Capítulo 1

INTRODUÇÃO

Livro-Texto: *Curso de Física Básica: Mecânica*, H. Moysés Nussenzveig (4ª. Edição,2003)

Atenção Estas notas têm por finalidade auxiliá-lo no estudo dos assuntos tratados no livro-texto (Física Básica-Mecânica de H. Moysés Nussenzveig) e não devem ser usadas com o intuito de substituí-lo. A leitura do livro-texto é imprescindível!

■ Assunto: Introdução

Aqui você fica sabendo quais os assuntos que serão tratatados nas aulas sobre este capítulo.

Seção 1.1 Para que serve a física?

Seção 1.2 Relações entre a física e outras ciências

Seção 1.3 O método científico

Seção 1.4 Ordens de grandeza. Algarismos significativos

Seção 1.5 Medidas de comprimento

Seção 1.6 Sistemas de coordenadas

Seção 1.7 Medida do tempo

■ Objetivos Gerais

Aqui você tem informações sobre os objetivos gerais do capítulo

Este capítulo tem por objetivo dar uma visão preliminar da física como ciência natural, destacando sua importância no nosso dia-a-dia e sua relação com outras ciências, notadamente a química e a biologia. Mas para chegar ao estágio atual, tanto a física quanto as outras ciências naturais, valeram-se do desenvolvimento do método científico cujos princípios básicos serão também discutidos neste capítulo. Finalmente, como a física é intrinsecamente uma ciência da medida e precisamos saber medir aquilo que se observa, este capítulo discute também a metodologia das medidas, incluindo o processo de estimativas numéricas da ordem de grandeza de uma observação, unidades de medidas e sistemas de coordenadas.

■ Objetivos específicos

Ler apenas não basta: certifique-se sempre de que você está aprendendo. Resolva uma quantidade razoável de problemas do capítulo.

Ao término deste capítulo, verifique se você é capaz de:

- entender qualitativamente o que é a física, para que serve e quais suas relações com outras ciências naturais.
- compreender os princípios básicos do método científico.
- empregar os conceitos de ordem de grandeza e algarismos significativos.
- entender como se realiza uma medida direta ou indireta de comprimento e tempo.

■ Guia de estudo

Nesta seção, discutimos alguns assuntos apresentados no livro-texto, sempre que possível, numa abordagem complementar

Observação *Leia com muita atenção este capítulo no livro-texto. Se não entender na primeira leitura, repita quantas vezes forem necessárias. Entenda bem as idéias discutidas pelo autor e procure desenvolver as contas para só no final comparar com o resultado do livro. Agindo assim v. adquire mais confiança no que faz. Neste guia e nos livros indicados na bibliografia v. encontrará mais sobre este assunto.*

Seção 1.1 Para que serve a física?

> *"Dada, por um momento, uma inteligência que pudesse compreender todas as forças que atuam na natureza e as posições de todas as coisas que a compõem ... nada seria incerto, e o futuro, como o passado, estaria diante de seus olhos." (Pierre Simon de Laplace).*

No LT, este tema é discutido de forma que o leitor tenha uma noção preliminar do que é a física e para que serve, através das várias contribuições desta ciência tanto para a formação do conhecimento científico, quanto para o avanço da tecnologia. Faça uma leitura crítica deste assunto, procurando exemplos em notícias de jornais, revistas de divulgação, internet etc. Mas não esqueça de olhar em sua volta para ver o quanto sua vida é afetada pelo desenvolvimento tecnológico devido em grande parte aos avanços da física.

Seção 1.2 Relações entre a física e outras ciências

> *"Ciência significa, às vezes, um método especial de descobrir coisas. Às vezes significa o acervo de conhecimento oriundo das coisas descobertas. Também pode significar as coisas novas que v. pode fazer quando v. descobre algo." (Richard Feynman em The Meaning of It All)*

A física é considerada, em muitos aspectos, a ciência mais fundamental da natureza, tendo como objetivo explicar os fenômenos naturais, incluindo as propriedades dos corpos. Portanto, não deve causar surpresas o fato de vermos que o desenvolvimento da física tenha tornado possível tantos avanços em outras ciências notadamente a química e a biologia. De fato, a química lida com as aplicações das leis da física para formação de moléculas e coisas relacionadas. De certa forma, a química pode ser considerada como um ramo da física.

A biologia por sua vez se apóia fortemente na física e na química para explicar os processos que ocorrem nos seres vivos. Mas a contribuição da física para outras ciências não pára por aí. Do ponto de vista prático, ela também é importante porque cria técnicas que podem ser empregadas em quase todas as áreas do conhecimento.

Procure exemplos de aplicação de técnicas desenvolvidas pela física em outras áreas de pesquisa, como a medicina, astronomia, geologia, meteorologia, oceanografia, engenharias etc.

Uma boa discussão sobre o tema v. encontra no livro *Física: Mecânica* de Alaor Chaves (indicado na bibliografia).

Seção 1.3 O método científico

Método científico é o processo que se usa para construir uma representação mais exata possível do universo. Mas, demorou-se muito tempo até se descobrir a melhor maneira de investigar a natureza. Na fase atual, o método científico tem, na verificação experimental, seu braço forte com poder de decisão inapelável sobre a validade ou não das descobertas científicas.

Mas, isto nem sempre foi assim. Já houve época em que a "verdade científica" (entre aspas) era obra exclusiva do pensamento, sem que se tivesse a curiosidade de verificar se aquilo que foi dito era verdadeiro ou falso. Por exemplo, o filósofo grego Aristóteles afirmou certa vez que homens e mulheres tinham o número de dentes diferentes. Para justificar sua opinião, forneceu uma longa lista de argumentos acerca do por quê devia ser assim, sem contudo se preocupar em verificar *in loco* sua afirmativa. É claro que métodos deste tipo representam o oposto da atitude científica: argumentos não podem determinar se uma hipótese é ou não verdadeira, sendo para isso necessário as provas.

No LT, encontra-se uma discussão detalhada sobre os princípios básicos do método científico moderno, que é composto das seguintes etapas: (1) observação e experimentação; (2) abstração e indução; (3) leis e teorias físicas; e (4) domínio de validade.

Seção 1.4 Ordens de grandeza. Algarismos significativos

Notação científica

Para lidar com números muito grandes ou muito pequenos, relacionados à escala humana, utiliza-se a notação científica (NC), uma forma particular da notação exponencial, que consiste em escrever o número como o produto de um fator entre 1 e 10 (exclusive) por uma potência de dez. Se N for o número dado, então podemos escrevê-lo na forma

$$N = f \times 10^p$$

onde f é um número que satisfaz a condição $1 \leq f < 10.$ Para encontrar $f,$ basta dividir N por 10^p. Então

$$f = \frac{N}{10^p}$$

ou

$$N = \frac{N}{10^p} \times 10^p$$

O expoente p nesta equação é obtido, usando a condição para $f,$ ou seja,

$$1 \leq \frac{N}{10^p} < 10$$

Como podemos observar, a notação científica reduz-se praticamente à divisão de um número por uma potência de 10 cujas regras são muito simples (procure relembrar essas regras, exercitando bastante).

Exemplo Vamos usar a notação científica para escrever os número 21, 210 e 2.100, maiores do que a unidade. De acordo com a prescrição, podemos escrever

$$\begin{aligned} 21 &= 2,1 \times 10^1 \\ 210 &= 2,1 \times 10^2 \\ 2.100 &= 2,1 \times 10^3 \end{aligned}$$

Agora considere a sequência de números menores do que a unidade: $0,21$, 0.021 e $0,0021$. Usando a mesma técnica, encontramos

$$\begin{aligned} 0,21 &= 2,1 \times 10^{-1} \\ 0,021 &= 2,1 \times 10^{-2} \\ 0,0021 &= 2,1 \times 10^{-3} \end{aligned}$$

Regras da potenciação Para lidarmos com a notação científica, precisamos conhecer as regras básicas da potenciação. Para $a \neq 0,$ valem as regras gerais:

$$
\begin{aligned}
a^0 &= 1 \\
a^p \times a^q &= a^{p+q} \\
a^{-p} &= \frac{1}{a^p} \\
\frac{a^p}{a^q} &= a^{p-q} \\
(a^p)^q &= a^{pq}
\end{aligned}
$$

onde $a = 10$ no caso da notação científica.

Regras de operações Com base nas regras acima, podemos realizar as operações de soma, subtração, multiplicação, divisão e exponenciação números na forma exponencial. Considere as seguintes regras básicas dessas operações:

- **Soma e subtração** *As potências devem ter a mesma base e o mesmo expoente*. Como na NC todas as potências têm base 10, podemos somar ou subtrair os fatores que têmo mesmo expoente. Ou seja,

  $$f_1 \times 10^p \pm f_2 \times 10^p = (f_1 \pm f_2) \times 10^p$$

  Exemplo

  $$
  \begin{aligned}
  2,1 \times 10^2 + 3,2 \times 10^2 &= (2,1 + 3,2) \times 10^2 \\
  &= 5,3 \times 10^2 \\
  2,1 \times 10^2 - 3,2 \times 10^2 &= (2,1 - 3,2) \times 10^2 \\
  &= -0,9 \times 10^2 = -9 \times 10^1
  \end{aligned}
  $$

  Quando os expoentes são diferentes, como em $2,1 \times 10^3 + 3,2 \times 10^2$, ainda podemos somar ou subtrair esses termos, mas antes devemos transforná-los para potências com o mesmo expoente. Vamos escolher $3,2 \times 10^2$ para transformar numa potência de 10^3. Para isso, o que precisamos fazer é multiplicar e dividir este número por 10, obtendo-se

  $$
  \begin{aligned}
  3,2 \times 10^2 &= \frac{3,2}{10} \times 10^2 \times 10 \\
  &= 0,32 \times 10^3
  \end{aligned}
  $$

  onde usamos as regras da potenciação. Agora basta somar ou subtrair os fatores de mesma potência, ou seja:

  $$
  \begin{aligned}
  2,1 \times 10^3 + 3,2 \times 10^2 &= 2,1 \times 10^3 + 0,32 \times 10^3 \\
  &= 2,42 \times 10^3 \\
  2,1 \times 10^3 - 3,2 \times 10^2 &= 2,1 \times 10^3 - 0,32 \times 10^3 \\
  &= 1,78 \times 10^3
  \end{aligned}
  $$

- **Multiplicação, divisão e exponenciação** *As potências devem ter a mesma base, mas os expoentes podem ser diferentes*. Para a NC isto já acontece, bastando neste caso usar as regras da potenciação dadas acima.

  Exemplo

$$\begin{aligned}
(2,1 \times 10^3) \times (3,2 \times 10^2) &= (2,1 \times 3,2) \times (10^3 \times 10^2) \\
&= 6.72 \times 10^{3+2} \\
&= 6.72 \times 10^5 \\
\frac{2,1 \times 10^3}{3,2 \times 10^2} &= \left(\frac{2,1}{3,2}\right) \times \left(\frac{10^3}{10^2}\right) \\
&= 0,65625 \times 10^{3-2} \\
&= 0,65625 \times 10^1 \\
&= 6,5625 \\
(2,1 \times 10^3)^2 &= (2,1)^2 \times (10^3)^2 \\
&= 4,41 \times 10^6
\end{aligned}$$

Algarismos significativos

Quando v. leu este assunto no LT, deve ter percebido que ao realizarmos uma medida de uma grandeza física, através de um método experimental, nunca fazemos com precisão absoluta, apresentando sempre uma incerteza, que depede de uma série de fatores, incluindo o aparelho usado para fazer a medida, o tipo e o número de medidas realizadas, assim como o método utilizado por quem realiza tal medida. Assim, a menos que se diga qual a precisão da medida, o número encontrado para a quantidade numérica da grandeza, que foi objeto daquela medida, não tem muito significado.

A precisão de uma medida é frequentemente indicada com o símbolo $\pm$ depois do valor e antes de um segundo número que indica o erro máximo. Por exemplo, se uma medida de comprimento for representada por $12,54\text{m}\pm 0,02\text{m}$ isto significa que seu valor verdadeiro está entre $12,52\text{m}$ $(= 12,54 - 0,02)$ e $12,56\text{m}$ $(= 12,54 + 0,02)$. Observe que não tem sentido indicar esta medida como $12,540\text{m}\pm 0,02\text{m}$, usando três casas decimais, uma vez que a precisão vai até a segunda casa. O aparentemente "inocente" zero que aparece no final de $12,540$ implicaria no conhecimento do valor da medida com uma precisão dez vezes maior do que realmente ela é. Por isso, os quatro algarismos (1, 2, 5 e 4) com que escrevemos o valor $12,54\text{m}$ têm um significado especial na representação de uma medida.

Por outro lado, em algumas situações não conhecemos a precisão com que a medida foi obtida, sabendo-se apenas como seu valor é indicado, aparecendo, por exemplo, como $12,54\text{m}$. Neste caso, deve-se subentender um erro máximo para mais ou para menos de $0,005\text{m}$. Desta maneira, o valor verdadeiro estaria entre $12,535\text{m}$ $(=12,54 - 0,005)$ e $12,545\text{m}$ $(=12,54 + 0,005)$. Se esta medida tivesse sido indicada por $12,540\text{m}$, o erro subentendido seria ainda menor, ou seja, de $\pm 0,0005\text{m}$, implicando numa maior precisão na medida.

Dos exemplos acima, podemos concluir que o número de algarismos que indicam o valor de uma medida traz embutida uma informação importante acerca da precisão da medida. É por isto que recebem o nome especial de *algarismos significativos.*

Em geral, o número de algarismos significativos é igual ao número de algarismo usados para escrever o valor da medida. Por exemplo, o número de algarismo significativos que aparece em $12,56\text{m}$ coincide com o número de algarismo do número. Dizemos então que neste caso todos os algarismos do número são algarismos significativos.

Mas, nem sempre é assim. Considere agora uma medida indicada por $0,02\text{m}$. Neste caso, o número de algarismos é três, enquanto que o número de *algarismos significativos* é apenas um. Os zeros que aparecem antes do número 2 neste caso indicam apenas o valor relativo do 2 (centésimos) no número. Se escrevêssemos $0,020\text{m}$ teríamos agora dois algarismos significativos.

Para contornar esta dubiedade entre o número de algarismos, basta recorrer à notação científica nesses casos. Assim, o valor $0,02$m pode ser escrito nesta notação como 2×10^{-2}m, enquanto que $0,020$m escrevemos como $2,0 \times 10^{-2}$m. Então, o número de algarismos significativos está contido nos fatores que multiplicam a potência de 10 e agora coincide com o número de algarismos desse fator.

Finalmente, chamamos a atenção para os casos em que os valores são indicados como 20m, 200m, 2.000m etc. Os zeros à direita do número 2 seriam algarismos significativos ou são usados apenas para fixar o valor relativo do 2 (dezena, centena, milhar etc) ? Para evitar dúvidas como estas é melhor escrevê-los na notação científica, ou seja, 2×10^1m, 2×10^2m etc. Desta forma fica claro que temos apenas um algarismo significativo. Se quisermos indicar uma precisão maior, devemos escrevê-los como $2,0 \times 10^1$m, $2,0 \times 10^2$m e assim por diante.

Operações com números contendo erros

Já vimos que as medidas de grandezas físicas implicam em atribuir valores que estão num intervalo definido pela precisão usada para medi-las. Por exemplo, se numa medida da grandeza G (que pode ser comprimento, massa etc) feita com uma precisão p, encontrarmos o valor g, então o valor verdadeiro desta grandeza estará num intervalo de valores que é indicado por $g_v = g \pm p$. Isto significa que o valor verdadeiro, g_v, desta grandeza pode ser qualquer número que esteja no intervalo fechado $[g - p, g + p]$. Dizemos então que o valor medido da grandeza G contém erros.

Agora queremos saber como realizar operações algébricas (soma, subtração, etc) com esses números quem contêm erros. Por exemplo, qual é o resultado da soma $2,5$m $+ 1,782$m ou do produto $2,5$m $\times 1,782$m?

Para responder a estas perguntas corretamente, os matemáticos desenvolveram uma área de estudo conhecida como *teoria dos erros*, onde se fazem análises rigorosas das operações com números contento erros. Porém, o objetivo desta seção não é torná-lo um especialista no assunto, mas apenas indicar algumas regras práticas capazes de evitar incorreções graves quando realizamos essas operações.

Multiplicação e divisão Quando trabalhamos com multiplicação e divisão ou fazemos cálculos complicados que envolvem vários tipos de operação, existe uma regra prática muito simples: *o número de algarismos significativos do resultado deve ser reduzido (arredondado) ao número de algarismos significativos contidos no fator de menor precisão*. Assim, usando esta regra podemos dizer que $2,5$m $\times 1,782$m $= 4,5$m^2.

Soma e subração Quando se trata de soma ou subtração a regra é *manter o número de casas decimais do termo de menor precisão*. Logo, $2,5$m $+ 1,782$m $= 4,3$m. [Veja mais em Leitura Complementar abaixo].

Ordens de grandeza

A motivação para estudar este assunto é a necessidade de se fazer estimativas rápidas dos valores de grandezas físicas sem levar em conta os detalhes, muitas vezes, complicados de cálculos precisos. A ordem de grandeza de um número N é definida como a potência de dez mais próxima do número dado. Isto significa que quando dizemos que dois números diferem por três ordens de grandeza queremos dizer que um deles (o maior) é $10^3 = 1.000$ vezes maior do que o outro e assim por diante.

Exemplo 1 *Qual é a ordem de grandeza da altura de uma pessoa? Considerando que a altura de uma pessoa de estatura normal seja de $1,70$m, e como este valor está mais próximo de 1m do que de 10m, concluímos que a ordem de grandeza da altura de uma pessoa é 10^0 (ver tabela abaixo com algumas potências de 10).*

Potências de 10		
10^0	$=$	1
10^1	$=$	10
10^2	$=$	100
10^3	$=$	1.000
10^4	$=$	10.000
$\vdots$		$\vdots$

Quando o número N é representado na notação científica, isto é, $N = f \times 10^p$, esta potência de 10 nem sempre representa a ordem de grandeza do número, mas depende do valor de f. Como uma regra geral , a ordem de grandeza de um número será:

$$10^p, \qquad \text{se } f < 5$$

$$10^{p+1}, \qquad \text{se } f \geq 5$$

Para indicar apenas a ordem de grandeza de um número, usamos o símbolo "~" que significa "da odem de". Assim, podemos reescrever

$$N \sim 10^p, \qquad \text{se } f < 5$$

$$N \sim 10^{p+1}, \qquad \text{se } f \geq 5$$

Exemplo 2 *Quando se estuda química no ensino médio aprende-se que o número de moléculas contidas num mol de qualquer substância é sempre o mesmo. Este número é conhecido como número de Avogadro e tem o valor* $N_A = 6,0221415 \times 10^{23}$ */mol. Qual é a ordem de grandeza do número de Avogadro? Usando essa regra para o caso* $f \geq 5$, *encontra-se a resposta:* $N_A \sim 10^{24}$

Observe que neste exemplo não tivemos que calcular a grandeza física, o que nos limitou apenas a estimar a ordem de grandeza do número dado. Agora vamos considerar outro exemplo em que precisamos calcular a grandeza e posteriormente estimar a sua ordem de grandeza.

Exemplo 3 *O Problema 1 (pág. 21) do LT pede para estimar o número de fios de cabelo na cabeça.*

Solução *Temos que fazer algumas suposições antes de realizar a estimativa. (i) a forma geométrica da cabeça é uma esfera com diâmetro* $D \sim 2 \times 10^{-1}$ *m; (ii) a distância entre as raízes de dois fios de cabelo é* $0,001m$ *e, portanto, cada fio de cabelo ocupa um quadrado de área* $0.001m \times 0,001m$*; (iii) a área da cabeça coberta com cabelos é* $A_c = \frac{A}{2}$. *Lembrando que a área de uma esfera de raio* $R = \frac{D}{2}$ *é dada por* $A = 4\pi R^2 = \pi D^2$ *e de um quadrado de lado* l *é* $a = l^2$, *podemos estimar a área* A *da cabeça e a área ocupada por cada fio,* a. *O número de fios de cabelo na cabeça é dado pela razão entre a área coberta e a área ocupada por cada fio, ou seja,* $N \sim \frac{A_c}{a}$. *Usando os valores numéricos, encontramos* ($\pi \sim 3$)*:*

$$A = 3 \times (2 \times 10^{-1})^2 \sim 1 \times 10^{-1}\ m^2 \rightarrow A_c \sim 1 \times 10^{-2}\ m^2$$
$$a = 0,001^2 \sim 1 \times 10^{-6}\ m^2$$
$$N = \frac{A_c}{a} = \frac{1 \times 10^{-1}\ m^2}{1 \times 10^{-6} m^2} \sim 10^5\ \textit{fios}$$

Ao estimarmos a ordem de grandeza do número de fios de cabelo na cabeça tivemos que usar uma série de aproximações, como considerar esférica a forma geométrica da cabeça etc. Isto será sempre necessário para que se tenha um cálculo rápido e o mais simples possível. Para ajudá-lo a fazer uma boa estimativa da ordem de grandeza, tente seguir estas regras práticas:

- ao estimar uma grandeza considere apenas um algarismo significativo
- ao estimar volumes e áreas, comece pela estimativa das dimensões lineares como lados, raios, diâmetros etc.
- ao lidar com áreas ou volumes de objetos de formas geométricas complexas, considere-os como sendo de formas mais simples: quadrados, círculos, cubos, esferas etc.
- no final, verifique sua resposta para ver se a estimativa está razoável (não contenha nenhum absurdo).

Seção 1.5 Medidas de comprimento

Já vimos como indicar o valor da medida de uma grandeza. Agora vamos ver como se faz uma medida para o caso de comprimentos. De uma maneira geral, a forma mais simples de se medir algo é comparar o que se quer medir com o padrão da medida. Por exemplo, se v. vai a uma feira comprar cinco litros de farinha, o procedimento para medir essa quantidade é despejar o produto numa vasilha padrão de um litro, repetindo o processso cinco vezes. Dizemos então que a quantidade de farinha que compramos contém cinco vezes a medida padrão usada pelo feirante, ou simplesmente, cinco litros.

Observe que neste procedimento envolvemos uma comparação direta entre a quantidade comprada e a vasilha padrão. Por isso, dizemos que este processo de medir uma grandeza (no caso, o volume) foi realizado numa **forma direta.** É claro que esta não é a única de medirmos uma grandeza. Já pensou se este procedimento fosse usado para calcular o volume de água do rio Amazonas?

Agora pense numa situação muito mais complicada que seria medir a massa da Terra ou do Sol. Sabemos que a massa da Terra vale $M_T \sim 10^{25}$kg e a do Sol, $M_S \sim 10^{30}$kg. Como se conseguiu fazer esta medida? Bom, com certeza não foi pelo método direto descrito acima, uma vez que neste caso não seria apenas difícil, mas senão impossível de ser aplicado.

Para contornar as situações em que o valor da grandeza a ser medida é muito grande ou muito pequeno, ou então quando o procedimento para uma medição direta é impossível de ser aplicado, usa-se outra forma de medição conhecida como **forma indireta**. Como o nome sugere, neste procedimento não medimos diretamente a grandeza desejada, mas sim uma grandeza auxiliar que está relacionada com a primeira através de princípios físicos e ou geométricos. Por exemplo, v. deve lembrar quando estudou para o vestibular, que existe uma grandeza física chamada *densidade* que é característica de uma substância homogênea (uma espécie de impressão digital) que fornece a relação a entre quantidade de matéria daquela substância e o volume ocupado por aquela quantidade. No caso da água, por exemplo, a densidade nos dá a informação de que, em certas condições, 1g de água ocupa um volume equivalente a 1cm^3, ou o que é o mesmo 1.000kg de água ocupa um volume de 1m^3. Assim, representando esta quantidade pela letra grega ρ (pronuncia-se rô), a relação entre as duas grandezas, massa e volume, para uma substância homogênea, é dada por:

$$\rho = \frac{m}{V}$$

Para a água o valor da densidade é $\rho = 1$ g/cm^3 ou $\rho = 1.000$ kg/m^3. Logo, se quisermos medir a massa de uma certa quantidade de água e não tivermos uma balança disponível, ou quando não for possível realizar este processo de medida, devemos usar a *forma indireta*, medindo-se o volume (grandeza auxiliar) ocupado por essa quantidade de água e em seguida usamos a relação $m = \rho V$ para encontrar a massa de água.

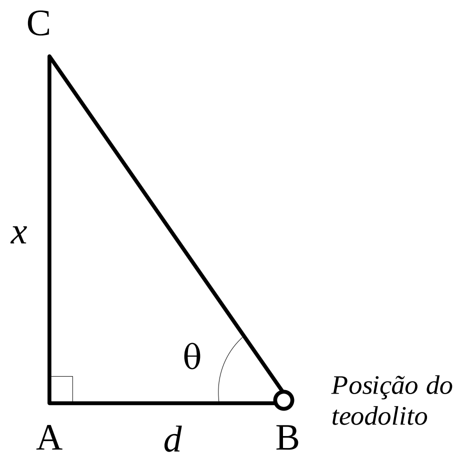
Em resumo, existem duas formas de medir uma grandeza física: (1) *forma direta*, onde a comparamos diretamente com a unidade padrão, e (2) *forma indireta*, onde medimos uma ou mais grandezas auxiliares e, através de relações físicas e ou geométricas com a grandeza procurada, obtém-se o valor desta.

Nesta seção, vamos tratar da medida de comprimento e na próxima seção trataremos do tempo. Comprimento e tempo, juntamente com a massa, são grandezas fundamentais e muito importante para o estudo da mecânica.

No LT, encontra-se um pequeno histórico da adoção do metro como unidade padrão de comprimento. Agora considere a medida do comprimento de uma sala. Como já vimos em outros casos, para se fazer uma medida direta do comprimento de uma sala temos que compará-lo com a unidade padrão de comprimento que é o metro. Isto significa que devemos “contar” quantas vezes esse comprimento é maior ou menor do que o metro. Quando as distâncias se tornam muito grandes ou os procedimentos para uma medição direta inacessíveis, como a medida da largura de um rio ou de um oceano, altitude de um avião etc, temos que recorrer a formas indiretas de medidas.

Triangulação O método da *triangulação* é uma técnica bastante usada para medições indiretas que envolvem longas distâncias ou em situações inacessíveis para a comparação direta com a unidade padrão. Este método baseia-se nas propriedades geométricas de um triângulo, que asseguram a sua completa determinação, conhecendo-se quaisquer três medidas das seis que definem um triângulo (três lados e três ângulos). Para um triângulo retângulo, como um dos ângulo já é conhecido (90°), basta conhecermos um lado e outro ângulo para determinar completamente esse triângulo.

Medida da largura de um rio *Considere o exemplo discutido no LT da medida da largura de um rio, que é representada na figura abaixo pela distância $\overline{AC} = x$, do triângulo ABC, onde C é um ponto localizado na margem oposta a que estamos, sendo portanto uma medida muito difícil de ser feita pelo método direto e por isso devemos recorrer a um procedimento indireto de medição.*



Das relações trigonométricas num triângulo retângulo, define-se a **tangente de um ângulo formado pela hipotenusa e um dos catetos como a razão entre o cateto oposto ao ângulo e o cateto adjacente***. No caso mostrado na figura, a tangente do ângulo θ é dada por*

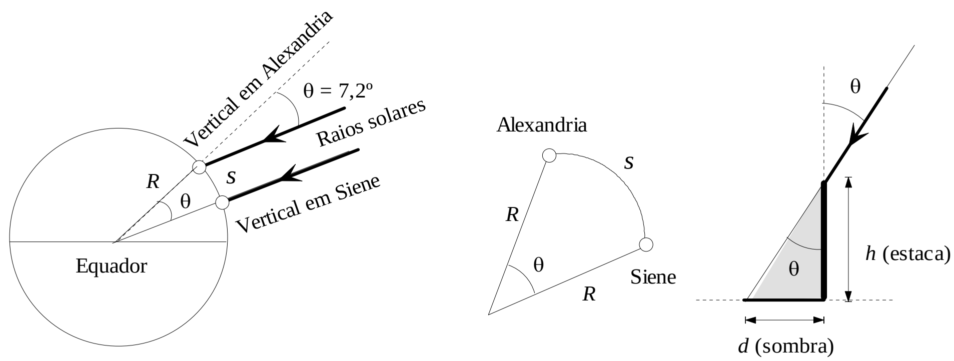
$$\mathrm{tg}\,\theta = \frac{\overline{AC}}{\overline{AB}}$$

ou

$$\mathrm{tg}\,\theta = \frac{x}{d} \rightarrow x = d\,\mathrm{tg}\,\theta$$

Agora vemos que para encontrar a distância x (largura do rio) precisamos conhecer o ângulo θ e a distância d entre os pontos A e B, ambos na mesma margem do rio em que estamos, o que pode ser facilmente obtida pelo método direto. A questão é que precisamos marcar os pontos A e B de tal maneira que o ângulo no vértice A seja de 90^{o}. Isto pode ser feito usando-se um aparelho óptico para medida de ângulos conhecido como teodolito, que é muito usado por topógrafos. O procedimento de medida consiste em escolher arbitrariamente os ponto A, B e C. Com o aparelho colocado no ponto A, marca-se os pontos B e C com uma estacas fincadas no terreno para que possam ser vistas no aparelho. Mirando na direção da estaca C, zera-se o aparelho e, girando-o na direção da estaca B posiciona-se esta para que o ângulo $C\hat{A}B$ seja de 90^{o}. Com as três estacas posicionadas transfere-se o aparelho para o ponto B e faz-se a medida do ângulo θ no vértice B. Finalmente mede-se a distância $\overline{AB}$ que juntamente com o ângulo θ (medidas auxiliares) será usada na medida indireta da distância x entre as duas margens do rio.

Medida do raio da Terra *Outro exemplo da aplicação de método indireto de medição é a determinação do raio da Terra feita por Eratóstenes há mais de dois mil anos, usando uma variante do procedimento da triangulação discutido acima. Leia o LT para saber mais da história.*



(a) (b) (c)

O procedimento usado por Eratóstenes está esquematizado na Figura (a). Na Figura (c) mostramos um esquema de onde se pode obter o ângulo θ entre o raio solar e a direção vertical (estaca) em Alexandria, medindo-se a altura h de uma estaca e o tamanho d de sua sombra. Note que o triângulo formado pelo raio solar, estaca e sombra é um triângulo retângulo e já sabemos como calcular a tangente do ângulo entre a hipotenusa e um cateto. Neste caso, a tangente de θ vale

$$\mathrm{tg}\theta = \frac{d}{h} \to \theta = \mathrm{arctg}\left(\frac{d}{h}\right)$$

Como ele conhecia a altura da estaca e o tamanho da sombra, Eratóstenes encontrou o valor $\theta = 7,2^{\circ}$. Para encontra o raio da Terra precisava ainda da distância entre as duas cidades, Alexandria e Siene, que chamamos de s nas figuras (a) e (b), e algumas relações geométricas simples num círculo. Por exemplo, na Figura (b) representamos o setor circular formado pela direção do raio da Terra naquelas cidades e o arco de círculo definido pela superfície da Terra, cujo perímetro é a distância s.

Proporcionalidade entre arcos e ângulos Quando o ângulo de abertura do setor circular vale 360° o arco se confunde com a circunferência, cujo perímetro chamamos de C. Para uma círculo de raio R, existe uma proporcionalidade entre as medidas dos perímetros e dos ângulos de abertura do arco e da circunferência. Ou seja,

$$\frac{C}{s} = \frac{360^{\circ}}{\theta}$$

Isolando C nesta equação, encontra-se

$$C = \left(\frac{360^{\circ}}{\theta}\right) s$$

Lembrando que $\theta = 7,2^{\circ}$ obtém-se

$$C = \frac{360^{\circ}}{7,2^{\circ}} = 50\, s$$

A distância s entre as duas cidades usada por Eratóstenes equivale em unidades atuais $s = 785$km. Assim, substituindo na equação para C, encontra-se

$$C = 50 \times 785\text{km} = 39.250 \text{ km}$$

Comparando com o valor mais preciso medido atualmente (40.000 km) o erro cometido por Eratóstenes foi menor do que 2%. A partir do comprimento da circunferência, pode-se encontrar o raio da Terra, usando a expressão $C = 2\pi R$. Assim,

$$R = \frac{C}{2\pi} = \frac{39.250\text{ km}}{2 \times 3,14} = 6.250\text{ km}$$

Atualmente, através de medidas precisas do raio da Terra, resulta o valor $R = 6.400$ km.

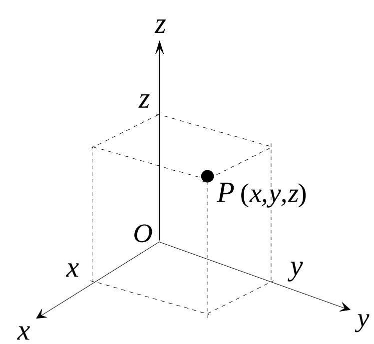
Mãos à obra Como medir a altitude de um avião? Como se faz a medida indireta da distância percorrida por um automóvel?

Seção 1.6 Sistemas de coordenadas

Uma forma observar um objeto no espaço é usar o que chamamos de *sistema de referência* ou simplesmente *referencial,* que nada mais é do que um corpo a partir do qual um observador analisa o que se passa com um objeto. A Terra, o Sol, um carro ou um navio são exemplos de referencial. Associado ao sistema de referência, escolhe-se um *sistema de coordenadas* cujo objetivo é definir univocamente a posição de um ponto no espaço geométrico através de um conjunto de números, em relação a um ponto chamado *origem do sistema,* onde imagina-se esteja o observador. Em alguns livros os dois termos (sistema de referência e sistema de coordenadas) são usados quase como sinônimos, mas é sempre bom lembrar que o significado de "sistema de coordenadas" está relacionado com a determinação desse conjunto de números, enquanto que "sistema de referência" é um termo mais geral, referindo-se ao ponto de vista do observador. Na física existem dois tipos de referenciais conhecidos como *referenciais inerciais* e *referenciais não-inerciais*. Já os sistemas de coordenadas são muitos, sendo o *sistema de coordenadas cartesianas*, *sistema de coordenadas polares* e o *sistema de coordenadas esféricas* os que faremos uso neste curso.

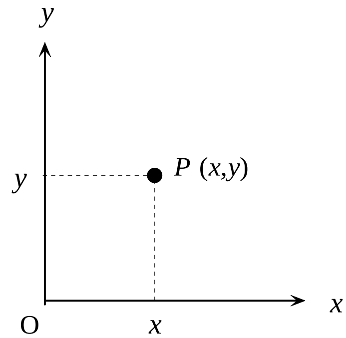
Sistema de coordenadas cartesianas

Ponto no espaço De uma maneira geral precisamos de três números para fixar a posição de um ponto no espaço, conhecidos como coordenadas desse ponto. Um sistema de coordenadas cartesianas é definido por uma origem e três eixos ortogonais em relação aos quais a posição de um ponto P é definida através de suas coordenadas (x, y, z).



Para localizar o ponto P de coordenadas (x, y, z) no espaço, marcam-se sobre os eixo as respectivas coordenadas que irão definir as arestas de uma caixa retangular nas três direções diferentes; em seguida, completa-se o traçado da caixa retangular. O ponto P se encontra no vértice oposto à origem sobre a diagonal da caixa (v. figura).

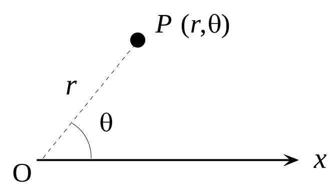
Ponto no plano Quando o ponto se encontra sobre uma superfície plana, só precisamos das coordenadas (x, y) para fixar sua posição. Neste caso, a coordenada x é chamada de *abcissa* e a y, de *ordenada do ponto.*



Para localizar um ponto neste sistema, basta marcar as coordenadas sobre os respectivos eixos e traçar retas paralelas ao eixos cuja interseção nos fornece o ponto procurado.

Sistema de coordenadas polares

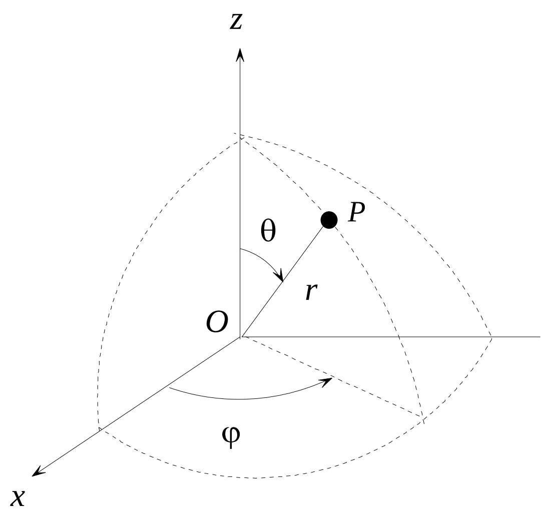
Ponto no plano Uma outra maneira de fixar a posição de um ponto P no plano é usar suas coordenadas polares (r,θ) ao invés das coordenadas cartesianas (x,y). Este sistema é definido por uma origem O e uma direção de referência Ox e está mostrado na figura. .



Para localizar o ponto P através das coordenadas (r,θ) traça-se uma reta passando pela origem fazendo um ângulo θ com a direção de referência e mede-se sobre esta reta a distância $OP = r$

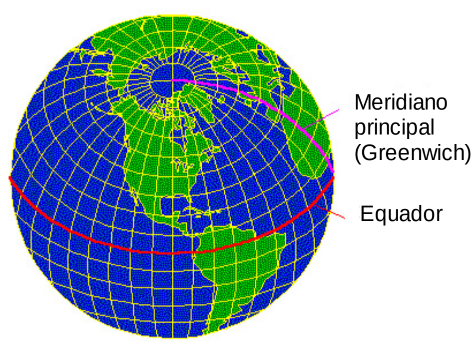
Sistema de coordenadas esféricas

Análogo ao sistema polar, o sistema de coordenadas esféricas é definido por uma origem e duas direções de referência Ox e Oz perpendiculares entre si. As coordenadas d um ponto P são dadas por (r,θ,φ).



Para localizar o ponto P através dessas coordenadas, traçamos inicialmente uma esfera de raio r com centro na origem, sobre cuja superfície estará localizado o ponto P. Os dois ângulos θ e φ fixam a posição do ponto sobre a superfície dessa esfera (v. figura acima).

Ponto sobre a superfície da Terra Para localizar um ponto sobre a superfície da Terra, precisamos apenas de dois ângulos, uma vez que a coordenada r já é conhecida e tem o valor do raio da Terra, $r = R_T$. Os dois ângulos que fixam a posição de um ponto sobre a superfície da Terra são conhecidos como *latitute* e *longitude.* O ângulo de latitude, que chamaremos de λ, varia entre 0° e 90° ao norte (N) ou ao sul (S) do equador, enquanto que o ângulo de longitude (φ) varia entre 0° e 180° a leste (L) ou a oeste (O) do meridiano de Greenwich (ver figura abaixo). Para a cidade de Manaus, por exemplo, $\lambda = 3^{\circ}\ 06'$S e $\varphi = 60^{\circ}\ 00'$ O



Seção 1.7 Medida do tempo

Comprimento, massa e tempo são as grandezas fundamentais que aparecem na formulação da mecânica, assunto da física que estudaremos neste curso de Física I. Dessas grandezas, o tempo sempre foi motivo de muitas discussões e até hoje não se tem uma boa resposta para a pergunta “o que é o tempo?”.

Em épocas muito remotas, o tempo já foi interpretado como algo que flui devido ao movimento do Sol através do céu, e não o contrário, como podemos ler em algumas passagens bíblicas. Com esta interpretação, acreditava-se que, parando o Sol, o tempo deixasse de passar. Talvez por isso, em algumas culturas antigas já se pensou em tempo como algo cíclico, ou seja, uma grandeza finita num vai-e-vem constante, ao invés de prosseguir indefinidamente como na contagem dos anos 2004, 2005, 2006 ...

Em filmes de ficção, como Super-Homem I, associa-se a passagem do tempo com o sentido do movimento de rotação da Terra, como se pode ver nas cenas em que o herói, para salvar sua amada Lois Lane que morre asfixiada em seu carro soterrado por um terremoto, inverte o sentido de rotação da Terra para retroceder o tempo ... e a retira viva de seu automóvel. Coisa impossível de acontecer!

Newton em seu livro *Principios Matemáticos da Filosofia Natural* (1687) introduziu o conceito de *tempo absoluto,* que definiu da seguinte forma: "*O tempo absoluto, verdadeiro e matemático, por si só e por sua própria natureza, flui uniformemente, sem relação com nenhuma coisa externa ...".* Este conceito de tempo, embora provido de carácter científico que faltava aos antigos, hoje não tem muita utilidade como uma definição do tempo físico.

Parece que o melhor que se pode dizer sobre o tempo tenha sido escrito por Feynman em seu livro *The Feynman's Lectures on Physics*: "(...) *Talvez seja como se estivéssemos diante do fato de que o tempo seja uma das coisas que provavelmente não podemos definir (no sentido de dicionário) e devemos dizer simplesmente que ele é o que já sabemos: é o quanto esperamos*." E completa: "*O que realmente importa, não é como definimos o tempo, mas como o medimos.*"

No LT encontramos uma discussão detalhada sobre a medida do tempo. Leia-a com bastante atenção (releia se necessário) e procure entendê-la como uma forma de desmistificar o conceito de tempo físico, retirando-lhe o carácter absoluto, que, como Newton, intuitivamente somos levados a atribui-lo, e associando-o a *relógios,* que são objetos concretos, sujeitos às leis físicas como qualquer outro objeto, e assim contribuindo para eliminar com o preconceito de que o tempo não pode ser afetado por qualquer condição física.

Leitura complementar

A Física é uma ciência empírica. Tudo que sabemos a respeito do mundo físico e sobre os princípios que governam o seu comportamento foi apreendido através de *observações* e *experimentações* dos fenômenos naturais. O teste final de qualquer teoria física é a concordância com observações e medidas de fenômenos físicos. Assim, a Física é, intrinsecamente, a ciência da medida.

> *Tenho afirmado frequentemente que, quando se pode medir aquilo de que se está falando e exprimir essa medida em números, fica-se sabendo algo a seu respeito; mas, quando não se pode exprimi-la em números, o conhecimento é limitado e insatisfatório. Ele pode se o começo do conhecimento, mas o pensamento terá avançado muito pouco para o estágio científico, qualquer que seja o assunto. (Lorde Kelvin, 1824-1907).*

Qualquer número, ou conjunto de números usados para descrever quantitativamente um fenômeno físico é chamado *grandeza física.* Para definir uma grandeza física, é preciso especificar, seja um procedimento para *medí-la*, seja um meio de *calcular* o seu valor a partir de outras grandezas que podem ser medidas.

Grandezas fundamentais e unidades

Antes de medir alguma coisa, devemos selecionar uma unidade para cada tipo de grandeza a ser medida. Para fins de medida, consideram-se as grandezas e as respectivas unidades divididas em duas categorias: *fundamentais* e *derivadas*. Na Física, reconhecem-se a existência de quatro grandezas fundamentais independentes: *comprimento, tempo, massa* e corrente elétrica. As grandezas derivadas podem ser expressas como combinações dessas quatro e não precisam de unidades especiais para serem expressas.

As grandezas possuem dimensões, que expressam sua natureza fundamental, e unidades, que são escolhidas através de convenção para expressar sua magnitude ou medida. Por exemplo, uma série de eventos tem uma certa duração no tempo. Tempo é a dimensão de *duração*. A duração poderia ser expressa como 30 minutos ou como meia hora. Minutos e horas são as unidades nas quais podemos espressar o tempo. Pode-se comparar quantidades de mesma dimensão, ainda que sejam expressas em unidades diferentes (uma hora é mais longa que um minuto). Por outro lado, não se podem comparar quantidades de dimensões diferentes.

As dimensões fundamentais usadas em mecânica são *tempo*, *massa* e *comprimento*. Simbolicamente, são escritas como T, M e L, respectivamente. O estudo do eletromagnetismo introduz uma dimensão fundamental adicional, a corente elétrica, ou I. Outras quantidades têm dimensões derivadas destas. Por exemplo, a velocidade tem a dimensão de distância (comprimento) dividida pelo tempo, que pode ser escrita como L/T ou LT^{-1} e volume tem a dimensão de comprimento ao cubo, ou L^3. Algumas quantidades, como temperatura, têm unidades mas não derivadas das dimensões fundamentais.

Hoje, todas essas unidades são estabelecidas através de um tratado internacional, e são revisadas periodicamente como resultado do desenvolvimento científico. As unidades usadas para a maioria das medidas científicas fazem parte de um sistema de unidades, baseado no sistema métrico, conhecido oficialmente como *Sistema Internacional de Unidades*, ou SI. Uma vez definidas as unidades fundamentais, é fácil introduzir unidades maiores ou menores para as mesmas grandezas físicas. Neste sistema de unidades, o *metro* é a unidade fundamental de comprimento, o *segundo*, a do tempo e o *quilograma,* a unidade fundamental de massa. No sistema métrico (SI) as unidades adicionais estão sempre relacionadas com as fundamentais por múltiplos de 10 ou de $1/10$ (submúltiplos de 10).

Prefixos para as principais potências de dez

	← submúltiplos							múltiplos →				
Potência	10^{-15}	10^{-12}	10^{-9}	10^{-6}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10^{1}	10^{2}	10^{3}	10^{6}	10^{9}
Prefixo	femto	pico	nano	micro	mili	centi	deci	deca	hecto	quilo	mega	giga
Abreviatura	f	p	n	μ	m	c	d	da	h	k	M	G

Veja alguns exemplos do uso de múltiplos e submúltiplos de 10 e seus prefixos.

1 quilômetro	=	1 km	=	10^3 metros	=	10^3 m
1 quilograma	=	1 kg	=	10^3 gramas	=	10^3 g
1 centímetro	=	1 cm	=	10^{-2} metros	=	10^{-2} m
1 nanômetro	=	1 nm	=	10^{-9} metros	=	10^{-9} m
1 micrômetro	=	1 μm	=	10^{-6} metros	=	10^{-6} m
1 milissegundo	=	1 ms	=	10^{-3} segundos	=	10^{-3} s
1 picossegundo	=	1 ps	=	10^{-12} segundos	=	10^{-12} s
1 megahertz	=	1 MHz	=	10^6 Hertz	=	10^6 Hz

Precisão e algarismos significativos

Toda vez que realizamos uma medida de uma grandeza física, através de um método experimental, nunca o fazemos com precisão absoluta, apresentando sempre uma incerteza, que depede de uma série de fatores, incluindo o aparelho usado para fazer a medida, o tipo e o número de medidas realizadas, assim como o método utilizado por quem realiza tal medida. Asssim, a menos que se diga qual a precisão da medida, o número encontrado para a quantidade numérica da grandeza, que foi objeto daquela medida, não tem muito significado. A precisão de um número é frequentemente indicada com o símbolo $\pm$ após o número e antes de um segundo número indicando o erro máximo. Por exemplo, se uma medida for representada por $12,54\ \pm 0,02$ isto significa que seu valor verdadeiro está entre $12,52\ \ (= 12,54 - 0,02)$ e $12,56\ \ (= 12,54 + 0,02)$. A precisão também pode ser representada através do erro fracional ou percentual. Assim, no exemplo acima, a incerteza fracional é $\frac{0,02}{12,54}$ que é aproximadamente igual a $0,0016$; o erro percentual é de $(0,0016)(100\%)$, aproximadamente, $0,16\%$. Assim, podemos também escrever aquela medida como $12,54 \pm 0,16\%$.

Quando se usam números com incertezas ou erros para calcular outros números, estes também serão imprecisos. É particularmente importante compreender isto quando se deseja comparar um número obtido através de medidas com um valor obtido por uma previsão teórica. Suponha que um estudante queira verificar o valor de π, isto é, a razão entre o comprimento da circunfência e o diâmetro de um círculo. O valor correto, com dez algarismo é $3,141\,592\,654$. Então, o estudante desenha um círculo e mede a circunferência e o diâmetro com uma precisão de 1 mm, obtendo os valores 424 ± 1 mm e 135 ± 1 mm, respectivamente. Dividindo estes número, encontra o valor $424/135 = 3,140\,740\,741$. A questão é: há ou não concordância com o valor teórico?

Para responder a esta questão, é preciso antes entender o que são *algarismos significativos*. De uma maneira geral, dada a precisão ou incerteza de um número é possível definir quantos algarismos significativos estão associados à quantidade representada pelo número. Por exemplo, se uma medida for representada por $642,54389 \pm 1\%$, isto significa que a incerteza nesta medida é de aproximadamente $6,4$: $642,54389 \pm 6,4$. Pergunta-se: qual o significado dos algarismos da parte decimal desta medida, se o erro é da ordem de 6 ? Poderíamos muito bem representar este número por 642 ± 6, mantendo apenas os algarismos que realmente tiverem significado.

Voltando ao caso da medida de π, o resultado encontrado pelo estudante tem mais números significativos que os da medidas por ele realizado. De fato, suas medidas tinham apenas *três algarismos signficativos*, devendo também seu resultado apresentar somente três algarismos significativos, ou seja, ser $3,14$. Dentro do limite de *três algarismos significativos* o valor encontrado pelo estudante *concorda* com o valor real de π.

De um modo geral, nenhum resultado numérico pode ter mais algarismos significativos do que os números que foram usados para calculá-los. Uma regra prática quando fazemos multiplicação, divisão ou para cálculos complicados envolvendo vários tipos de operações, é a seguinte:

Quando se efetua uma série de operações matemáticas com números que possuem precisões conhecidas, o procedimento mais simples consiste em realizar as operações, uma de cada vez, sem tomar conhecimento do problema dos algarismos significativos, até a conclusão da operação. O resultado deverá então ser reduzido a um número que tenha a mesma quantidade de algarismos significativos que o número de menor precisão dentre aqueles que participam do cálculo.