

MEDIDAS DE GRANDEZAS FÍSICAS

12

Vanderlei Salvador Bagnato
Sérgio Ricardo Muniz

12.1 Introdução

12.2 Medidas e o método científico

11.3 Medida das grandezas

12.3.1 Incertezas e erros de medida

12.3.2 Algarismos significativos e regras de arredondamento

12.3.3 Notação científica

12.3.4 Ordens de grandeza

12.4 Unidades e padrões de medida

12.4.1 Um breve histórico do Sistema Internacional de medidas (SI)

12.4.2 O metro (m): medindo distâncias

12.4.3 O quilograma (kg): medindo massas

12.4.4 O segundo (s): medindo o tempo

Referências

12.1 Introdução

A matemática apresenta inúmeras ferramentas, que permitem processar dados através de um grande número de operações e técnicas de análise. Matrizes, vetores, derivadas, integrais, gradiente, divergente e rotacional são apenas algumas das ferramentas que podem ser usadas num conjunto de dados, uma vez que estes já estejam disponíveis (isto é, após o processo de medida de uma grandeza ou de um observável de interesse).

Para que esses dados sejam representativos do fenômeno ou da propriedade em estudo, é preciso que eles sejam obtidos (medidos) de forma confiável e metódica, para que suas incertezas possam ser devidamente avaliadas. Explicar como esses dados são obtidos, analisados e apresentados num estudo científico é um dos objetivos deste e dos próximos textos.

Nesta segunda parte do curso de **Fundamentos da Matemática II**, você irá aprender ferramentas matemáticas que têm grande utilidade prática nas mais diversas áreas da ciência. Isso fará a conexão deste curso com as ciências experimentais, completando o conjunto de ferramentas vistas até agora. Por exemplo, a partir de medidas cuidadosas de uma grandeza (física, química ou biológica), podemos propor uma função (modelo matemático) que descreva essa grandeza seja através de campos escalares ou vetoriais. A partir dessa função, é possível descrever taxas de variação, determinar áreas, volumes e fluxos ou, ainda, expressar certas propriedades gerais dos campos (ou funções) medidos através de operadores como o divergente ou rotacional e gradiente. Todas essas ferramentas são importantes e têm inúmeras aplicações práticas em todas as áreas da ciência e tecnologia.

Iniciaremos esta nossa discussão, entendendo como os dados experimentais são obtidos e processados a partir do método científico.

12.2 Medidas e o método científico

Segundo a metodologia científica, é preciso observar e experimentar com a natureza antes de formular teorias e leis que, supostamente, poderão ser usadas na previsão de fatos relevantes. A exigência de experimentação é basicamente o que distingue a ciência de outras formas de entender e explicar a natureza. Isso necessariamente passa pelo processo de medida (seja qual for a grandeza ou observável) e pela produção e análise dos dados.

O Método Científico é, em princípio, constituído de duas partes essenciais

Primeiro devemos observar através de experimentação. Esse é o ponto de partida para a formulação de qualquer lei natural. A coleta de dados experimentais é a essência da ciência, mas não é tudo. Os dados precisam de uma boa análise para se tornarem úteis. A citação feita pelo professor H. M. Nussenzweig, em seu livro sobre mecânica, parafrazeando Poincaré, é bastante adequada para esta situação: “embora a ciência se construa de dados experimentais, da mesma forma que uma casa se constrói com tijolos, uma coleção de tijolos não é uma casa, da mesma forma que uma coleção de dados ainda não é ciência”.

O **segundo passo** envolve a indução e dedução a partir dos resultados experimentais. Com os dados e uma profunda e cuidadosa análise, chega-se às conclusões que deverão ser válidas de uma forma mais geral. Neste ponto, é necessário frequentemente realizar abstrações, retirando da nossa análise aquilo que julgamos ser menos relevante para o problema ou efeito em estudo. Do contrário, torna-se muito difícil a formulação de uma lei natural, devido ao grande número de variáveis que muitas vezes não são relevantes para o problema em estudo. Se Newton tivesse levado em conta as montanhas e vales da superfície da Terra, talvez ele nunca tivesse concluído sua formulação da lei da gravidade. As montanhas e vales são pequenas perturbações na esfericidade da Terra, e não contribuem muito para o efeito principal. Esse processo de escolher o que pode ou não ser ignorado já envolve a formulação de um modelo, e tipicamente é guiado por conceitos e modelos já estabelecidos (isto é, que já fazem parte do conhecimento científico).

Mesmo que tenhamos uma lei formulada e devidamente confirmada experimentalmente, ela ainda não é uma verdade universal absoluta. Normalmente, toda lei física tem um domínio de validade, pois em geral foram construídas a partir de observações feitas num certo domínio de experimentação. Além desse domínio, fatores inicialmente considerados desprezíveis (no processo de abstração) podem não ser mais irrelevantes. É então que se costuma observar uma ruptura da “lei”, e algo mais geral se faz necessário. É por isso também que, normalmente, uma nova lei física generaliza e engloba a lei antiga. É dessa forma que a ciência é construída e progride com a contribuição de cada nova geração.

Note, portanto, a importância das medidas físicas neste contexto. São elas que promovem e validam a evolução do conhecimento e das ciências.

12.3 Medida das grandezas

A medida de uma grandeza física sempre tem um valor numérico e uma unidade. Isto faz com que essas duas partes tenham de estar sempre bem definidas para que a grandeza esteja completamente caracterizada. As medidas podem ser diretas ou indiretas.

Medidas diretas são aquelas que não dependem de outras grandezas para serem realizadas, ou seja, é possível realizar sua medida diretamente com um instrumento. Tempo e temperatura são duas grandezas físicas que são normalmente determinadas de forma direta. Já as medidas indiretas precisam de uma relação matemática para serem determinadas. Essa relação matemática normalmente sintetiza uma dada lei física ou um conjunto de conhecimentos de uma dada área do conhecimento.

A maioria das grandezas que caracterizam o movimento de um corpo, por exemplo, é feita de forma indireta. Assim, para determinar a velocidade de um objeto, temos de determinar a distância percorrida num certo intervalo de tempo, e a partir dessas medidas diretas calcular a velocidade. Mesmo a leitura do velocímetro do carro é indireta, pois há um mecanismo de calibração de distância, que utiliza o perímetro do pneu para determinar a distância percorrida, e um comparador que determina o tempo de cada volta, permitindo assim a determinação da velocidade. Aceleração é outro exemplo de medida indireta, seja ela feita através das medidas diretas da força e massa ou da variação de velocidade.

Grandezas fundamentais como distância, tempo e massa são tipicamente feitas de forma direta através da comparação com padrões. O padrão é basicamente o que estabelece a unidade de uma dada grandeza. Comparando-se diretamente aquilo que queremos medir com o padrão, tiramos um valor numérico, que expressa quantas vezes a grandeza de interesse é maior ou menor que aquele padrão e, assim, determinamos tanto a parte numérica quanto a unidade daquela medida.

12.3.1 Incertezas e erros de medida

As grandezas ou propriedades físicas macroscópicas, em geral, têm um valor exato, mas o resultado final do processo de medida, que sempre tem associado a si alguma incerteza, nunca expressa o valor exato dessas grandezas. Os mais diversos fatores impedem-nos de obter, de forma simples, o valor verdadeiro de uma grandeza. Toda medida está sujeita aos chamados “erros de medida”. Esses erros podem ser de dois tipos: erros estatísticos e erros sistemáticos.

Os erros estatísticos ou aleatórios podem ser causados pelo operador do instrumento de medida, por alterações momentâneas no ambiente da medida, por flutuações no circuito do instrumento etc. Sua característica principal é não ter este tipo de erro uma tendência ou direção preferencial para ocorrer e, por isso, caracterizar-se por uma aleatoriedade no valor medido, tipicamente em torno de um valor médio.

O erro sistemático, por outro lado, advém de defeitos de calibração ou vícios no processo de medida. Ele ocorre sempre na mesma direção e, portanto, apresenta uma tendência que provoca um desvio do valor medido em relação ao valor verdadeiro. Enquanto os erros estatísticos podem ser minimizados por medidas repetitivas e realização de médias e análises estatísticas, os erros sistemáticos não permitem isso. Eles são os erros mais complicados de serem determinados e eliminados no processo de medida de qualquer grandeza. É por isso que os erros sistemáticos são hoje a grande limitação nas medidas de alta precisão, que são aquelas que permitem avançar determinados aspectos científicos na fronteira do conhecimento.

As medidas com instrumentos, mesmo que realizadas de forma correta, também levam aos chamados erros de medida. Eles normalmente vêm do fato de que os instrumentos têm uma precisão limitada, que não permite obter o valor verdadeiro (exato) de uma determinada grandeza, além da precisão característica daquele instrumento. Um bom exemplo disso é uma régua. Ao utilizarmos a régua, fazemos uma medida estritamente comparativa. A maioria das réguas mais simples tem como a menor divisão o milímetro. Assim, se formos utilizar a régua para medida de uma distância cujo valor seja exatamente de 7,52 cm, teremos provavelmente certeza do valor 7,5 cm, pois a comparação direta permite verificar muito bem que o objeto em questão tem dimensão entre 7,5 e 7,6 cm. Mas, para dizermos o terceiro dígito dessa grandeza (o segundo depois da vírgula), teremos de “adivinhar” (ou estimar) da melhor forma possível, já que a escala da régua não permite fazer uma comparação direta mais precisa. Ainda que usemos bons critérios nesta estimativa, ainda haverá um pouco de adivinhação, o que traz uma incerteza à medida. Tais incertezas resultam nos erros da medida.

No uso de instrumentos, normalmente admitimos como erro instrumental a metade da menor divisão (escala) do instrumento utilizado. Dessa forma, na medida do comprimento acima, a régua poderia, por exemplo, resultar no valor $7,53 \text{ cm} \pm 0,05 \text{ cm}$. Este último valor, metade do milímetro, é o melhor que poderemos fazer e representa, portanto, o erro dessa medida.

Geralmente, o erro da medida está na mesma casa decimal do primeiro algarismo duvidoso. Obviamente, este tipo de erro de medida depende do tipo de instrumento utilizado e, em

princípio, pode sempre ser melhorado com o uso de instrumentos melhores. Um paquímetro ou um micrômetro, por exemplo, tem precisão de medida muito maior que a régua. A medida de grandezas físicas com instrumentos gera a necessidade de introduzirmos o conceito de algarismos significativos e também certas regras de aproximação e arredondamento.

12.3.2 Algarismos significativos e regras de arredondamento

Numa medida, os algarismos significativos são todos aqueles sobre os quais nós temos certeza (confiança) mais o primeiro dígito duvidoso. Eles são os que de fato fazem sentido na medida. Por exemplo, na medida feita com a régua, um observador com olho melhor poderia dizer que a medida realizada pela régua seria de 7,534 cm.

Mas será mesmo que essa medida, aparentemente mais “precisa”, faz algum sentido?

Nesse caso, como o dígito “3” é o primeiro dígito duvidoso, o dígito “4” já não faz mais nenhum sentido e, na verdade, não é significativo. Dessa forma, os algarismos significativos nesse caso são os números 7, 5 e 3. É no primeiro algarismo duvidoso que temos a nossa imprecisão ou incerteza.



Princípio importante: utilizar apenas os algarismos significativos. Se, porém, o algarismo for significativo, mesmo que seu valor seja “zero”, ele deve sempre ser expresso, pois tem significado. Por exemplo, se alguém realizar uma medida de tempo com um instrumento preciso e obtiver exatamente 1,000 segundo, os zeros finais não devem ser omitidos, pois na verdade expressam a precisão daquela medida.

As medidas de grandezas físicas, normalmente, podem ser arredondadas. O arredondamento é um procedimento para eliminar algarismos que julgamos desnecessários por alguma razão, isto é, que não são significativos. Também podemos arredondar um valor quando estamos interessados apenas numa aproximação ou estimativa daquele valor.

Considere, por exemplo, uma medida de massa que resultou no valor 25,24 g. Se quisermos expressar essa grandeza apenas até a primeira casa decimal, teremos de eliminar o último algarismo. A forma mais adequada de fazer isso é através da regra de arredondamento.

Essa regra é muito simples: se o algarismo a ser eliminado é maior ou igual a “5”, devemos acrescentar uma unidade ao algarismo decimal anterior. Se o algarismo a ser eliminado é menor que “5”, mantemos o algarismo anterior. Assim, a medida de 25,24 g seria arredondada para 25,2 g. Por outro lado, se tivéssemos como medida 25,26 g, o arredondamento levaria a 25,3 g.

12.3.3 Notação científica

Nas áreas científicas e, em particular, na física, é muito frequente encontrarmos grandezas expressas tanto por números muito grandes quanto por números muito pequenos. Nesses casos, é muito conveniente expressar esses números de uma forma compacta e que dê uma ideia clara de sua magnitude. É justamente isso que a notação científica nos permite fazer.

A ideia básica desta notação é bem simples: utilizar potências de 10, em vez de escrever todos os números decimais do número original. Nessa notação, o que se faz é expressar o número de interesse em duas partes: a mantissa e a potência de 10, ou expoente. O valor absoluto (módulo) da mantissa deve ser maior do que 1 e menor do que 10, e o expoente fornece a potência de 10 correspondente.

Vejamos alguns exemplos: o número de Avogadro, por ser um valor bastante grande, é normalmente expresso em notação científica como $N_A = 6,02 \times 10^{23}$. Outro exemplo ilustrativo é o da carga do elétron, que é um valor bem pequeno, dado por $q_e = 1,60217646 \times 10^{-19}$ coulombs.

Observe que, a rigor, o número de algarismo significativo deve ser mantido na mantissa. Aliás, essa é uma das grandes vantagens desta notação, que dá uma ideia imediata e clara sobre quais são os algarismos significativos de uma dada medida, assim como também a ordem de grandeza.

A seguir, discutiremos melhor o conceito de ordem de grandeza, que também é bastante útil e importante.

12.3.4 Ordens de grandeza

A ordem de grandeza de um valor nos dá uma ideia de quão grande ou pequeno é aquele valor. Isso é muito útil quando é preciso fazer estimativas de certo valor, que pode não ser conhecido com grande precisão. Isso facilita bastante quando se deseja ter apenas uma ideia da magnitude de determinada grandeza, sem ter de se preocupar com todos os algarismos significativos. Por exemplo, pode ser útil saber se o débito da sua conta no banco é da ordem de centenas, milhares ou milhões de reais! Neste caso, alguns reais a mais ou a menos podem não fazer muita diferença.

No caso de termos um número expresso em notação científica, fica muito fácil a determinação da ordem de grandeza desse número. Basta seguir as regras abaixo:

- a ordem de grandeza do número será igual à potência de 10, desde que a mantissa (valor numérico) seja menor do que 3,16;
- se a mantissa for maior que o valor 3,16, a ordem de grandeza do número será igual a uma potência de 10 com o expoente acrescido de uma unidade.

Observe que, nesse caso, o critério não é o mesmo usado nas regras de arredondamento. No caso da ordem de grandeza, a comparação relevante é a do valor absoluto da mantissa com o número $\sqrt{10} \cong 3,16$, e não com o número 5.

○○○○

Medidas das grandezas físicas

• EXEMPLO 1

Como expressar a ordem de grandeza a partir da notação científica de uma medida física

Notação Científica	→	Ordem de grandeza
3×10^7 Kg		10^7 Kg
$3,6 \times 10^7$ Kg		10^8 Kg

• EXEMPLO 2

Na determinação da ordem de grandeza da massa m , se $m = 2,5 \times 10^5$ kg, isso resulta numa ordem de grandeza de 10^5 kg mas, se o valor da massa fosse $m = 3,4 \times 10^5$ kg, a ordem de grandeza já seria de 10^6 kg.

○○○○○

12.4 Unidades e padrões de medida

Como já mencionamos, todas as grandezas físicas devem ser expressas em termos de seu valor numérico e também sua unidade. As unidades constituem uma parte importante da medida dos fenômenos naturais e nunca podem ser ignoradas. Já esclarecemos também que as unidades definem, na verdade, um padrão de comparação entre uma certa grandeza e um valor aceito por convenção, adotado num dado contexto prático ou histórico. Devemos, portanto, pensar numa

unidade como a quantificação de um modelo de comparação de uma determinada grandeza, e não numa propriedade fundamental da natureza. Assim, ao dizermos que uma distância é de 2,5 metros, estamos simplesmente afirmando que aquela distância é 2,5 vezes maior do que a distância adotada (por convenção) como se fosse igual ao metro padrão.

Da mesma forma que existem inúmeras grandezas que podem ser medidas na natureza, existe um número ainda maior de unidades, pois é comum encontrar uma mesma grandeza com diversas unidades diferentes. Felizmente, existe um número relativamente pequeno de unidades básicas, a partir das quais todas as demais podem ser expressas.

Nesta parte do texto, vamos concentrar-nos em três dessas unidades mais fundamentais, que são: o metro, o quilograma e o segundo. Como veremos a seguir, elas constituem três das sete unidades (grandezas) que formam a base do atual **Sistema Internacional** de medidas (SI), que é o sistema de unidades padrão, aceito e utilizado em praticamente todo o mundo moderno. As três unidades que nós veremos aqui também formam a base do chamado sistema MKS, justamente em alusão às iniciais (em inglês) das unidades base: **metro-quilograma-segundo**.

12.4.1 Um breve histórico do Sistema Internacional de medidas (SI)

É interessante notar que, até o final do século XIX, quando foi instituído oficialmente o metro padrão e lançada a base do atual Sistema Internacional de medidas (SI), através da Convenção do Metro de 1875, era comum os países usarem seus próprios sistemas de medida. Esses sistemas eram muitas vezes baseados em padrões antropomórficos (usando partes do corpo humano como unidades de medida, por exemplo: a polegada, o palmo, o pé etc.) ou baseados em objetos de uso cotidiano, como o galão, o copo, a colher etc. As subunidades eram frequentemente frações dessas unidades, mas cada país tinha a sua própria forma de definir isso. Um óbvio problema deste tipo de prática é o fato de que esses “padrões” podiam variar bastante, até mesmo de uma vila para outra, sem que houvesse muitas vezes uma autoridade que garantisse a aferição (exatidão) desses padrões. Como se pode imaginar, isso criava uma grande dificuldade para o comércio e troca de mercadorias. A padronização internacional foi motivada, em grande parte, como uma forma de resolver esse tipo de dificuldade prática e facilitar o comércio exterior.

Tabela 12.1: Unidades-base do SI.

Grandeza	Nome	Símbolo
Comprimento	metro	m
Massa	quilograma	kg
Tempo	segundo	s
Corrente elétrica	ampère	A
Temperatura	kelvin	K
Quantidade de substância	mole	mol
Intensidade luminosa	candela	cd

Na verdade, havia também um interesse científico e, antes mesmo do estabelecimento do SI, houve várias iniciativas internacionais, com a participação de cientistas ilustres como Gauss, Maxwell e Thomson, tentando promover a padronização de um sistema de unidades coerente para as ciências. Um dos primeiros passos nesse sentido foi a criação do Sistema Métrico Decimal, ainda durante a Revolução Francesa, e com o posterior depósito dos dois primeiros protótipos padrões de platina, representando o metro e o quilograma, nos Arquivos da República em Paris, no ano de 1799. O histórico completo dos eventos que levaram à formação do SI é bastante interessante e um resumo dos principais eventos publicado pelo INMETRO pode ser encontrado na referência.

A primeira versão do SI tinha apenas três unidades-base, constituindo basicamente o chamado sistema MKS, que por sua vez era uma evolução natural do sistema CGS (**centímetro-grama-segundo**) o primeiro sistema métrico decimal usado de forma coerente nas ciências físicas. A partir de 1946, o SI passou a incorporar o ampère e, posteriormente, também o kelvin e a candela, em 1954, e desde 1971, com a introdução do mol, passou a ter a forma atual, com sete unidades de base, como mostra a **Tabela 12.1**.

Tabela 12.2: Exemplos de unidades derivadas.

Grandeza	Nome	Símbolo
Área	metro quadrado	m ²
Volume	metro cúbico	m ³
Velocidade	metro por segundo	m/s
Aceleração	metro por segundo ao quadrado	m/s ²
Número de onda	recíproco do metro	m ⁻¹
Densidade de massa	quilograma por metro cúbico	kg/m ³
Luminância	candela por metro quadrado	cd/m ²

No Sistema Internacional, além das unidades de base, que podem ser medidas diretamente a partir de estritos critérios definidos pelo BIPM (órgão internacional responsável por definir, manter e promover o SI), todas as demais unidades são consideradas grandezas derivadas,

determinadas de forma indireta, a partir dos padrões primários, através de relações algébricas simples. A **Tabela 12.2** mostra alguns exemplos de grandezas derivadas, enquanto a **Tabela 12.3** traz exemplos de grandezas que, embora também derivadas, recebem nomes e símbolos especiais.

Tabela 12.3: Exemplos de unidades derivadas que recebem nomes e símbolos especiais.

Grandeza	Nome	Símbolo	Outras formas	
Força	newton	N	-	$\text{m} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
Pressão	pascal	Pa	N/m^2	$\text{m}^{-1} \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
Energia	joule	J	$\text{N} \cdot \text{m}$	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-2}$
Frequência	hertz	Hz	-	s^{-1}
Potência	watt	W	J/s	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3}$
Carga elétrica	coulomb	C	-	$\text{s} \cdot \text{A}$
Diferença de potencial elétrico	volt	V	W/A	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-1}$
Capacitância	farad	F	C/V	$\text{m}^{-2} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^4 \cdot \text{A}^2$
Resistência elétrica	ohm	Ω	V/A	$\text{m}^2 \cdot \text{kg} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{A}^{-2}$

O SI não é um conjunto estático de padrões, mas evolui para incluir avanços científicos que levem a padrões mais práticos e cada vez mais precisos. Atualmente, as sete unidades base definem 22 unidades derivadas com nomes e símbolos especiais, seguindo as relações mostradas na **Figura 12.1**.

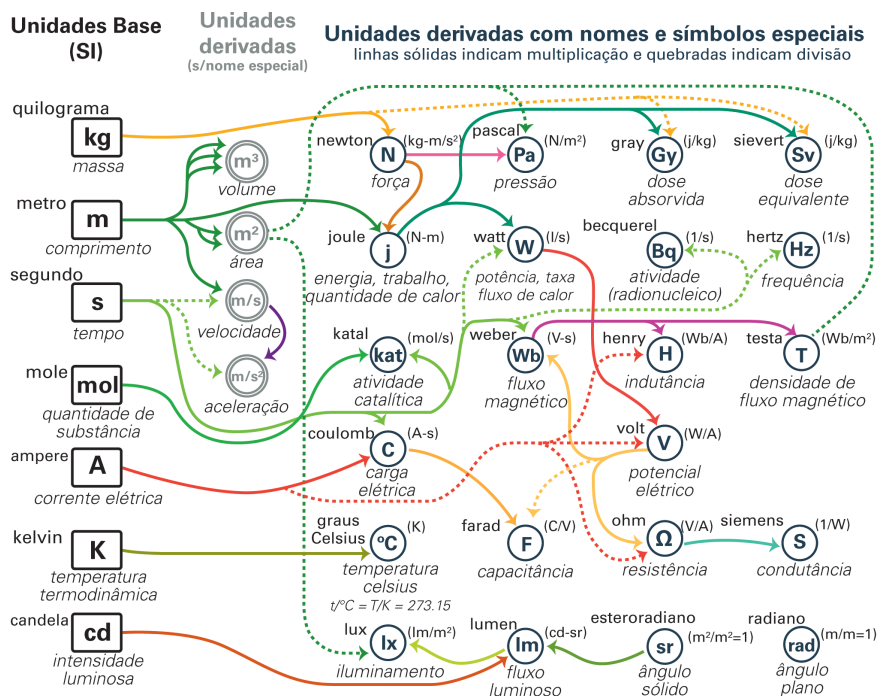


Figura 12.1: Diagrama ilustrando as relações entre unidades-base e unidades derivadas do Sistema Internacional (SI).

A rigor, qualquer grandeza mensurável deve ser expressa, preferencialmente, em termos das unidades definidas no SI ou de múltiplos e submúltiplos decimais, com símbolos definidos, conforme os exemplos da **Tabela 12.4**.

Tabela 12.4: Exemplos de prefixos usados no SI.

Prefixo	Multiplicador	Símbolo (exemplos)
pico	$\times 10^{-12} = 0,000000000001$	p (pm, ps)
nano	$\times 10^{-9} = 0,000000001$	n (nm, ns)
micro	$\times 10^{-6} = 0,000001$	μ (μm , μs)
mili	$\times 10^{-3} = 0,001$	m (mm, ms)
centi	$\times 10^{-2} = 0,01$	c (cm)
quilo	$\times 10^3 = 1000$	k (km, kg)
mega	$\times 10^6 = 1000000$	M (MHz)
giga	$\times 10^9 = 1000000000$	G (GHz)
tera	$\times 10^{12} = 1000000000000$	T (THz)

12.4.2 O metro (m): medindo distâncias

O metro foi originalmente definido como um décimo de milionésimo (10^{-7}) da distância entre o polo norte e o equador. Foram organizadas então expedições para realizar medidas precisas dessa distância, feitas usando o método de triangulação sobre um arco do meridiano de Paris (na época, aceito por muitos como meridiano primário). O contexto histórico que levou ao estabelecimento do metro padrão é bastante interessante, mas no que nos diz respeito aqui, basta entender que houve uma evolução da definição do metro, desde o primeiro padrão de platina até os dias atuais. É interessante notar que essas mudanças refletem não só a evolução da própria ciência, mas também a necessidade prática de definir um padrão que possa ser reproduzido e comparado, em qualquer lugar, de forma precisa e exata.

Assim, para facilitar a comparação e disseminação de um padrão único, foram construídos protótipos de platina-irídio (material resistente à oxidação e com baixa dilatação térmica) que foram distribuídos para os laboratórios de referência metrológica de vários países, sendo o original mantido até hoje no BIPM, na França, sob condições muito especiais para minimizar variações.



Figura 12.2: fotografia dos protótipos do metro padrão do NIST.

Devido à dificuldade prática de se comparar distâncias pequenas com uma barra mantida sob condições tão especiais, alguns cientistas, entre eles A. Michelson, propuseram uma definição do metro em termos do comprimento de onda da luz. Para isso, Michelson desenvolveu métodos bastante precisos de realizar essas medidas, que eram feitas usando a interferometria óptica. Devido à maior exatidão do método, o metro foi redefinido em 1960, em termos do comprimento de onda de uma linha espectral do átomo de criptônio 86 (^{86}Kr). Essa definição ocorreu na mesma época em que o laser começava a ser desenvolvido. Esse importante desenvolvimento científico e tecnológico daria início a um grande avanço da física atômica que, por sua vez, levaria à criação de padrões de tempo e frequência extremamente precisos. Como consequência desses desenvolvimentos, o metro foi mais uma vez redefinido em termos da velocidade da luz (no vácuo), definida em 1975 como exatamente 299792458 m/s. Dessa forma, o metro é hoje definido como:

“o comprimento do trajeto percorrido pela luz no vácuo durante um intervalo de tempo de $1/299.792.458$ de segundo”

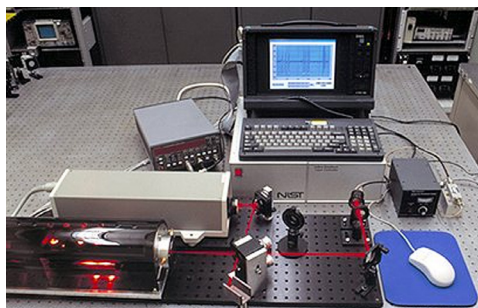


Figura 12.3: Exemplo de um sistema de medida, baseado num padrão secundário do metro, utilizando interferometria óptica de um laser de He-Ne estabilizado numa transição atômico-molecular (neste caso, do iodo).

A grande vantagem dessa nova definição é o fato de que o metro pode ser, em princípio, definido com uma precisão tão grande quanto as mais precisas medidas de tempo, porém, do ponto de vista prático, isso ainda não ocorre, e são usados padrões secundários, definidos por interferometria óptica de um conjunto de comprimentos de ondas adotado pelo BIPM. Na prática, todavia, um dos métodos mais simples de aferição é utilizar um laser estabilizado numa certa transição atômica de referência, como ilustrado na **Figura 12.3**.

12.4.3 O quilograma (kg): medindo massas

O quilograma foi inicialmente definido em termos da massa de um decímetro cúbico de água, que é o volume equivalente a um litro. Embora seja prática, essa definição de massa não é muito exata, pois a massa de um determinado volume de água vai depender da sua temperatura e pureza. Assim, foram também criados protótipos metálicos para definir a unidade de massa

padrão. Em 1889, foi sancionado o protótipo (artefato metálico) padrão do quilograma, também construído com uma liga de platina-irídio, desde então mantida sob condições especiais no BIPM, próximo a Paris.

Ao contrário do metro, o quilograma padrão nunca foi revisto e permanece até hoje definido em termos de um artefato físico. Dessa forma, atualmente, a definição formal do quilograma é: “a unidade de massa (e não de peso nem força), que é igual à massa do protótipo internacional do quilograma”, mantido no BIPM, sob as condições definidas em 1889.

Apesar da inconveniência prática dessa definição, discute-se ainda hoje qual seria a melhor opção de se redefinir o quilograma em termos de propriedades mais fundamentais, como os padrões atômicos, por exemplo.



Figura 12.4: O quilograma padrão é até hoje um artefato físico (pequeno cilindro metálico, no interior de redomas de vidro) que define o padrão de massa.

12.4.4 O segundo (s): medindo o tempo

A unidade de tempo – o segundo – foi originalmente definida, em termos astronômicos, como a fração de $1/86.400$ do dia solar médio. A definição exata do “dia solar” ficou para ser feita a *posteriori* pelos astrônomos, cujos estudos mostraram que irregularidades na rotação da Terra não permitiam a exatidão necessária na definição da unidade de tempo.

Em 1960, foi adotada uma definição da União Internacional de Astronomia, que era baseada no ano trópico. Por volta da mesma época, estudos experimentais mostravam que era possível definir um padrão atômico de intervalo de tempo, baseado na transição entre dois níveis de energia dos estados internos de um átomo ou molécula, que poderiam ser realizadas e reproduzidas com uma precisão muito maior do que as medidas astronômicas. Isso levou, em 1967, à redefinição do segundo na sua forma atual:

“O segundo é a duração de 9.192.631.770 períodos da radiação correspondente à transição entre os dois níveis hiperfinos do estado fundamental do átomo de césio 133.”

Portanto, hoje a unidade-padrão de tempo é definida em termos de um padrão atômico. Como praticamente toda a tecnologia moderna está baseada em medidas precisas de tempo e frequência,

a necessidade de precisão e exatidão nas medidas de intervalos de tempo é cada vez maior. Por isso, em 1997, o **Comitê Internacional de Pesos e Medidas** (CGPM) esclareceu que:

“Essa definição se refere a um átomo de césio em repouso,
a uma temperatura de 0 (zero) kelvin.”



Figura 12.5: Fotografia do relógio atômico do IFSC-USP, baseado em átomos de césio resfriados a laser, atualmente o mais preciso relógio da América Latina.

Embora sutil, esse esclarecimento é importante, pois os experimentos atuais permitem medir intervalos de tempo com uma precisão e acurácia tão grandes que o próprio estado de movimento (velocidade) dos átomos passa a ser um fator limitante da medida. De fato, a melhor realização do padrão primário atual utiliza um relógio atômico com átomo resfriado a temperaturas próximas do zero absoluto. Isso é possível graças ao desenvolvimento de técnicas experimentais onde o movimento atômico é controlado através da interação com lasers e campos eletromagnéticos. Sistemas como esses permitem atingir uma precisão relativa nas medidas de tempo da ordem de 10^{-16} , fazendo das medidas de tempo (e frequência) as medidas mais precisas que existem atualmente.

A título de curiosidade, para comparação, a definição atual do metro permite, na prática, atingir uma precisão da ordem de 10^{-12} , enquanto a incerteza na definição do quilograma é da ordem de 10^{-9} .

Referências

- INMETRO. **Sistema Internacional de Unidades**. 8. ed. Rio de Janeiro: INMETRO, 2007.
- NUSSENZVEIG, H. M. **Curso de Física Básica**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 2005.
- CCU/CIPM. **Tradução da publicação do BIMP**. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br>>. Acesso em: 09/2013.



Agora é a sua vez...

Continue explorando os recursos de aprendizagem disponíveis no Ambiente Virtual de Aprendizagem e realize a(s) atividade(s) proposta(s).