



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO MARAJÓ – BREVES
FACULDADE DE CIÊNCIAS NATURAIS

NAYLANI SOUSA DE DEUS

**UMA ABORDAGEM LITERÁRIA SOBRE O SISTEMA
INTERNACIONAL DE UNIDADES EM CONSONÂNCIA COM A NOVA
DEFINIÇÃO DA UNIDADE DE MASSA: quilograma**

BREVES- PA
2019

NAYLANI SOUSA DE DEUS

**UMA ABORDAGEM LITERÁRIA SOBRE O SISTEMA
INTERNACIONAL DE UNIDADES EM CONSONÂNCIA COM A
NOVA DEFINIÇÃO DA UNIDADE DE MASSA: quilograma**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Faculdade de Ciências Naturais da Universidade
Federal do Pará, como requisito parcial para
obtenção do grau de Licenciado em Ciências
Naturais.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Oliveira do
Nascimento.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- D486n Deus, Naylani Souza de.
Uma nova abordagem literária sobre o sistema internacional de unidades em consonância com a nova definição da unidade de massa : quilograma / Naylani Souza de Deus. — 2019.
38 f. : il. color.
- Orientador(a): Prof. Dr. Leandro Oliveira do Nascimento
Trabalho de Conclusão (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Campus Universitário de Breves, Faculdade de Ciências Naturais, Breves, 2019.
1. Sistema internacional de unidades. 2. Unidades de medidas. 3. Quilograma. I. Título.

CDD 540.113

NAYLANI SOUSA DE DEUS

UMA ABORDAGEM LITERÁRIA SOBRE O SISTEMA INTERNACIONAL
DE UNIDADES EM CONSONÂNCIA COM A NOVA DEFINIÇÃO DA
UNIDADE DE MASSA – QUILOGRAMA

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à
Faculdade de Ciências Naturais da
Universidade Federal do Pará, como requisito
parcial para a obtenção do grau de Licenciado
em Ciências Naturais, aprovado com o
Conceito EXCELENTE

Data de aprovação: 04 / 12 / 2019

Conceito EXCELENTE

Banca examinadora:

Leandro Oliveira do Nascimento

Prof. Dr. Leandro Oliveira do Nascimento

UFPA-FACIN-BREVES (Orientador)

Manolo Cleiton Costa de Freitas

Prof. Dr. Manolo Cleiton Costa de Freitas

UFPA-FACIN-BREVES (MEMBRO)

Vanilson Gomes Pereira

Prof. Me. Vanilson Gomes Pereira (MEMBRO EXTERNO)

Breves (PA), 04 de Dezembro de 2019.

A Deus, por sua infinita graça!

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo e acima de todas as coisas agradeço a Deus, por ter me dado capacidade de produzir este trabalho. Agradeço também aos meus pais José de Deus e Marília de Sousa, meus irmãos Jonielson, Joicinete, Josenilson, Joseias e Jonias Deivisson, minhas cunhadas Luciele, Elizane e Janete e meu sobrinho Victor Gabriel, por todo apoio e amor a mim dados. Ao meu orientador Dr. Leandro Oliveira do Nascimento, agradeço por toda paciência e dedicação durante a execução deste trabalho. A todos os professores da minha faculdade – FACIN, por terem me proporcionado uma excelente formação. E aos meus amigos pelo incentivo e confiança em mim depositados. A todos vocês o meu “muito obrigada” e a minha eterna gratidão.

“Se eu não sou hoje tudo o que espero ser, ainda vejo Jesus, e isso me garante que um dia serei como ele.”

Charles Spurgeon

RESUMO

Este trabalho fundamenta-se na apresentação de uma revisão literária sobre o Sistema Internacional de Unidades (SI). Enfatizando primeiro o histórico de pesos e medidas, utilizado pela humanidade que levou a criação do SI. Em seguida, apresenta-se a estrutura do SI com todas as suas medidas de base, e suas respectivas unidades básicas das quais outras se derivam, e ainda relações de conversão que as unidades do SI tem com unidades de outros sistemas. Abrange-se também, as mudanças ocorridas nas definições das unidades básicas, que atualmente tem por definição constantes fundamentais da natureza. Ressalta-se principalmente a nova definição do quilograma que até 2018 ainda era baseado em um protótipo cilíndrico de platina iridiada. Entretanto, a sua redefinição e também do ampere, do kelvin e do mol que dela dependiam, gerou um novo SI com maior precisão e exatidão, de acordo com as exigências que a ciência e a tecnologia da atualidade demandam.

Palavras – chave: Unidades de medidas, Quilograma, Sistema Internacional de Unidades.

ABSTRACT

This work is based on the presentation of a literary review on the International System of Units (IS). Emphasizing first the history of weights and measures used by humanity that led to the creation of the IS. Then we present the structure of the SI with all its basic measures, and their respective basic units from which others derive, and also the conversion relationships that SI units have with units of other systems. It also covers changes in the definitions of basic units, which currently have by definition fundamental constants of nature. Of particular note is the new definition of the kilogram, which until 2018 was still based on a cylindrical platinum iridium prototype. However, its redefinition, as well as the ampere, kelvin and mol that depended on it, generated a new SI with greater precision and accuracy, according to the demands that today's science and technology demand.

Keywords: Units of measurement, kilogram, International System of Units.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 -	Unidades de medidas baseadas no corpo do rei.....	15
Figura 2 -	Mecanismo de pesagem para comparação de massa.....	17
Figura 3 -	Padrão do metro e do quilograma.....	20
Figura 4 -	Novo Sistema Internacional.....	27
Figura 5 -	Projeto Avogadro.....	29
Figura 6 -	Balança de Kibble.....	29
Figura 7 -	Princípio da balança de Kibble.....	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Unidades de medidas antigas.....	16
Tabela 2 -	Grandezas e unidades de base do Sistema Internacional de Unidades.....	22
Tabela 3 -	Exemplos de grandezas derivadas e de suas unidades.....	23
Tabela 4 -	Prefixos Sistema Internacional.....	23
Tabela 5 -	Algumas unidades não Sistema Internacional.....	25
Tabela 6 -	Conversão de unidades SI em unidades naturais.....	26

LISTA DE SIGLAS

BAAS – British Association for the Advancement of Science;

BIPM – Bureal Internacional de Pesos e Medidas;

CGPM – Conferência Geral de Pesos e Medidas;

CIMP – Comitê Internacional de Pesos e Medidas;

CM – Convenção do Metro;

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia;

IPK – Protótipo Internacional do Kilograma;

NIST – National Institute of Standards and Technology;

SI – Sistema Internacional de Unidades;

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	12
2	OBJETIVOS.....	13
2.1	OBJETIVO GERAL.....	13
2.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	13
3	CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA.....	14
4	O SISTEMA MÉTRICO DECIMAL.....	18
4.1	O SISTEMA MKS E O SISTEMA CGS.....	21
5	O SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES.....	21
5.1	RELAÇÕES DE CONVERSÃO ENTRE UNIDADES SI E UNIDADES NÃO SI.....	24
5.2	O SISTEMA NATURAL DE UNIDADES.....	25
6	MUDANÇAS NO SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES: O NOVO SI.....	26
7	A NOVA DEFINIÇÃO DE KILOGRAMA.....	28
7.1	O PRINCÍPIO DA BALANÇA DE KIBBLE.....	30
8	CONCLUSÃO.....	35
	REFERÊNCIAS.....	36

1 INTRODUÇÃO

Por muito tempo a humanidade utilizou medidas baseadas em seus corpos, como por exemplo, a polegada, o palmo e o pé. No geral cada povo possuía seu sistema de medidas, e essa diversidade acabou gerando muito desentendimento, uma vez que em relações principalmente de comércio entre os povos, não se compreendiam com facilidade as medidas uns dos outros. Na Revolução Francesa (1789-1799) por exemplo, dentre tantos descontentamentos o povo também criticava as relações de medições antropométricas (*ánthropos*: homem ou ser humano; *métron*: medida) existentes na época, pois os senhores de terra utilizavam esse sistema de medidas antropométrico com desonestidade para com a maioria do povo. A França apresentava o cenário ideal para a implementação de um sistema de medidas único, e por meio de um decreto do Rei Luís XVI foi delegada à Academia de Ciências de Paris a responsabilidade da reforma (Rozenberg, 2006). Esse foi considerado o primeiro passo dado em direção a um sistema que em 1960 receberia o nome de Sistema Internacional de Unidades, com a abreviatura SI.

O SI possui sete unidades de base que são: o segundo, o metro, o quilograma, o ampere, o mol, a candela e o kelvin, das quais todas as outras unidades de medição podem ser derivadas. Estas unidades de base definem grandezas como: tempo, distância, massa, corrente elétrica, quantidade de substância, intensidade luminosa e temperatura (NIST, 2018). Foram estabelecidas ainda para esse sistema um conjunto de regras a respeito da grafia das unidades e dos prefixos que devem ser utilizados em conjunto com as unidades do SI.

Banna (2017) cita que, desde sua criação o SI facilitou relações de medições e unidades de medidas, uma vez que trouxe:

- Clareza de entendimentos internacionais (técnica, científica);
- Facilitação em transações comerciais;
- Garantia de coerência ao longo dos anos;
- Coerência entre unidades e simplificações em equações.

Contudo, um modelo ou uma teoria científica nunca é eternamente exata, podendo vir a sofrer mudanças conforme a própria ciência e tecnologia exija de acordo com o seu desenvolvimento (GETEF, 2015). Nos últimos anos, conforme cita Jeckelmann (2012), novas definições das unidades de base foram intensamente discutidas pelos especialistas, dentre elas estava especialmente a unidade de massa -quilograma- que ainda era a última unidade definida

em termos de um artefato físico. Entretanto com a redefinição do quilograma e das outras unidades que dela dependiam (Mol, Kelvin e Ampere), tornou-se possível basear todo o SI em um conjunto de valores exatamente conhecidos de constantes fundamentais da natureza. As mudanças ocorridas ajustaram o SI às futuras necessidades de medição. Substituir o protótipo do quilograma por uma unidade baseada em constantes fundamentais torna o sistema sólido ao longo do tempo.

Atualmente o SI possui grande importância nas medições, uma vez que, é o sistema que repassa maior exatidão. Por esse fator, é adotado pela maioria dos países, para expressar os resultados das medições em quase todos os aspectos da sociedade moderna, desde ciência e tecnologia avançadas, passando pela fabricação de precisão até a vida cotidiana. (Jeckelmann, 2012).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Realizar uma revisão literária sobre o Sistema Internacional de Unidades. Dando ao final, ênfase a nova definição da unidade de massa, quilograma.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisar o histórico de medidas;
- Apresentar a estrutura básica do Sistema Internacional de Unidades;
- Demonstrar relações entre este e outros sistemas de medidas;
- Relatar sobre o novo Sistema internacional de Unidades;
- Apresentar a nova definição do quilograma.

3 CONTEXTUALIZAÇÃO HISTÓRICA

A humanidade sempre buscou desenvolver a capacidade de medir grandezas diversas. Autores como, Boyer (1996), Eves (1997), Ifrah (1997) realizaram pesquisas e escreveram livros sobre as primeiras unidades de medidas adotadas pelo homem, e afirmam que até o final do século XVIII os Sistemas de Medidas eram fundamentados nos costumes e tradições de cada povo.

Teixeira (2017), contextualiza que documentos e objetos encontrados em pesquisas arqueológicas, evidenciam que há mais de quatro milênios, diversos povos já utilizavam procedimentos de medição na agricultura, no comércio, nas construções, na coleta de impostos, nas heranças, nos rituais religiosos, nos calendários, nas guerras, dentre outros. O mesmo autor enfatiza que,

Alguns objetos, como os boomerangs de antigos povos que habitavam a Austrália atual, e diversos instrumentos musicais feitos de ossos ou madeira, ferramentas e armas, evidenciam claramente processos de desenvolvimento e aperfeiçoamento. Acredita-se que estes resultados, alguns ocorridos há mais de 20 000 anos, só poderiam ter sido alcançados com a utilização de instrumentos e procedimentos de medição primitivos, envolvendo alguma formalização no tratamento dos resultados das medições. Assim nascia a metrologia! (MOSCATI, *apud* TEIXEIRA, 2017).

Na pré-história por exemplo, o homem primitivo ao confeccionar instrumentos de caça e defesa utilizando ossos de animais e pedras lascadas, começava a avaliar dimensões (VOMERO, 2003). No entanto, essas avaliações eram intuitivas já que seus conhecimentos baseavam-se em noções rústicas de medidas como “maior que” e “menor que”.

A partir do momento que houve organização e consequente crescimento de grupos, as necessidades de medições foram aumentando cada vez mais. As primeiras maneiras encontradas para medir grandezas, eram bastante simples e utilizavam partes do corpo como referência por exemplo, o comprimento do pé ou largura da mão (PRÄSS, 2008). Entretanto, esses padrões não eram práticos e nem precisos, já que as medidas corporais variam de indivíduo para indivíduo.

Os povos antigos percebendo isso, encontraram uma solução temporária. De acordo com Banna (2017) foi determinado que todas as unidades de medidas da época, teriam de ser baseadas no corpo do rei (Figura 1), e ser respeitadas por todas as pessoas daquele reino. Esse sistema de medida baseado no corpo do rei, dificultava as relações de trocas e o comércio de mercadorias entre diferentes reinos, já que cada rei possuía medidas corporais diferentes uns dos outros. Tais processos não mais satisfaziam as necessidades dos homens, já que as relações principalmente do comércio entre as regiões, exigiam medidas padrões que fossem as mesmas

em qualquer lugar.

Figura 1: Unidades de medidas baseadas no corpo do rei.



Fonte: <http://www.fisica.net/unidades/pesos-e-medidas-historico.pdf>

Os padrões de medidas principalmente de distância, distinguiam-se bastante de uma região para outra. Segundo Silva (2016) os babilônios utilizavam o “dedo” como unidade de medida de comprimento, que equivalia aproximadamente 16 milímetros, e também o cúbito (ou côvado) correspondente a 30 dedos. Os Gregos por sua vez, utilizavam o “dígitus” que correspondia a 19,3 milímetros. O autor cita ainda que as unidades pé e polegada foram em geral consideradas como “unidades padrão” para a maioria dos povos antigos.

Godoi & Guirado (2012) citam como exemplo, os anglo-saxônicos, que utilizavam como unidade de medida de comprimento o pé, equivalente a 30,48 centímetros. Os autores ainda relatam a história de como obteve-se esta medida:

um rei da Inglaterra ordenou que seus oficiais fossem a uma igreja e, após o culto, enfileirassem os dezesseis primeiros homens que de lá saíssem. Cada um dos homens a partir do segundo deveria encostar o dedo grande do seu pé no calcanhar do homem á sua frente. Este comprimento, que foi facilmente medido com uma corda, foi dividido em dezesseis partes iguais e tornou-se o “pé” oficial na Inglaterra, naquela época. (GODOI & GUIRADO, 2012).

Além destas unidades de medidas de distância citadas anteriormente, destacam-se também algumas outras. Vejamos a tabela 1 a seguir, com as unidades e respectivas civilizações que as utilizavam:

Tabela 1 - Unidades de medidas antigas

UNIDADE	UTILIZAÇÃO
Braça	Portugueses
Côvado	Babilônios, Egípcios e Hebreus
Cúbito	Egípcios
Dígito (Polegadas)	Gregos
Jardas	Ingleses
Léguas	Portugueses, Espanhóis, alemães e Franceses
Milhas	Povos Latinos
Palmos	Gregos e Egípcios
Passos	Gregos
Pés	Gregos

Fonte: SILVA, 2016.

Centurión (1994) afirma que os antigos babilônios, os egípcios, gregos e romanos padronizaram diversos “pesos e medidas” para atender as necessidades das suas sociedades.

Os egípcios usavam a unidade de medida cúbito, que ia do cotovelo à ponta do dedo médio, mas por gerar resultados confusos, já que havia variação de pessoa pra pessoa, decidiram criar um padrão único, como cita Banna:

no lugar do próprio corpo, eles começaram utilizar em suas medições, a princípio, barras de pedra com o mesmo comprimento, que ficou conhecido como cúbito-padrão. O problema era que o cúbito-padrão em barra de pedra não era um instrumento muito prático, então passaram a construir as barras de madeira, para facilitar o transporte. Porém, como a madeira logo desgastava com o tempo e com o uso, decidiram, por fim, gravar os comprimentos equivalentes nas paredes dos principais templos egípcios para que cada um conferisse periodicamente o tamanho de suas barras. (BANNA, 2017, p. 10).

De acordo com Godoi & Guirado (2012), a civilização egípcia ainda, se desenvolveu às margens férteis do Rio Nilo. Essas terras precisavam ser medidas e para facilitar o processo de medição os agrimensores do faraó utilizavam cordas espaçadas com um intervalo de 5 cúbitos entre nós. Essa técnica de medição deu origem às trenas que usamos hoje em dia.

Antigamente também, para realizar comparações de massa o homem equilibrava os corpos, um em cada mão. Até que, conforme afirma Silva (2016) surgiu a primeira máquina de comparação: uma vara suspensa no meio por uma corda. Os objetos eram pendurados um em cada extremidade da vara e, se houvesse o equilíbrio, ou seja, se a vara ficasse na horizontal, eles possuíam a mesma massa (Figura 2).

Figura 2: Mecanismo de pesagem para comparação de massa



Fonte: Bendick, 1965, P.14

Vale ressaltar aqui, os princípios físicos existentes nesse mecanismo de pesagem. Ao usar uma balança como a que foi citada acima, fatores como a força peso e o deslocamento do objeto em relação ao ponto de equilíbrio, estavam presentes no processo de pesagem. Ou seja, nesse mecanismo existia como referencial, a realização de Trabalho (τ) que pela equação 1.0 F é a força e d é o deslocamento.

$$\tau = Fd \quad (1.0)$$

A força por sua vez, pode ser obtida através do produto da massa (m) pela gravidade (g). Dessa forma, rearranjando a equação 1.0 temos que,

$$\tau = mgd \quad (1.1)$$

De acordo com a equação 1.1 o trabalho exercido pela balança depende da massa (m), da gravidade (g) e do deslocamento (d) do objeto em relação ao ponto de equilíbrio. No entanto, como citado anteriormente, alguns povos só tinham conhecimentos baseados em “maior ou menor que”, e por esse fator, muitas vezes os mecanismos de pesagens antigos faziam comparações erradas entre as massas, uma vez que, se a distância entre os objetos pesados em relação ao ponto de equilíbrio (que no caso da balança acima é uma corda) não for exatamente igual entre os dois objetos, a balança erroneamente pode ou não ficar em equilíbrio.

Ainda sobre os processos de medições antigos, Lanner de Moura (1995) enfatiza que a civilização da Babilônia tinha carência de madeira apropriada para construir, seda e ornamentos especiais para a corte, entretanto possuía abundância de metais preciosos. Para suprir o que faltava os mercadores percorriam grandes distâncias para fazer relações de troca com outras civilizações, e por isso acabaram desenvolvendo um aprimorado sistema de medidas, com uso até de balança e pesos-padrão. (POZEBON; LOPES, 2013).

Com relação ao tempo, apesar de não poder segurá-lo ou guardá-lo, o homem conseguia medi-lo registrando as repetições dos fenômenos periódicos. Qualquer evento familiar servia para marcar o tempo, como o período entre um e outro nascer do Sol, a sucessão das luas cheias etc. (SILVA, 2016). O relógio de Sol, que consistia em um bastão espetado no chão no centro de um círculo, foi o primeiro instrumento para medir a grandeza tempo.

Percebe-se que ao longo da história, as medidas, em sua grande maioria antropométricas, foram levadas de uma civilização a outra através de conquistas de terras e comércio, ou seja, por relações de poder. No entanto, nenhuma conseguiu uma utilização universal e homogênea, pois conforme afirma Silva (2016) devido a reprodução inexata, erros de interpretação e desonestidade de alguns, a situação se tornava cada vez mais delicada e confusa.

4 O SISTEMA MÉTRICO DECIMAL

A ideia de um sistema de medidas coerente e universal, fundamentado em grandezas físicas invariantes surgiu a partir do século XVI com a necessidade socioeconômica e política das monarquias absolutistas (principalmente na França e Inglaterra) e com os crescentes avanços no campo das ciências, ganhando força a partir do séc. XVIII com as mudanças trazidas pela Revolução Francesa (DIAS, 1998).

No último quarto do século XVIII a monarquia na França de Luis XVI estava entrando em declínio devido a seus abusos de poder e deterioração da situação econômica do país. As revoltas se intensificaram na última década do século. Um dos problemas que provocava confrontos entre o poder e o povo era o abuso no uso das medições. Para acalmar os revoltosos o Rei Luis XVI aceitou promover a criação de um sistema de unidades único a ser utilizado em todo o país, baseado em novos padrões que fossem transparentes e estáveis. O novo sistema deveria ser decimal e ter por base padrões que não fossem antropomórficos e que as unidades das diversas grandezas não fossem independentes entre si, e, ainda, que tivesse uma sólida base científica. Para criar o novo sistema foi acionada a Academia de Ciências da França, que congregava cientistas muito capazes, dentre eles Lavoisier. (MOSCATI, *apud* TEIXEIRA, 2017).

Assim, em 1790 os franceses criaram o sistema métrico, e em 1791 foi determinado que o novo sistema deveria seguir a ordem decimal e ter como base uma unidade de comprimento, com a denominação “metro” que é originária do grego *métron* e significa “o que mede”.

Silva (2016), enfoca que estabeleceu-se ainda que a definição do metro deveria estar presa a um dos três seguintes fenômenos naturais:

- Comprimento de um pêndulo de período (2 oscilações) igual a 1 segundo, latitude 45°;
- Comprimento de 1/4 do círculo equatorial;
- Comprimento de 1/4 de meridiano terrestre do equador a um dos pólos;

Vendo que a primeira definição dependeria de grandezas alheias ao comprimento, como o tempo e o peso, e como a segunda definição demandava medidas do equador (e que não se tinham na época), foi aceita a alternativa do meridiano terrestre, pois conforme cita Silva (2016) o meridiano que passa por Paris já havia sido medido precisamente e podia ser comparado com a nova determinação. E dessa forma o metro recebeu sua primeira definição, como a décima milionésima parte do meridiano terrestre. Nesta mesma época, propôs-se também a adoção da unidade de massa “grave” que correspondia ao peso de um decímetro de água à temperatura em que sua densidade é máxima (4° C).

Com o desenvolvimento da ciência, percebeu-se que uma nova medição mais precisa dos meridianos inevitavelmente levaria a medida do metro a um valor pouco diferente. E por conta disso, surgiu a segunda definição de metro: a distância entre dois extremos de uma barra de platina.

A unidade de massa “grave” também foi mudada. Por meio de decretos ficou decidido que tal unidade passaria a ser chamada quilograma. Além disso, adotaram para o sistema também a unidade de tempo denominada “segundo”, a unidade de área denominada “are” e a unidade de volume denominada “estere”. O sistema foi aprovado em 1° de outubro de 1793, ajustando sua aplicação a partir de 1° de julho de 1794 (Brandi, 2017). Após definidas as unidades, foi determinada a confecção em platina dos padrões representativos do metro e do quilograma. Finalmente, em 1799 com os novos resultados da medição do Meridiano, foram construídos novos padrões de platina, para o metro e o quilograma, que passaram a ser conhecidos como "o metro e o quilograma dos Arquivos" e foram apresentados por Laplace juntamente com a lista de múltiplos e submúltiplos das unidades do então “Sistema Métrico Decimal”, que foi adotado pela França sob o lema “Para todos os povos e para todos os tempos”. (Rozenberg, 2006; Teixeira, 2017).

A partir de 1840 o Sistema Métrico Decimal começou a se difundir em outras nações, que recebiam do Governo Francês, conjuntos de padrões desse sistema que passou a ser conhecido informalmente como Sistema Francês. No Brasil, o Sistema Métrico Decimal foi estabelecido em 26 de junho de 1862, por decreto do então Imperador Dom Pedro II.

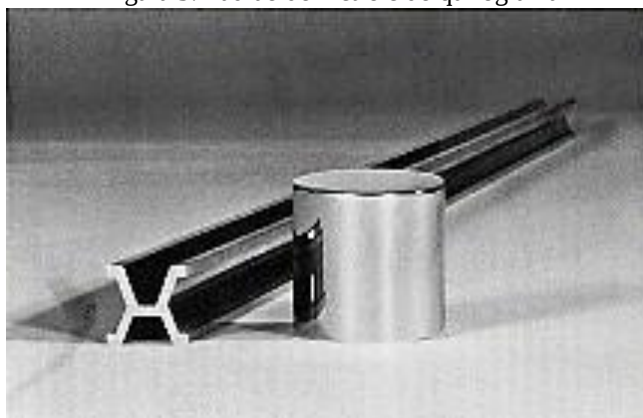
Em 1875 dezessete Países assinaram em Paris uma convenção internacional chamada Convenção do Metro com o propósito de estabelecer uma autoridade internacional no campo da metrologia.

Segundo a Sociedade Brasileira de Metrologia, os signatários do então sistema métrico decidiram criar três instituições para conduzir as atividades internacionais em matéria de um sistema uniforme de medidas. Uma dessas instituições foi o “Bureau Internacional de Pesos e Medidas (BIPM)” que é um laboratório permanente e centro mundial da metrologia científica, suas atividades incluem o estabelecimento de normas de base e as escalas das quantidades de capital físico além da manutenção dos “padrões protótipo internacional” (INMETRO, 2012).

Em consequência a Convenção do Metro (CM), foram encontrados problemas de imprecisões e imperfeições nos padrões feitos de platina do metro e do quilograma. Devido a isso, foi determinada a confecção de novos protótipos representativos para essas unidades, produzidos a partir de uma liga metálica de 90% de platina e 10% de irídio. Sendo convencionado que, mesmo que viessem a ser constatadas imprecisões nesses padrões de arquivo, estes representariam por definição as suas unidades (metro e quilograma). Devido à constatação de imprecisões nas medidas para o arco de um quarto do meridiano terrestre, foi proposta também uma nova definição para o metro (TEIXEIRA, 2017).

A 1ª Conferência Geral de Pesos e Medidas (CGPM) realizada em 1889, sancionou após análise satisfatória os novos padrões de arquivo do metro e do quilograma (Figura 3) estabelecendo a guarda dos mesmos ao BIPM, que os arquivou em sua sede. Foram apresentadas também as redefinições do metro e do quilograma baseadas em seus novos padrões de arquivo, e do segundo baseada na duração do “dia solar médio”.

Figura 3: Padrão do metro e do quilograma



Fonte: Sociedade Brasileira de Metrologia

4.1 O SISTEMA MKS E O SISTEMA CGS

Com o decorrer dos anos, vários sistemas foram criados e usados associadamente ao Sistema Métrico Decimal. Por volta de 1860, Maxwell e Thomson formularam regras junto à Associação Britânica para o Avanço da Ciência (BAAS), visando a formação de um sistema coerente, composto de unidades de base e de unidades derivadas, e em 1874 a BAAS introduziu o sistema CGS. Este consistia em um conjunto de unidades coerentes com três dimensões, baseado em três unidades mecânicas: centímetro, grama e segundo, e que utilizava os prefixos que iam do micro ao mega para expressar os múltiplos e submúltiplos decimais. O progresso da física como ciência experimental é devido em grande parte à utilização desse sistema (INMETRO, 2012).

Na 1ª Convenção Geral de Pesos e Medidas (CGPM), uma importante inovação foi indicada por Giovanni Giorgi, que propôs um novo sistema de unidades, similar ao CGS, cujas unidades de base eram o metro, o quilograma e o segundo – o sistema MKS, que em 1946 passou a possuir 4 dimensões, sendo a quarta a unidade ampere, passando a ser chamado Sistema MKSA. Essa proposta então, abriu caminho para outras extensões.

5 O SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES

A criação do Sistema Métrico Decimal na época da Revolução Francesa e o posterior depósito de dois padrões de platina, representando o metro e o quilograma, em 22 de junho de 1799, nos Arquivos da República em Paris, podem ser considerados como a primeira etapa do desenvolvimento do atual Sistema Internacional de Unidades.

O BIPM quando foi criado (1875), visava atuar apenas nas grandezas massa (quilograma) e comprimento (metro), o que se pode perceber no seu nome original- Bureau Internacional de Pesos e Medidas. No entanto logo ficou evidente, que deveria operar também em outras áreas de medidas. Estas necessidades foram reconhecidas pela 6ª CGPM (1921) que, ao revisar o texto original da CM, estendeu os objetivos e responsabilidades do BIPM para outras áreas da Física. (MOSCATTI, *apud* TEIXEIRA, 2017)

Na 10ª CGPM realizada em 1954, foi aprovada e sancionada a proposta do Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIMP) que visava a mudança do nome do sistema para o novo “Sistema Prático”, que segundo Rozenberg (2006), além das unidades de comprimento, massa e tempo, foram adicionadas as unidades de corrente elétrica, de temperatura

termodinâmica e de intensidade luminosa, respectivamente, “ampere”, “kelvin” e “candela”, estas unidades compuseram o conjunto das seis unidades de base.

Em 1960 na 11ª CGPM, ocorreu a alteração da nomenclatura “Sistema Prático” para “Sistema Internacional de Unidades” e estabelecida também a abreviatura SI. Em 1971, por determinação da 14ª CGPM foi inserida uma sétima unidade de base no SI denominada “mol”, que era referente a quantidade de substância. Nesta conferencia foram consolidadas então as 7 unidades básicas do SI, sendo elas: metro, quilograma, segundo, ampere, kelvin, mol e candela, que correspondiam respectivamente às grandezas fundamentais: comprimento, massa, tempo, corrente elétrica, temperatura termodinâmica, quantidade de substância e intensidade luminosa (INMETRO 2012).

Conforme aconteciam as CGPM’s, possíveis lacunas no SI eram evidenciadas e mudanças ocorriam no sistema. Isso gerou um SI estruturalmente “estável” composto de sete grandezas de base, para as quais existem sete unidades de base, que podem ser observadas na Tabela 2.

Tabela 2: Grandezas e unidades de base do Sistema Internacional de Unidades

GRANDEZA	UNIDADES SI DE BASE	
	NOME	SÍMBOLO
Comprimento	Metro	m
Massa	Quilograma	kg
Tempo	Segundo	s
Corrente elétrica	Ampere	A
Temperatura termodinâmica	Kelvin	K
Quantidade de matéria	Mol	mol
Intensidade luminosa	Candela	cd

Fonte: INMETRO

As demais grandezas são denominadas grandezas derivadas, e são medidas utilizando unidades derivadas, definidas como produto de potências das unidades de base, como exemplos demonstrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Exemplos de grandezas derivadas e de suas unidades

Grandeza derivada	Símbolo	Unidade Derivada	Símbolo
área	A	metro quadrado	m ²
volume	V	metro cúbico	m ³
velocidade	Y	metro por segundo	m/s
aceleração	A	metro por segundo ao quadrado	m/s ²
Massa específica	P	quilograma por metro cúbico	kg/m ³
Campo magnético	H	ampere por metro	A/m
Concentração	C	mol por metro cúbico	Mol/m ³
luminância	L _v	candela por metro quadrado	Cd/m ²
Índice de refração	N	um	1

Fonte: INMETRO

Adotou-se também um conjunto de prefixos para serem usados (quando preciso) de forma combinada as unidades do SI (Tabela 4), a fim de exprimir valores de grandezas que são muito maiores ou menores do que as unidades do SI. Esses prefixos podem ser usados com qualquer unidade de base ou com as unidades derivadas com nomes especiais.

Tabela 4 - Prefixos SI

Fator	Nome	Símbolo		Fator	Nome	Símbolo
10 ¹	deca	Da		10 ⁻¹	deci	d
10 ²	hecto	H		10 ⁻²	centi	c
10 ³	quilo	K		10 ⁻³	mili	m
10 ⁶	mega	M		10 ⁻⁶	micro	μ
10 ⁹	giga	G		10 ⁻⁹	nano	n
10 ¹²	tera	T		10 ⁻¹²	pico	p
10 ¹⁵	peta	P		10 ⁻¹⁵	femto	f
10 ¹⁸	exa	E		10 ⁻¹⁸	Atto	a
10 ²¹	zetta	Z		10 ⁻²¹	zepto	z
10 ²⁴	yotta	Y		10 ⁻²⁴	yocto	y

Fonte: INMETRO

Vale ressaltar que quando há uso de prefixos, o prefixo e a unidade combinam-se formando uma palavra única. E em conformidade o símbolo do prefixo e o símbolo da unidade são escritos sem espaços, para formar um símbolo único que pode ser elevado a qualquer

potência, por exemplo quilômetro, km. O quilograma (kg) por sua vez, é uma exceção, porque embora ele seja uma unidade de base o nome já inclui um prefixo por conta da escolha do padrão do quilograma na 1ª CGPM. Desta forma, os múltiplos e submúltiplos do quilograma são escritos de forma que os prefixos combinem com o grama.

É evidente que o SI é um sistema organizado que apresenta de maneira padronizada definições para unidades de medidas. Atualmente é utilizado em quase todo o mundo, e facilita relações comerciais daí decorrentes. Contudo, o Inmetro (2012) ressalta que o SI não é estático, mas evolui de modo a acompanhar as crescentes exigências mundiais demandadas pelas medições, em todos os níveis de precisão, em todos os campos da ciência, da tecnologia e das atividades humanas.

5.1 RELAÇÕES DE CONVERSÃO ENTRE UNIDADES SI E UNIDADES NÃO SI

O uso do SI simplifica o ensino da ciência, uma vez que é o único sistema reconhecido universalmente possuindo uma vantagem distinta quando se estabelece um diálogo internacional. Entretanto, existem unidades não SI que por razões históricas estão intensamente difundidas em nossa cultura, e devido a isso serão sempre usadas, como por exemplo as unidades de tempo: minuto, hora e dia.

Por outro lado, os cientistas devem ter a liberdade para utilizar unidades não SI quando consideradas mais apropriadas ao seu propósito. Em diversas áreas é mais conveniente exprimirem - se os resultados de observações experimentais ou de cálculos teóricos por meio das constantes fundamentais da natureza. Dentre os sistemas de unidades mais importantes baseados nas constantes fundamentais, está o sistema de unidades naturais, utilizado no campo da física de alta energia e de partículas.

No entanto, o emprego das unidades SI é recomendado em todos os campos da ciência e da tecnologia, e por conta disso unidades não SI, são geralmente definidas em termos de unidades SI. Sendo assim, quando unidades não SI são utilizadas, o fator de conversão para o SI deve ser sempre incluído. Algumas unidades não SI estão listadas na tabela 5 abaixo, com o seu fator de conversão para o SI.

Tabela 5 – Algumas unidades não SI

Grandeza	Nome da Unidade	Símbolo da Unidade	Valor em Unidades do SI
Unidades fora do SI, em uso com o SI			
tempo	Minuto	min	1 min = 60 s
	Hora	h	1 h = 60 min = 3.600 s
	dia	d	1 d = 24 h = 86.400 s
energia	elétron-volt	eV	1 eV = 1,602 176 53 (14) x 10 ⁻¹⁹ J
massa	dalton,	Da	1 Da = 1,660 538 86 (28) x 10 ⁻²⁷ kg
	unidade de massa atômica unificada	u	1 u = 1 Da
comprimento	Unidade astronômica	ua	1 ua = 1,495 978 706 91 (6) x 10 ¹¹ m
Unidades Naturais			
velocidade	unidade natural de velocidade (velocidade da luz no vácuo)	c ₀	299 792 458 m/s (exato)
ação	unidade natural de ação (constante de Planck reduzida)	ħ	1,054 571 68 (18) x 10 ⁻³⁴ J s
massa	unidade natural de massa (massa do elétron)	m _e	9,109 3826 (16) x 10 ⁻³¹ kg
tempo	unidade natural de tempo	ħ/m _e c ² ₀	1,288 088 6677 (86) x 10 ⁻²¹ s

Fonte: INMETRO

5.2 O SISTEMA NATURAL DE UNIDADES

Segundo Myers (Comunicação Pessoal) o SI em alguns casos se torna inutilizável para cálculos envolvendo grandes massas, como por exemplo de estrelas ou o tamanho de uma galáxia. Para esse tipo de cálculo é comum usar o sistema natural de unidades, no qual existe apenas uma dimensão fundamental, a energia. Isso é feito após definirmos, a constante de Planck, a velocidade da luz e a constante de Boltzmann como valores unitários, ou seja $\hbar = c = k_B = 1$. Ao fazer isso, as outras unidades, como tempo e posição, são dadas em termos das unidades de energia.

Para fazer conversões de unidades SI para unidades naturais, ou vice versa, se multiplica ou divide pelos fatores $\hbar$, c ou K_B com expoentes apropriados para obter as unidades desejadas. Algumas regras para converter unidades SI em unidades naturais e para a conversão reversa são fornecidas na Tabela 6.

Tabela 6 – Conversão de unidades SI em unidades Naturais

Variável	Unid. SI	Unid. Natural	Fator	Unid. Natural → Unid. SI
Massa	kg	E	c^{-2}	$1 \text{ GeV} \rightarrow 1.7827 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Distancia	m	E^{-1}	$\hbar c$	$1 \text{ GeV}^{-1} \rightarrow 1.9733 \times 10^{-16} \text{ m}$
Tempo	$\text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$	E^{-1}	$\hbar$	$1 \text{ GeV}^{-1} \rightarrow 6.5823 \times 10^{-25} \text{ s}$
Energia	$\text{kg m s}^{-1} \text{ m}$	E	1	$1 \text{ GeV} \rightarrow 1.6022 \times 10^{-10} \text{ J}$
Movimento	s^{-1}	E	c^{-1}	$1 \text{ GeV} \rightarrow 5.3444 \times 10^{-19} \text{ kg m s}^{-1}$
Velocidade	$\text{kg m}^2 \text{ s}^{-1}$	Adimensional	c	$1 \rightarrow 2.9979 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$
Movimento angular	m^2	Adimensional	$\hbar$	$1 \rightarrow 1.0546 \times 10^{-34} \text{ J s}$
Área	$\text{kg m s}^{-2} \text{ kg}$	E^{-2}	$(\hbar c)^2$	$1 \text{ GeV}^{-2} \rightarrow 3.8938 \times 10^{-32} \text{ m}^2$
Força	$\text{m}^{-1} \text{ s}^{-2}$	E^2	$(\hbar c)^{-1}$	$1 \text{ GeV}^2 \rightarrow 8.1194 \times 10^5 \text{ N}$
Densidade de Energia	$\text{C} = \text{A} \cdot \text{s}$	E^4	$(\hbar c)^{-3}$	$1 \text{ GeV}^4 \rightarrow 2.0852 \times 10^{37} \text{ J m}^{-3}$
Carga		Adimensional	1	$1 \rightarrow 5.2909 \times 10^{-19} \text{ C}$

Fonte: Natural system of units in general relativity, p. 2

6 MUDANÇAS NO SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES: O NOVO SI

Apesar dos avanços conquistados no campo da metrologia em virtude do estabelecimento do SI em diversos países do mundo, este sistema ainda possuía algumas falhas que preocupavam a sociedade científica, como por exemplo unidades definidas através de objetos físicos –kg- e que deixavam transparecer que tal sistema ainda não estava disponível “para todos os tempos, nem para todos os povos”.

No entanto, no dia 16 de novembro de 2018, ocorreu em Versalhes a 26ª CGPM, onde um grupo de 60 países votou de forma unânime, por revisar e modificar de maneira profunda o SI como nunca houvera desde seu estabelecimento após a revolução francesa. Essa mudança faria com que o SI não dependesse mais de nenhum artefato físico, e sim, inteiramente baseado em propriedades fundamentais invariáveis da natureza – Constantes fundamentais. Conforme formula o National Institute of Standards and Technology – NIST (2019), em português Instituto Nacional de Padrões e Tecnologias -uma agência governamental dos Estados Unidos, essas constantes são essenciais para um conjunto de princípios científicos bem estabelecidos, possibilitando para a humanidade um conhecimento cada vez maior a respeito das leis naturais que regem o nosso universo. Como exemplo disso, conhecemos o famoso $E = mc^2$ de Einstein, que descreve o comportamento da massa e da energia a nível universal.

Mas, para que as unidades do SI se relacionem a constantes fundamentais ou atômicas, necessita-se de projetos experimentais que permitam a conexão de suas definições às constantes. No qual, esses projetos devem exercer a capacidade de amplificar efeitos atômicos ou quânticos para a escala macro, e ainda não causar descontinuidade na cadeia de rastreabilidade – continuidade em relação a definição anterior - previamente existente.

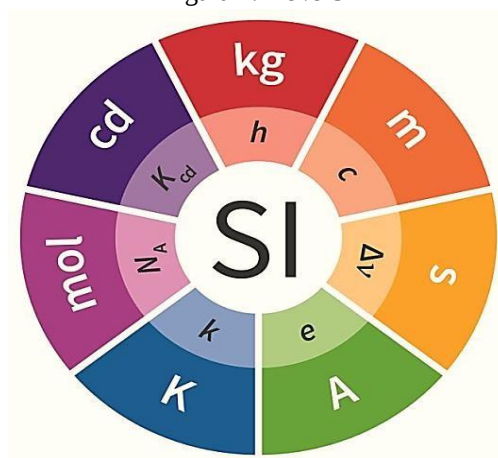
(INMETRO,2012)

Vale ressaltar que os primeiros passos em direção a um sistema baseado em constantes fundamentais foram dados quando se redefiniu o segundo em 1963 e o metro em 1983, para baseá-los em definições de natureza atômica ou quântica. Isso por sua vez, evidenciou vantagens significativas em relação as definições antigas, como por exemplo, praticidade as suas medições com um alto valor de exatidão. Portanto, na época ficou claro que este deveria ser o caminho a seguir dentro do SI no futuro (INMETRO, 2019).

Como se pode notar, desde a década de 60 a CGPM busca substituir as definições de unidades baseadas em padrões físicos. Por muitos anos, os cientistas mediram cuidadosamente as constantes da natureza em termos das antigas definições das unidades SI, e apesar disso até maio de 2019 a unidade de massa ainda dependia do Protótipo Internacional do Quilograma (IPK). Este era tão precioso que só era usado para calibrar as suas cópias uma vez a cada 40 anos, sob a fiscalização de rigorosos procedimentos como: limpar a vapor e lavar todos os artefatos do quilograma antes de calibrá-los. E mesmo com todo esse tratamento cuidadoso, percebeu-se que a massa do IPK parecia estar mudando ao longo dos anos, o que era preocupante pois por definição a sua massa não poderia mudar nunca. Foi então que a comunidade mundial de metrologia optou por redefinir o quilograma, e as unidades que dela derivavam ou dependiam como o ampere, o Kelvin e o mol, em termos de constantes fundamentais da natureza, e atualmente suas novas definições são baseadas em valores numéricos fixos da constante de Planck (h), da carga elementar (e), da constante de Boltzmann (k) e da constante de Avogadro (N_A), respectivamente.

Em maio de 2019, ocorreu a adoção oficial do novo SI (Figura 4), no qual as definições das unidades no novo sistema com base em constantes fundamentais, passam a ser universais.

Figura 4: Novo SI



Fonte: Cartilha O Novo SI.

As sete constantes definidoras das unidades do SI são:

- A frequência hiperfina do cézio $\Delta\nu_{Cs}$;
- A velocidade da luz no vácuo c ;
- A constante de Planck h ;
- A carga elementar e ;
- A constante de Boltzmann k ;
- A constante de Avogadro N_A ; e
- A eficácia luminosa de uma radiação visível definida K_{cd} .

7 A NOVA DEFINIÇÃO DO QUILOGRAMA

A unidade de massa – quilograma – antes denominada grave, recebeu por duas vezes definições baseadas em artefatos físicos. O primeiro, era um cilindro metálico feito somente de platina, que por apresentar imperfeições em sua estrutura ao longo do tempo foi substituído por outro. O segundo cilindro por sua vez, foi produzido a partir de uma liga metálica constituída de 10% de irídio e 90% de platina, que tornaria o protótipo do kg mais “resistente” (Ver seção 3). E por vários anos o kg ficou definido como: “O quilograma é a unidade de massa, igual à massa do protótipo internacional do quilograma (IPK). Assim, a massa do protótipo internacional do quilograma, $m(K)$, é exatamente igual a 1kg.” (INMETRO,2012).

No entanto, com o passar dos anos foram surgindo várias problemáticas, devido o protótipo internacional do quilograma, vir demonstrando variação em sua massa, o que acarretava variação também nas demais que são dela derivadas ou dependentes, como o ampere, o mol e o Kelvin. Segundo os metrologistas a tendência era que a cada 100 anos as cópias irmãs do grande K (nome informal do IPK) ganhassem massa em relação a ele, mas uma explicação alternativa era que o IPK estava perdendo massa em relação as suas cópias. Por conta disso, na 21ª CGPM, foi recomendado que os laboratórios nacionais continuassem a trabalhar no aperfeiçoamento de experiências que vinculassem a unidade de massa à constantes fundamentais ou atômicas, para que no futuro, alguma pudesse servir de base a uma nova definição do quilograma.

O quilograma era a única unidade de medida do SI que desde a 1ª CGPM em 1889 ainda dependia de um artefato material para ser definido. Entretanto, na 26ª CGPM ocorrida no mês de novembro de 2018, foi aprovada a nova definição do quilograma e atualmente a unidade de massa não depende mais de um objeto físico, mas seu valor agora deriva de uma invariável

fundamental da natureza, a constante de Planck. Sendo sua nova definição: “O kg continuará a ser a unidade de massa, mas seu valor será estabelecido fixando-se o valor numérico da constante de Planck (h), exatamente igual a $6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ quando expresso em unidades do SI, $\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$, que é igual a joule segundo ($\text{J} \cdot \text{s}$)” (INMETRO, 2019).

A conexão entre a massa do IPK e a constante de Planck se dá através de duas conhecidas formulações da física, uma é a equação $E = mc^2$ de Einstein, e a outra é $E = h\nu$ de Max Planck.

A equação de Einstein mostra que a massa pode ser compreendida e também quantificada em termos de energia, e a equação de Planck por sua vez, evidencia que a energia pode ser calculada em termos da frequência (ν) de alguma entidade como um fóton. Reunindo essas duas equações entende-se que a massa está essencialmente relacionada a h , utilizado pela primeira vez por Max Planck para descrever o conteúdo de energia extremamente pequeno de fótons individuais emitidos pelos átomos em objetos quentes (NIST, 2019).

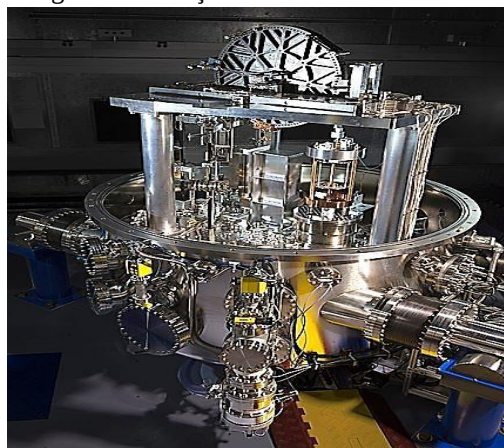
Segundo a Sociedade Brasileira de metrologia, a nova definição do kg foi decidida após uma disputa entre dois experimentos, o Projeto Avogadro (Figura 5) e a Balança de Watt (Figura 6), que apesar de serem concebidos com princípios diferentes, apresentavam o mesmo objetivo de produzir resultado de medições estáveis. Todavia, o instrumento que possibilitou a maior das revoluções no SI foi a balança de Watt, que redefiniu o kg em função da constante de Planck.

Figura 5: Projeto Avogadro



Fonte: <https://www.wikipedia.org>

Figura 6: Balança de Kibble



Fonte: <https://www.wikipedia.org>

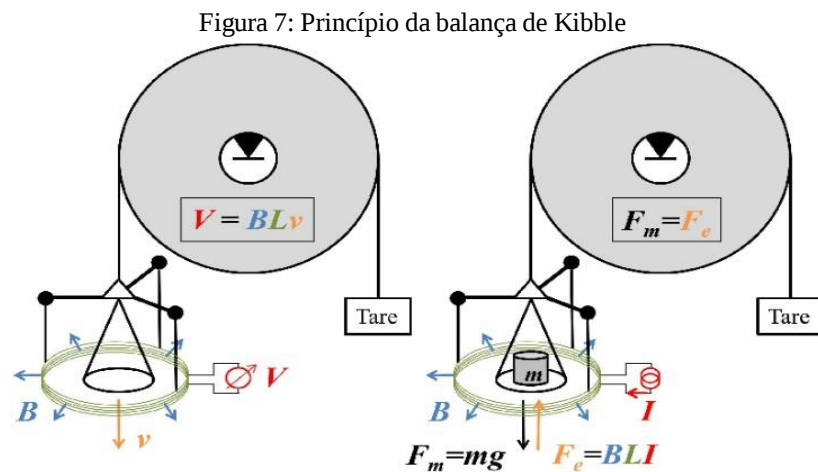
O físico e metrologista inglês Bryan Kibble (1938-2016) já havia apresentado um experimento realizado com essa balança em 1970, o qual determinava com alta precisão a massa de um objeto e também a constante de Planck. E em 2016 o físico Stephan Schlamminger e sua equipe produziram de forma aprimorada uma balança de watt, e em homenagem a Bryan Kibble

renomearam o instrumento para balança de Kibble.

7.1 O PRINCÍPIO DA BALANÇA DE KIBBLE

Originalmente chamada “equilíbrio de Watt” por usar medições de corrente e tensão na bobina, cujo produto é expresso em watts (unidade de potência SI), a balança de Kibble é uma máquina de pesagem extremamente precisa. Assim como outras balanças, ela é projetada para igualar uma força com outra. Mas, vale ressaltar que diferente das balanças comuns que trabalham somente com força gravitacional, a balança de Kibble por sua vez, trabalha com o equilíbrio entre a força da gravidade igualada a uma força eletromagnética calibrada (Figura 5).

Neste caso, o peso de uma massa teste é compensado por uma força produzida quando uma corrente elétrica é passada através do fio de uma bobina imersa em um campo magnético ao redor (NIST, 2019).



Fonte: BIPM

Segundo o NIST (2019), o campo magnético é gerado por um grande sistema de ímãs permanentes. A bobina móvel por sua vez, é eletrificada e se torna um eletroímã, com isso surge uma interação entre o campo magnético e o campo da bobina, produzindo uma força (F_{el}) (ao qual é controlada pelo ajuste da corrente) ascendente sobre a bobina.

A medição efetuada por uma balança de Kibble, consegue mensurar a massa de um objeto através da determinação de duas grandezas físicas presentes nesse sistema, são elas a tensão induzida (U) e a corrente (I) que passa pela bobina (ver figura 5), realizando-as através de duas etapas ou modos de operação: o modo de velocidade/calibração e o modo pesagem/força.

No primeiro modo, chamado de velocidade ou calibração, a bobina é movida (com a ajuda de um motor elétrico) pelo campo magnético a uma velocidade (v) precisamente constante e controlada por um sistema de interferometria que consegue captar diferenças de posições tão pequenas quanto uma fração do comprimento de onda da luz do laser, garantindo que a velocidade (v) da bobina permaneça perfeitamente constante para que a força do campo magnético possa ser calculado. O movimento da bobina pelo campo induz em si mesma uma tensão (U) exatamente proporcional a força de campo que de acordo (2.0)

com a Lei de Indução de Faraday – a qual diz essencialmente que quando há variação do fluxo magnético através de um circuito, surge neste uma força eletromotriz induzida proporcional a taxa de variação temporal do fluxo magnético – pode ser medida através da equação 2.0. Onde

v é a velocidade, B é a força de campo e L é o comprimento do fio da bobina.

$$U = vBL$$

Neste modo, conhecendo as características geométricas da bobina (L), o campo (B) é determinado através do produto da tensão induzida (U) e da velocidade (v) como se pode notar na equação 2.1,

$$BL = U/v \quad (2.1)$$

O segundo modo, conhecido como “pesagem” ou “força”, utiliza o mesmo campo e bobina do primeiro modo. Entretanto, dessa vez uma massa de teste é colocada em uma plataforma localizada no mesmo lado da balança que a bobina está, exercendo uma força descendente – força peso – que é igual a sua massa (m) vezes o campo gravitacional local (g) (Equação 3).

$$P = mg \quad (3.0)$$

Em seguida é aplicada à bobina uma corrente elétrica (I) com a finalidade de transformá-la em um eletroímã para que haja interação entre o campo da bobina e o campo eletromagnético dos ímãs permanentes. A medida que a corrente vai passando pela bobina, uma força eletromagnética ascendente (F_{el}) é produzida de forma proporcional a corrente (I) que é aplicada. Dessa forma, ao ajustar a corrente (I) a força ascendente (F_{el}) também é ajustada, até que em um dado momento, a força eletromagnética ascendente compensa a força descendente do peso, então o sistema atinge o equilíbrio e a corrente é registrada (Equação 4).

$$F_{el} = mg \quad (4.0)$$

A força (F_{el}) na bobina pode ser calculada através da equação 4.1 onde I é a corrente, B é a força do campo magnético e L é o comprimento do fio na bobina.

$$F_{el} = IBL \quad (4.1)$$

Rearranjando e combinando as equações 2.0 e 3.0 temos que,

$$U/v = BL \quad (2.0)$$

$$mg/I = BL \quad (3.0)$$

O fator BL é comum a ambas operações. Dessa forma sendo constante e é cancelado. Portanto,

$$IU = mgv$$

(5.0)

Neste momento, a equação 5.0 mostra que a potência elétrica (IU) é igual a potência mecânica (mgv), ambas expressas em watts. E, finalmente resolvendo para se obter a massa temos a equação 5.1.

$$m = IU/gv \quad (5.1)$$

Para que seja determinada a massa igual a 1 kg, as variáveis corrente elétrica (I), tensão (U), velocidade (v) e a gravidade (g) no local, são medidas separadamente através de instrumentos laboratoriais de medições exatas e extremamente precisas, como por exemplo gravímetro, além técnicas de medições como interferometria a laser e efeitos elétricos quânticos (NIST, 2019).

A constante de Planck aparece na forma como a energia elétrica é medida, pois esta é o produto da tensão (U) e da corrente (I) mostradas na equação 5.0, as quais consequentemente são mensuráveis através de duas constantes físicas: a constante de Von Klitzing $R_K = h/e^2$ que por meio do Efeito Hall Quântico, descreve como a resistência é quantizada, e a constante de Josephson $K_J = 2e/h$, que relaciona voltagem à frequência em um circuito supercondutor (NIST, 2019).

A tensão (U) gerada no sistema é calculada através de junções Josephson como se mostra na equação 6.0 abaixo,

$$U = n \frac{h}{2e} f \quad (6.0)$$

Onde n é um número inteiro igual a somatória dos números de junções Josephson que foram usadas, h é a constante de Planck, e é a carga elementar e f é a frequência de micro-ondas.

A corrente (I) por sua vez, é medida usando o efeito Hall quântico combinado ao efeito Josephson. Dessa forma, a corrente é obtida através da equação 7.0, onde U' é a uma nova tensão e R é a resistência,

$$I = \frac{U'}{R} \quad (7.0)$$

Os valores de resistência na balança de Kibble são dados pela equação 7.1. Onde r' é um número real que expressa a taxa de resistência do sistema.

$$R = r' \frac{h}{e^2} \quad (7.1)$$

Expressando os valores das equações 6.0 e 7.1, na equação 7.0 obtêm-se o resultado da medição da corrente (I),

$$I = \frac{U'}{R} = \frac{n_2 \frac{h}{2e} f_2}{r' \frac{h}{e^2}} = \frac{n_2}{2r'} ef_2 \quad (7.0)$$

Dessa forma, a energia elétrica é calculada como demonstra a equação 8.0 a seguir.

Ressalta-se que os valores n e f da tensão U foram expressos com a indicação numérica 1.

$$P_{el} = UI = \frac{h}{2e} f_1 \frac{n_2}{2r'} ef_2 = rhf_1 f_2 \quad (8.0)$$

Na equação 8.0 acima, a carga elementar é cancelada e todos os valores numéricos são combinados em apenas um, r . Logo, a energia elétrica é fornecida pelo produto das frequências

$f_1 f_2$, um número conhecido r e a constante de Planck h (Schlamminger; Haddad, 2019). Portanto, associando as equações 8.0 e 5.1, a massa e a constante de Planck aparecem na mesma equação, e a conexão entre elas é obtida, como mostra a equação 9.0 a seguir.

$$m = \frac{rf_1 f_2}{gv} h \quad (9.0)$$

Vale ressaltar que durante o processo de medição realizado pela balança de Kibble, existem processos dissipativos de energia (como por exemplo o atrito) que não entram na equação de medição. Mas apesar disso, a balança consegue realizar o kg com precisão relativa de 10^{-8} .

8 CONCLUSÃO

A humanidade evidencia em seu dia a dia que necessidade de medir as coisas já está enraizada em sua cultura, como por exemplo a pesagem de alimentos nos mercados, a aferição da pressão arterial dos pacientes nos hospitais, a medição da temperatura do dia, quando perguntam a hora, etc. Isso comprova que na contemporaneidade, somos totalmente dependentes de sistemas de medidas, principalmente do SI, que é utilizado em diversos países incluindo o nosso.

Ressalta-se ainda, que esse “fator cultural”, introduz no ser humano muito cedo, conceitos e/ou definições empíricas acerca das grandezas de medidas e suas respectivas unidades, muitas vezes até errôneas. A exemplo disso temos as medidas massa e peso que são diferentes, mas muitos pensam ser a mesma medida.

É devido a isto, que os professores no processo de formação precisam ser capacitados de forma que compreendam a importância do SI na construção do processo de análise de grandezas e unidades de medidas dos alunos, pois estes levarão para a sala de aula o conhecimento do contato informal que tiveram antes, e cabe ao professor orienta-los nesse processo.

Destaca-se também que as mudanças ocorridas no SI no ano de 2019, estabeleceram um sistema mais exato e preciso, pois com unidades baseadas em invariáveis da natureza os sistemas de medições tornam-se mais democráticos, visto que não serão mais utilizados artefatos físicos apresentando variações por conta do desgaste de suas manipulações, como por exemplo o IPK. Entretanto, o SI se tornou mais “abstrato” e agora exige para sua compreensão um nível intelectual maior, de forma que precisa-se possuir um conhecimento denso das constantes fundamentais da natureza.

Dessa forma, evidencia-se que a área da metrologia é de suma importância no mundo inteiro, e que a vida moderna só é possível graças as medições de alta precisão que o estabelecimento do SI como sistema único e universal trouxe. E toda vez que a humanidade proporcionou mudanças no Sistema Internacional de Unidades, testificou-se o aumento da exatidão e precisão das medições em geral juntamente com o desenvolvimento da ciência e tecnologia.

REFERÊNCIAS

BANNA, W. R. **Metrologia orientada a controles automotivos**. Brasília: Ed, NT, 2017. 144p.

BENDICK, J. **História dos Pesos e das medidas**. S.I. São Paulo: Ed. Melhoramentos, 1965. 150p.

BOYER, C. B. **História da matemática**. Tradução: Elza F. Gomide. São Paulo: Ed. Edgard, 1974. 496p.

BRANDI, H. S. Um Passeio no Tempo com as Medições: do Cúbito ao Metro. In: COSTA, F; et al. **Metrologia: Fundamentos**. 1ª ed. 2017.

CENTURIÓN, M. **Conteúdo e metodologia da matemática: números e operações**. São Paulo: Scipione, 1995. 328p.

DIAS, J. L. de M. **Medida, normalização e qualidade: aspectos da história da metrologia no Brasil**. Rio de Janeiro: Instituto Nacional de Metrologia e Qualidade Industrial (INMETRO), 1998. 292 p.

EVES, H. W. **Introdução à história da matemática**. 2.ed. Campinas, São Paulo: Unicamp, 1997. 843p.

GETEF. Grupo de Estudos em Tecnologia de Ensino de Física. Peso e Medidas. **Histórico**. 2015. Disponível em <<http://www.fisica.net/unidades/pesos-e-medidas-historico.pdf>>. Acesso em 06 jul. 2019.

GODOI, A. M. S. GUIRADO, J. C. **Grandezas e medidas do cotidiano no contexto escolar**. Paraná. 2009. Disponível em: <<http://www.grandezas-e-medidas-do-cotidiano.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

IFRAH, G. **História Universal dos Algarismos: Tomo 1**. Rio de Janeiro: Ed. Nova Fronteira, 1997. 247p.

INMETRO. 1ª Edição Brasileira da 8ª Edição do BIMP. 2012. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br>>. Acesso em: 10 de jun. 2019.

INMETRO. **Caderno de Metrologia: Especial SI/2019**. Disponível em: <<https://www.inmetro.gov.br/cadernos-de-metrologia.pdf>>. Acesso em: 02 nov. 2019.

JECKELMANN, B. **The New International System of Units based on Fundamental Constants**. 2012. Disponível em: <https://www.Beat_Jeckelman/publication/The-new-international-System-of-Units-based-on-Fundamental-Constants.pdf>. Acesso em: 16 out. 2019.

LANNER DE MOURA, A. R. **A medida e a criança pré-escolar**. 1995. 210 f. Tese (Doutorado em Educação). São Paulo. Universidade Estadual de Campinas, 1995.

MOSCATI, G. **O sistema internacional de unidades: passado, presente e futuro**. 2009. Disponível em: <<http://licenciaturaciencias.usp.br/wpcontent/uploads/2010/11/view.pdf>>. Acesso em: 26 jun. 2019

NIST. **Redefinição do SI**. Disponível em: <<https://www.nist.gov/si-redefinição>>. Acesso em: 02 nov. 2019.

POZEBON, S. LOPES, A. R. L. V. Grandezas e medidas: surgimento histórico e contextualização curricular. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE ENSINO DA MATEMÁTICA, 6, 2013, **Anais...** Rio Grande do Sul, 2013.

PRÄSS, A. R. **Pesos e Medidas – Histórico**. 2008. Disponível em: <<http://www.fisica.net/unidades/pesos-e-medidas-historico.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2019.

ROZENBERG, I. M. **O Sistema Internacional de Unidades - SI**. 3. ed. São Paulo: Instituto Mauá de Tecnologia. 2006. 114p.

SILVA, J. R. N. **Etnomatemática: abordagem dos diversos tipos de unidades de medidas**. 2016. Dissertação de Mestrado. Maceió. Instituto de Matemática. Universidade federal de Alagoas, 2016.

SCHLAMMINGER, S. HADDAD, D. **The Kibble balance and the kilogram**. Disponível em: <www.sciencedirect.com/thekibblebalanceandthekilogram>. Acesso em: 20 nov. 2019.

TEIXEIRA, A. A. **Evolução histórica do sistema internacional de unidades e as possíveis futuras reformulações das definições das sete unidades de base**. 2017. 49 f. Monografia. Minas Gerais. Instituto de Ciências Exatas, Universidade Federal de Minas Gerais, 2017

VOMERO, M. F. **Medidas Extremas**. edição 186, 2003.