de medição. Como existe uma relação de proporcionalidade entre a corrente e a voltagem, uma operação matemática permite eliminar essa constante das equações e definir a massa do objeto em função da velocidade. Na medição da corrente e da voltagem, usam-se equipamentos feitos de materiais especiais que funcionam como supercondutores a baixíssimas temperaturas. Nesses materiais, as correntes e as voltagens são quantizadas, o que significa que só assumem valores múltiplos da constante de Planck.

Hoje, diferentes grupos usam a balança de watt para, por meio dessa sequência de procedimentos, medir o valor da constante de Planck a partir de uma massa previamente conhecida – no caso, eles usam o protótipo do quilograma e suas réplicas, cuja massa se conhece com muita precisão. Assim que as medições atingirem um grau aceitável de precisão, o cilindro de Sèvres e suas cópias se tornarão desnecessários para as futuras calibrações. É que, embora bem conhecida, a massa desses cilindros deve continuar mudando, enquanto o valor da constante, uma vez obtido com precisão, permitirá usar a balança de watt para medir a massa que corresponde a exatamente 1 quilograma de modo muito preciso e sem alteração ao longo do tempo.

A balança Kibble baseia-se no princípio da igualdade entre as potências mecânica e elétrica surgida nas etapas de operação estática e dinâmica nas quais o gradiente de fluxo magnético é considerado constante.

Na etapa de pesagem estática, a massa de teste é suspensa num dos braços da balança, enquanto uma bobina imersa num campo magnético horizontal é suspensa no outro braço. Quando a bobina é alimentada com uma corrente elétrica,  $I$ , a interação entre a corrente elétrica e o campo magnético produz uma força eletromagnética vertical:

$$F_{el} = I.L.B \quad (1)$$

Onde  $L$  é o comprimento total do fio que forma a bobina e  $B$  é a densidade do fluxo magnético.

O peso da massa de ensaio,  $F_m$ , é dado por:

$$F_m = m.g \quad (2)$$

Onde  $m$  é massa e  $g$  aceleração da gravidade, quando a balança está em equilíbrio, temos que:

$$m.g = I.L.B \quad (3)$$

As figuras 07 e 08 esquematizam a balança de Kibble - Watt na fase estática, uma massa e uma bobina são dispostas em uma balança. A bobina (de comprimento  $L$ ) é colocada em um campo magnético de densidade de fluxo  $B$ . A força gravitacional na massa  $m$  é equilibrada por uma força eletromagnética de mesmo módulo e sentido oposto na bobina, enviando uma corrente  $I$  através dela.

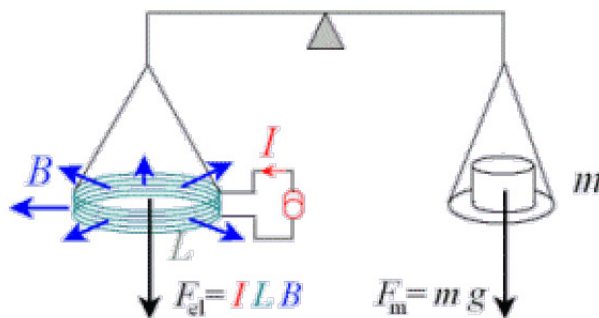


Fig. 07 – Etapa de pesagem estática da balança Kibble – Watt.

A fase estática da balança Kibble funciona como um comparador de massa com uma força restauradora eletromagnética. O padrão de massa é equilibrado por uma força de Lorentz produzida pela circulação de uma corrente  $I$  em uma bobina com comprimento  $L$  imersa em um campo magnético radial  $B$ . A corrente é medida a partir das referências de Josephson e Hall Quântico.

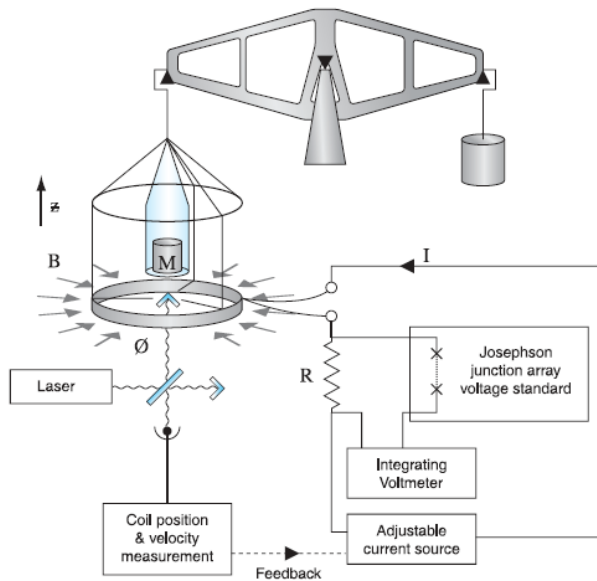


Fig. 08 – A balança de Kibble – Watt na etapa de pesagem estática

Na etapa de movimento dinâmico, a massa de ensaio é removida e a bobina é deslocada com uma velocidade vertical constante, através do campo magnético horizontal, induzindo uma tensão elétrica mensurável na bobina.

As figura 09 e 10 representam a etapa dinâmica da operação da balança, a bobina é movida com velocidade vertical  $v$  pelo campo magnético, de modo a gerar uma tensão induzida  $U$ .

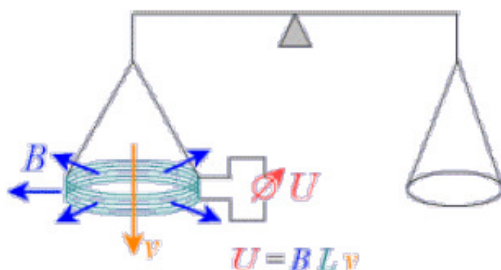


Fig. 09 – Fase dinâmica da balança Kibble – Watt

A tensão elétrica induzida,  $U$ , utilizando a Lei de Indução de Faraday é dada por:

$$U = B.L.v \quad (4)$$

Onde  $B$  é a densidade de fluxo magnético do campo magnético horizontal,  $L$ , é o comprimento do fio que forma a bobina, e  $v$  é a velocidade de deslocamento da bobina, através do campo magnético.

Rearranjando as equações acima, resulta em:

$$m.g/l = L.B \quad (5)$$

$$\text{e, } U/v = B.L \quad (6)$$

Combinando as duas equações, obtém-se:

$$U \cdot I = m \cdot g \cdot v \quad (7)$$

Isto significa que a energia elétrica ( $U \cdot I$ ) é igual à energia mecânica ( $m \cdot g \cdot v$ ) ou  $P_{\text{elétrica}} = P_{\text{mecânica}}$ , que representa o princípio básico do funcionamento da balança de Kibble – Watt.

Para efeitos de determinação da massa:

$$m = U \cdot I / g \cdot v \quad (8)$$

Onde, também, é possível determinar  $v$  com elevada exatidão, uma medição suficientemente precisa de  $I$  e  $U$  requer conhecimentos de mecânica quântica. Dois fenômenos, conhecidos como o efeito de Josephson e efeito de Hall quântico, permite determinar com precisão a resistência e a tensão, e, portanto, calcular a corrente elétrica utilizando a Lei de Ohm. A tensão depende da frequência da corrente e, como, a frequência pode ser medida com altíssima resolução utilizando a constante de Planck  $h$ , isto permite a medição de  $U$  com grande confiabilidade.

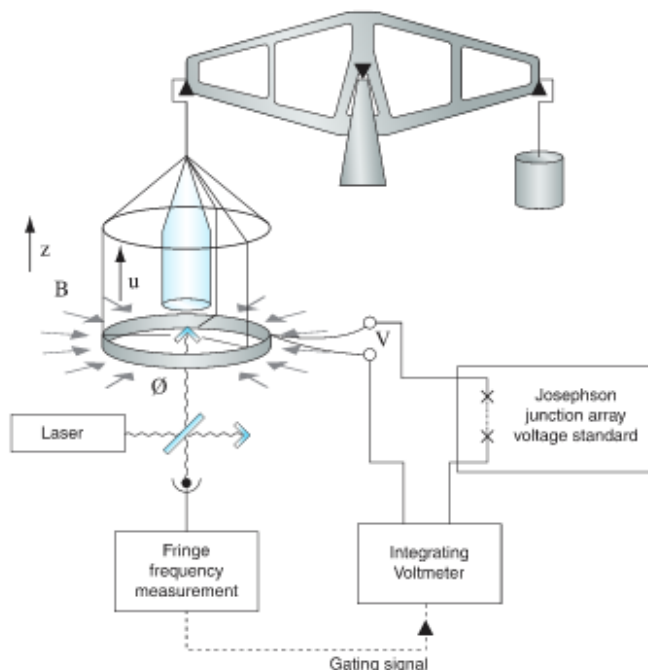


Fig. 10 – A Balança de Kibble – Watt na etapa dinâmica

Como o equilíbrio na balança é estabelecido quando a potência mecânica iguala-se à potência elétrica, e ambas têm como unidade o watt e por isto, esta balança que equilibra potências foi chamada, inicialmente de Balança de Watt. Conhecendo a aceleração da gravidade  $g$ , a velocidade  $v$ , a corrente para equilibrar na massa  $I$  e a tensão induzida  $U$ , podemos determinar a massa  $m$ .

Se estabelecermos que todas grandezas têm que ser tal que  $m = 1$  kg, esta medição torna-se a realização do quilograma. Para que isto possa ser feito com exatidão é preciso determinar muito bem a tensão elétrica  $U$ , a corrente  $I$ , a velocidade  $v$  na etapa dinâmica e a aceleração da gravidade no local.

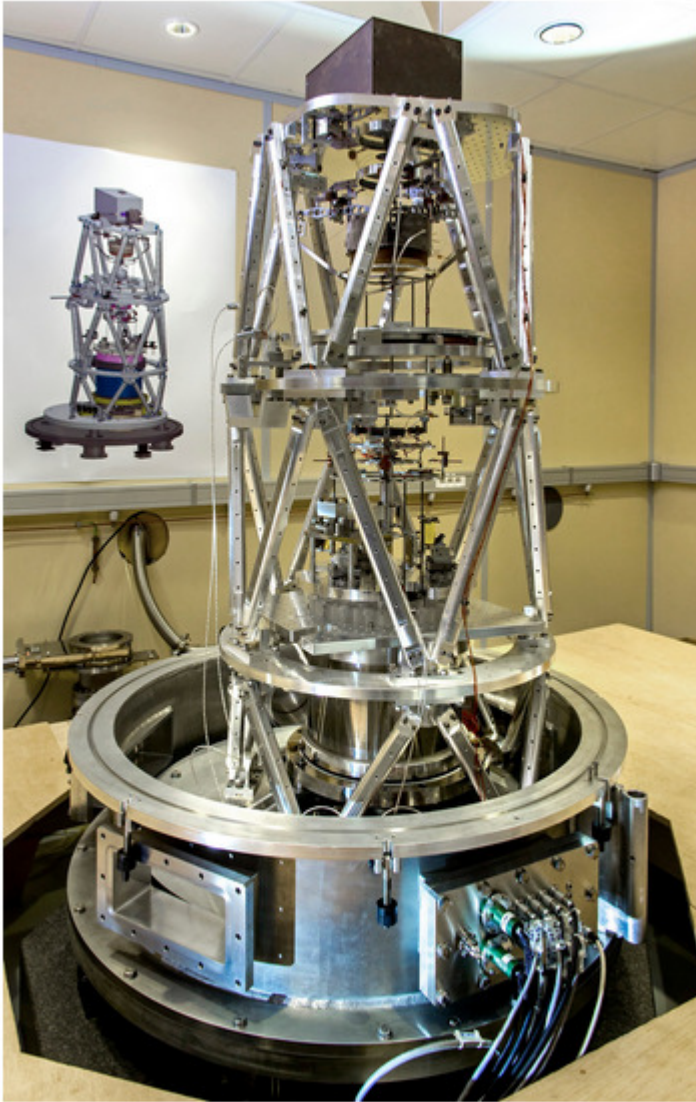


Fig. 11 – A balança de Kibble do BIPM. Disponível em <https://www.bipm.org/en/bipm/mass/watt-balance/>

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] BUREAU INTERNACIONAL DES POIDS ET MESURES, *Sistema Internacional de Unidades – SI* (Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO, Rio de Janeiro, 2012), p. 94.
- [2] N.I. Brasil, *Sistema Internacional de Unidades* (Interciência, Rio de Janeiro, 2002).



- [3] Luiz P. Damaceno, Richard Mascarin, João Marcelo P. Nogueira, Daniel V. Magalhães. A nova definição do quilograma em termos da constante de Planck. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 41, nº 3, 2019. Disponível em DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2018-0284>
- [4] The third periodic verification of National Prototypes of the Kilograma (1988-1992). Metrologia, 31, p.317-336, 1994. Disponível em <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0026-1394/31/4/007/pdf>
- [5] A Redefinição das Unidades de Medir do SI. Revista Digital AdNormas. ISSN 2595-3363. Edição 30, 2018. Disponível em <https://revistaadnormas.com.br/2018/11/27/a-redefinicao-das-unidades-de-medida-do-si/>
- [6] M. Stok, P. Barat, R.S. Davis, A. Picard e M. J. T. Milton. Metrologia, 52, p. 310-317, 2015. Disponível em <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/0026-1394/52/2/310/pdf>
- [7] B. Toman, J. Fischer e C. Elster. Metrologia 49, p. 567-571, 2012. Disponível em <https://iopscience.iop.org/issue/0026-1394/49/4>